



ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάλυση ηχητικών σημάτων με τη χρήση
χαμηλού κόστους επιταχυνσιομέτρου τύπου
mems, με την πλατφόρμα μικροελεγκτή
ανοιχτού κώδικα Arduino

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΙΔΗ ΘΕΟΔΩΡΟΥ

Επιβλέποντες: Μάρκος Αυλωνίτης
Μιχαήλ Στεφανιδάκης
Κωνσταντίνος Οικονόμου

Κέρκυρα, Απρίλιος 2021

Περίληψη

Κύριος άξονας αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η απόκτηση των δεδομένων μεταβολής της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος, καθώς τα ηχητικά σήματα από την πηγή συχνοτήτων διεγείρουν το επιταχυνσιόμετρο τύπου mems, με σκοπό την μελέτη τους ώστε να πραγματοποιηθεί επαλήθευση των χαρακτηριστικών του αισθητήρα ADXL335. Η υλοποίηση του κώδικα, τα πειράματα αλλά και τα αποτελέσματα έχουν ως βάση την πλατφόρμα μικροελεγκτή ανοιχτού κώδικα Arduino, καθώς ο αισθητήρας ADXL335 αποτελεί επέκτασή της. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ελέγχεται για την απόδοση και την απόκριση συχνοτήτων ο άξονας Z του αισθητήρα. Με την επαλήθευση αυτή σηματοδοτείται η χρήση του συγκεκριμένου επιταχυνσιόμετρου και σε άλλες εφαρμογές.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την υποστήριξη τους με κάθε δυνατό τρόπο όλα αυτά τα φοιτητικά χρόνια.

Να ευχαριστήσω βεβαίως τον καθηγητή Αυλωνίτη Μάρκο καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Βλάχο Ιωάννη, οι οποίοι έδειξαν ενδιαφέρον και με καθοδήγησαν κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Τέλος, φυσικά όλη την καλή παρέα που αναπτύχθηκε στην Κέρκυρα για τις αξέχαστες στιγμές που περάσαμε μαζί αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Ευχαριστίες	i
Περιεχόμενα	iii
Κατάλογος Σχημάτων	iv
Κατάλογος Πινάκων	v
1 Εισαγωγή	1
1.1 Πλάνο	2
2 Περιγραφή του υλικού	3
2.1 Arduino	3
2.1.1 Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά	3
2.1.2 ATmega328P	4
2.2 ADXL335	5
2.2.1 MEMS	7
2.3 Breadboard	9
3 Περιγραφή του λογισμικού	11
3.1 Arduino IDE	11
3.2 Excel/PLX-DAQ	13
3.3 Matlab	14
4 Υλοποίηση κώδικα	15
4.1 Κώδικας Arduino	15
4.2 Κώδικας Matlab	18
4.2.1 Γεννήτρια συχνοτήτων	18
4.2.2 Ημιτονοειδής καμπύλη	19
4.2.3 Θεώρημα Nyquist - Shannon	20
4.2.4 Διαχείριση δεδομένων	22

5 Προετοιμασία - Πειράματα	26
6 Αποτελέσματα	29
6.1 Απόκριση συχνοτήτων ηχείου	29
6.2 Απόκριση συχνοτήτων αισθητήρα ADXL335	31
6.3 Πιθανότητα ανακρίβειας αποτελεσμάτων	33
6.4 Βελτιώσεις	33
7 Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	35
A' Δεδομένα	37

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Arduino Uno Diagram [13]	4
2.2	ADXL335 Functional Block Diagram [7]	6
2.3	ADXL335 GY-61 [15]	6
2.4	MEMS αρχιτεκτονική [2]	8
2.5	Συμπεριφορά GY-61 ανάλογα με τον προσανατολισμό του [7]	9
2.6	Απεικόνιση Breadboard μεσαίου μεγέθους [5]	10
3.1	Arduino IDE	12
3.2	PLX-DAQ v2.11	13
3.3	Matlab R2016a	14
4.1	Ημιτονοειδής καμπύλη [14]	19
4.2	Παράδειγμα Aliasing [8]	21
5.1	Συνδεσμολογία Arduino Uno - ADXL335	26
5.2	Φωτογραφία πειράματος	27
6.1	Απόκριση συχνοτήτων ηχείου Sony ss cs5 [12]	30
6.2	Απόκριση συχνοτήτων ADXL335 αναφορικά με την τυπική απόκλιση	32

Κατάλογος Πινάκων

Α΄.1 Πίνακας Δεδομένων	38
----------------------------------	----

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο αισθητήρας χαμηλού κόστους ADXL335 GY-61 τύπου mems που μελετάει η εργασία, καταγράφει επιτάχυνση της βαρύτητας στους 3 άξονες. Τέτοιου τύπου αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές στις οποίες το χαμηλό κόστος αλλά και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου υλικού.

Κάποιες εφαρμογές οι οποίες χρησιμοποιούν επιταχυνσιόμετρα τύπου mems είναι για παράδειγμα : τα σύγχρονα κινητά τηλέφωνα στα οποία χρησιμοποιούνται ως γυροσκόπιο, οι αερόσακοι για την καταγραφή σύγκρουσης του οχήματος έτσι ώστε να επιτευχθεί η άμεση απελευθέρωση τους, στην πλοήγηση για τον προσανατολισμό του χρήστη, σε κάποιες ηλεκτρικές συσκευές ως μηχανισμός αναγνώρισης πτώσης έτσι ώστε να αποφευχθεί η μέγιστη ζημία και άλλες πολλές που συναντώνται αρκετά συχνά στην καθημερινότητά μας.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των mems συσκευών είναι ότι χάρη στην συγκεκριμένη τεχνολογία μπορούν να υλοποιηθούν πολύ μικρού μεγέθους αισθητήρες οι οποίοι είναι ικανοί να μην θυσιάσουν παράλληλα (όσο είναι εφικτό λόγω του μεγέθους) την απόδοση τους, σε σχέση με αισθητήρες οι οποίοι δεν προσπαθούν να προσφέρουν κάτι περιορισμένο σε κλίμακα μεγέθους.

Στην προκειμένη περίπτωση ένας τέτοιος mems αισθητήρας επιτάχυνσης της βαρύτητας καταγράφει δονήσεις χρησιμοποιώντας ένα ενσωματωμένο σύστημα με πυκνωτές για τον κάθε άξονα, έτσι ώστε με την κάθε κίνηση να μεταβάλλεται η τάση των πυκνωτών άρα και η έξοδος που αντιστοιχεί στον κάθε άξονα.

Ο στόχος της εργασίας είναι σαφώς η επαλήθευση των χαρακτηριστικών του αισθητήρα ADXL335 χρησιμοποιώντας όμως ως μέθοδο δόνησης του αισθητήρα, ηχητικά κύματα. Συνήθως το input στους άξονες είναι κάποια δόνηση η οποία προέρχεται από κάποια σύγκρουση της συσκευής που περιέχει τον αισθητήρα, κάποια περιστροφή από τον χρήστη ακόμα και από γεωλογικά φαινόμενα δηλαδή κάποιο πιθανό σεισμό. Επομένως, αντιλαμβάνεται κανείς ότι από την χρησιμοποίηση ηχητικών κυμάτων για να μελετηθεί το πως επηρεάζεται ο αισθητήρας προκύπτει μια ενδιαφέρουσα οπτική για τις ικανότητες του αισθητήρα.

Για να φτάσουμε σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει αναφορά στο πλάνο που ακολουθήθηκε, για να σχηματιστεί μια γενική εικόνα για τα βασικά μέρη που απαρτίζουν την υλοποίηση της επαλήθευσης. Στην συνέχεια, κάθε μέρος θα σχολιαστεί και θα αναλυθεί ως

προς τον σκοπό που υπηρετεί στην παρούσα εργασία. Από την στιγμή που η προκείμενη πτυχιακή είναι μια πρακτική εργασία, λόγος θα γίνει και για τις τεχνικές δυσκολίες αλλά και για το πως επιλύθηκε το κάθε ζήτημα.

1.1 Πλάνο

Το πρώτο βήμα για την υλοποίηση είναι η κατάλληλη ρύθμιση του αισθητήρα ADXL335 έτσι ώστε να λειτουργεί όπως ακριβώς χρειάζεται για τα δεδομένα της εργασίας. Ο αισθητήρας ως προεπιλογή έχει ως έξοδο τιμές που απεικονίζουν τάση, όμως στην περίπτωση αυτή δεν μπορούμε να κατανοήσουμε άμεσα τέτοιου τύπου δεδομένα. Γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να μετατραπούν τα δεδομένα από τάση σε επιτάχυνση της βαρύτητας ώστε να κατανοηθεί πλήρως η αντίδραση του αισθητήρα.

Αφού έχει ρυθμιστεί κατάλληλα ο αισθητήρας, θα πρέπει στη συνέχεια -με κάποιο τρόπο- να παραχθούν συχνότητες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για την κάθε μια, προκειμένου να τροφοδοτούνται στον αισθητήρα. Σε αυτήν την εργασία δημιουργήθηκε μια γεννήτρια συχνοτήτων έτσι ώστε κάθε φορά να υπάρχει ευελιξία ως προς τα χαρακτηριστικά των συχνοτήτων με μικρές και γρήγορες αλλαγές στον κώδικα. Οι συχνότητες αυτές είναι πολύ σημαντικές και παίζουν καθοριστικό ρόλο στα πειράματα και εν τέλει στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον αισθητήρα.

Το επόμενο βήμα είναι η απόκτηση των δεδομένων από τον αισθητήρα. Για την απόκτηση δεδομένων υπάρχουν πολλοί τρόποι με τον καθένα να έχει τα θετικά και τα αρνητικά του. Αυτός που προτιμήθηκε στην παρούσα περίπτωση είναι ένας αυτόματος τρόπος ο οποίος, αφού έχουν ρυθμιστεί ώστε να δουλεύουν αρμονικά διάφορα τμήματα λογισμικού που είναι αρμόδια για την επικοινωνία του αισθητήρα προς την έξοδο, καταγράφει με αυτόματο τρόπο όλες τις τιμές που προκύπτουν σαν έξοδο. Πιο συγκεκριμένα θα αναλυθεί στο κεφάλαιο περιγραφής του λογισμικού.

Τέλος, οι τιμές που προκύπτουν από τα πειράματα δηλαδή τα αποτελέσματα, συγκρίνονται με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα, για να προκύψει ένα τελικό αποτέλεσμα το οποίο είναι και ο γενικός στόχος της εργασίας, για το αν τελικά επαληθεύονται τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα.

Με την επαλήθευση των εν λόγω χαρακτηριστικών με την συγκεκριμένη μεθοδολογία ουσιαστικά σηματοδοτείται η επέκταση του αισθητήρα ADXL335 GY-61 σε περισσότερες εφαρμογές οι οποίες χρησιμοποιούν τον αισθητήρα ως αισθητήρα καταγραφής δόνησης από παραγόμενες συχνότητες από οποιαδήποτε πηγή, λαμβάνοντας υπόψιν βέβαια τις συμβάσεις που έγιναν κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή του υλικού

2.1 Arduino

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό το θέμα με το οποίο ασχολείται η εργασία, θα ήταν χρήσιμο να κατανοηθεί αρχικά το κυρίως μέρος της. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το υλικό απαρτίζεται από την πλατφόρμα του Arduino και του αισθητήρα ADXL335.

2.1.1 Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά

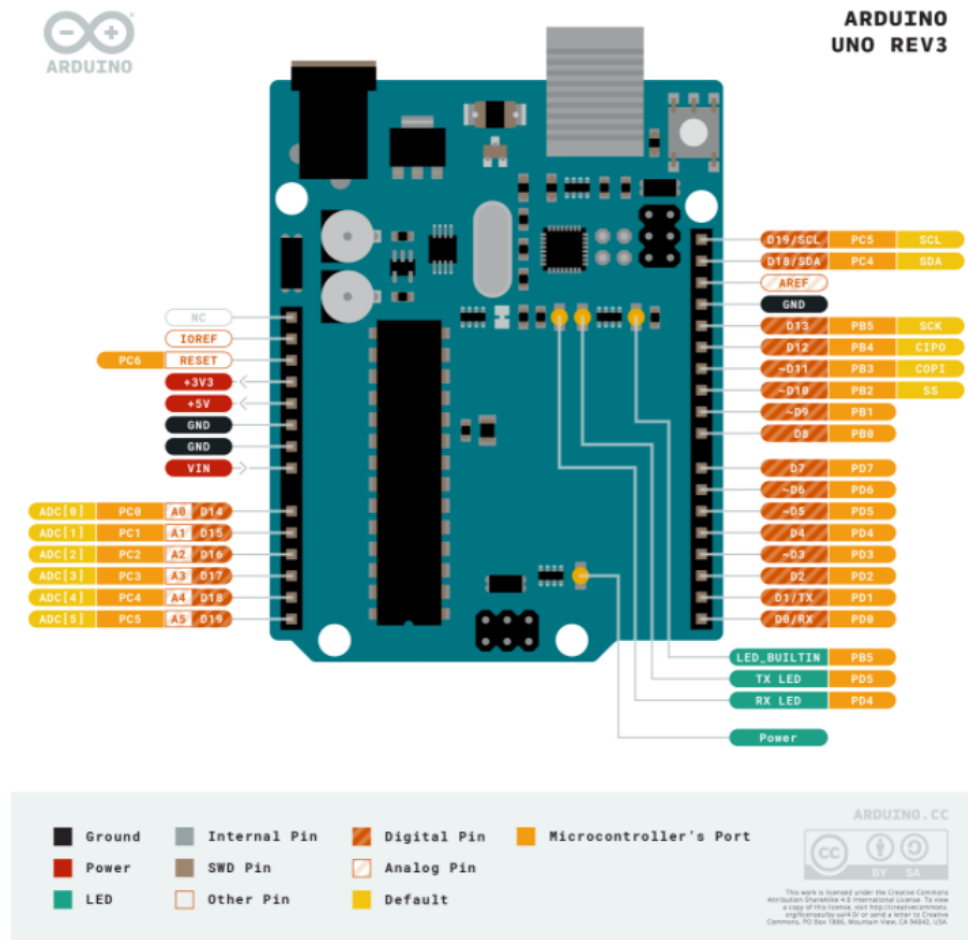
Το Arduino[4] και συγκεκριμένα το μοντέλο Uno [13] (το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την περίπτωση), είναι μια πλατφόρμα μικροελεγκτή ανοιχτού κώδικα η οποία έχει συνολικά 14 ψηφιακές υποδοχές οι οποίες είναι αρμόδιες για είσοδο και έξοδο. Έχει επίσης 6 αναλογικές υποδοχές οι οποίες χρησιμοποιούνται ως είσοδοι. Για τον σκοπό της εργασίας, μας εξυπηρετούν οι αναλογικές υποδοχές από την στιγμή που η φύση των πειραμάτων είναι στον αναλογικό χώρο αφού ασχολούμαστε με ηχητικά σήματα.

Επιπροσθέτως, το Arduino Uno περιέχει θύρα usb αλλά και θύρα για λειτουργία με AC-to-DC adapter, είτε για σύνδεση σε πρίζα είτε σε μπαταρία για κάποιο φορητό project. Στην προκειμένη περίπτωση όμως η πλακέτα συνδέεται με usb όχι μόνο για την τροφοδοσία της αλλά και για την μεταφορά των δεδομένων της προς τον Υ/Η. Τα δεδομένα αυτά είναι οι μεταβολές του αισθητήρα τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

Για τον προγραμματισμό της πλατφόρμας παρέχεται ένα δωρεάν περιβάλλον ανάπτυξης (Arduino IDE) το οποίο χρησιμοποιεί ως γλώσσα προγραμματισμού μια απλουστευμένη έκδοση της γλώσσας C++. Το λογισμικό επίσης παρέχει όλα τα σχετικά εργαλεία που απαιτούνται ώστε να γίνει compile ο κώδικας αλλά και για την σωστή επικοινωνία του Arduino Uno με τον Η/Υ. Επίσης, ορισμένοι αισθητήρες για να λειτουργήσουν σωστά χρειάζονται ειδική μεταχείριση από το λογισμικό. Γι' αυτόν τον λόγο, το λογισμικό παρέχει τις αντίστοιχες βιβλιοθήκες για κάθε αισθητήρα αλλά και για κάθε μοντέλο Arduino ώστε η εμπειρία του χρήστη με αυτούς να είναι πιο εύκολη και αποδοτική. Αναλυτικότερα για την λειτουργικότητα του λογισμικού στο κεφάλαιο με την περιγραφή του λογισμικού.

Παρακάτω (Σχήμα 2.1) παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα με το κυρίως layout των υποδοχών του Arduino Uno.

Pinout Diagram



Σχήμα 2.1: Arduino Uno Diagram [13]

2.1.2 ATmega328P

Όσον αφορά τον μικροελεγκτή του Arduino, η πλατφόρμα βασίζεται στο microchip με όνομα ATmega328P [3]. Ο εν λόγω 8bit μικροελεγκτής της οικογένειας των AVR microchips έχει υψηλές επιδόσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ο οποίος χρησιμοποιεί μια ανανεωμένη έκδοση της RISC αρχιτεκτονικής με συγκεκριμένη τάση για την σωστή λειτουργία του από 2.7V μέχρι 5.5V.

Η RISC(Reduced Instruction Set Computer) [6] αρχιτεκτονική, δηλαδή Υπολογιστής Περιορισμένου Συνόλου Εντολών, είναι μια αρχιτεκτονική η οποία χρησιμοποιείται σε διάφορα projects κυρίως από την δεκαετία του 70 και έπειτα, αφού τα πρώτα πραγματοποιήθηκαν από

την IBM αλλά και από πανεπιστήμια όπως Stanford και UC-Berkeley. Υλοποιεί μια τεχνική η οποία βασίζεται σε μικρό αριθμό αλλά ταυτόχρονα εξαιρετικά βελτιστοποιημένων συνόλων εντολών ενώ άλλες αρχιτεκτονικές χρησιμοποιούν μεγαλύτερο αριθμό αλλά περισσότερο εξειδικευμένων συνόλων εντολών .

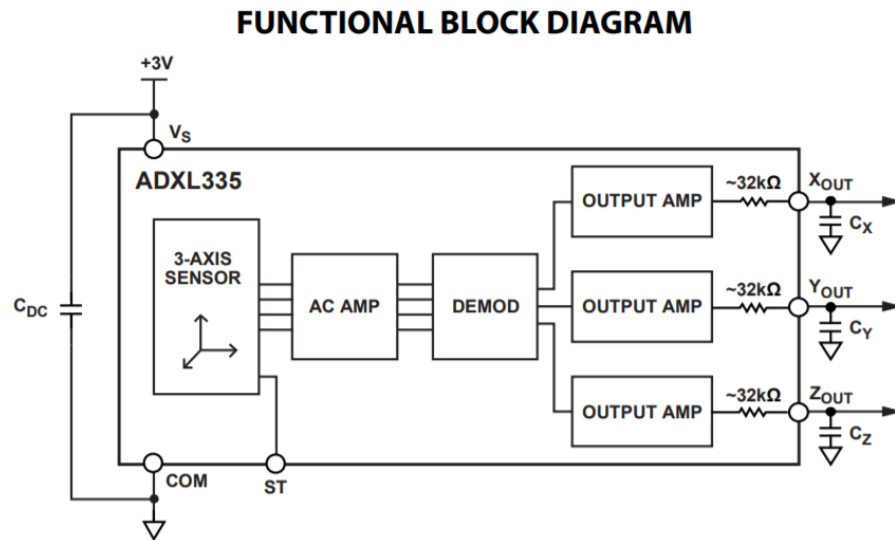
Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των RISC επεξεργαστών είναι τα εξής:

- Χρόνος εκτέλεσης ενός κύκλου : ο ρυθμός clock ανά εντολή δηλαδή CPI είναι ένας κύκλος (cycle).
- pipelining : τεχνική με την οποία επιτυγχάνεται παράλληλη εκτέλεση διαφορετικών τμημάτων διαδικασιών για την πιο αποδοτική εκτέλεσή τους.
- μεγάλος αριθμός καταχωρητών (registers) : αυτό το χαρακτηριστικό προέρχεται από την σχεδιαστική φιλοσοφία της RISC αρχιτεκτονικής έτσι ώστε να μην υπάρχουν μεγάλα φορτία δεδομένων τα οποία αλληλεπιδρούν με την μνήμη.

Γενικότερα, η οικογένεια των AVR microchips χωρίζεται σε 3 υποκατηγορίες[9]. Τα AT90S, ATtiny και ATmega. Αρχικά, αναπτύχθηκε η σειρά AT90S η οποία είναι εξέλιξη της σειράς AT89C όπως ηποδηλώνει το όνομά της. Η AT90S είναι μια πολύ δημοφιλής σειρά γενικής χρήσης μικροελεγκτών μικρού κόστους με ισχυρότερες επιδόσεις από την προηγούμενη σειρά. Η κατασκευάστρια εταιρεία Atmel, στην μετέπειτα πορεία της έβγαλε στην αγορά τις 2 επόμενες σειρές μικροελεγκτών με διαφορετικούς σκοπούς που στοχεύουν σε εφαρμογές με διαφορετικές ανάγκες. Η πρώτη σειρά, με όνομα ATtiny προοριζόταν για μικρές εφαρμογές με μικρές απαιτήσεις από τον μικροελεγκτή αφού είχε λιγότερη ισχύ και χαρακτηριστικά από τα υπόλοιπα μοντέλα. Η δεύτερη σειρά, ATmega είχε αντίθετο σκοπό από την πρώτη όπως προκύπτει από το όνομά της. Στόχευε σε πιο σύνθετες εφαρμογές με ανάγκη για έναν πιο ισχυρό μικροελεγκτή ο οποίος να μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Για την συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής ATmega328P όπως προαναφέρθηκε, ο οποίος όπως ηποδηλώνει το όνομά του είναι ένα μοντέλο της σειράς ATmega.

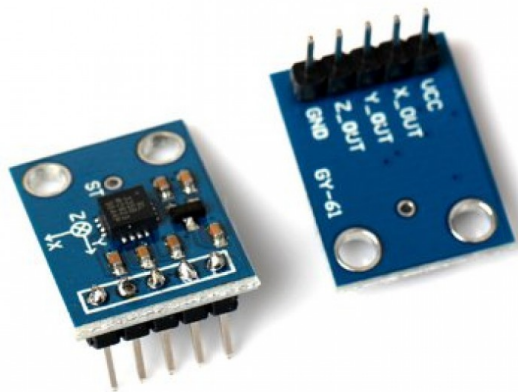
2.2 ADXL335

Ένα από τα πιο σημαντικά αν όχι το σημαντικότερο κομμάτι του υλικού που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία είναι προφανώς ο ίδιος ο αισθητήρας. Ο αισθητήρας ADXL335 και συγκεκριμένα το μοντέλο GY-61 [7], είναι ένα μικρού μεγέθους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, 3 αξόνων με εύρος επιτάχυνσης $\pm 3g$, επιταχυνσιόμετρο τύπου mems. Σκοπός του είναι η μέτρηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε διάφορες εφαρμογές, όπως στην περίπτωση περιστροφής του από κάποιον συγκεκριμένο άξονα ή μια σύνθετη μη καθορισμένη περιστροφική κίνηση, είτε στην περίπτωση καταγραφής δόνησης, η οποία εξετάζεται επίσης ως επιτάχυνση της βαρύτητας.



Σχήμα 2.2: ADXL335 Functional Block Diagram [7]

Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί 3 πυκνωτές οι οποίοι αντιστοιχούν στον κάθε άξονα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Συγκεκριμένα είναι ο C_x , C_y και ο C_z στις αντίστοιχες υποδοχές X_{out} , Y_{out} και Z_{out} . Στην συγκεκριμένη πλατφόρμα δεν έχουν όλοι οι άξονες την ίδια απόκριση συχνοτήτων. Συγκεκριμένα για τον άξονα X και Y το εύρος συχνοτήτων είναι από 0.5 Hz έως 1600 Hz, ενώ για τον άξονα Z το εύρος είναι από 0.5 Hz έως 550 Hz. Στην συγκεκριμένη εργασία θα μελετηθεί αποκλειστικά ο Z άξονας όπως προαναφέρθηκε, παίζοντας καθοριστικό ρόλο το αντίστοιχο εύρος συχνοτήτων του.



Σχήμα 2.3: ADXL335 GY-61 [15]

Επιπροσθέτως, αναφορικά με την παραπάνω εικόνα (Σχήμα 2.3) που απεικονίζει τον αισθητήρα όπως είναι στην πραγματικότητα, είναι ευδιάκριτο πως οι βασικές του υποδοχές είναι οι εξής:

- η υποδοχή VCC (ολογράφως Voltage Common Collector) είναι αρμόδια για την παροχή του ρεύματος στον αισθητήρα.
- οι 3 υποδοχές X_OUT, Y_OUT και Z_OUT για τους άξονες X, Y και Z αντίστοιχα, για την έξοδο των αναλογικών τιμών τάσης.
- η υποδοχή με την ένδειξη GND (Ground) βρίσκεται για την σύνδεση της γείωσης στην πλατφόρμα του Arduino για την αποφυγή δημιουργίας θορύβου αλλά και την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.
- τελικά, υπάρχει η υποδοχή ST (Self-Test) η οποία χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του αισθητήρα συνδέοντας την υποδοχή με την παροχή του ρεύματος με τάση 3V.

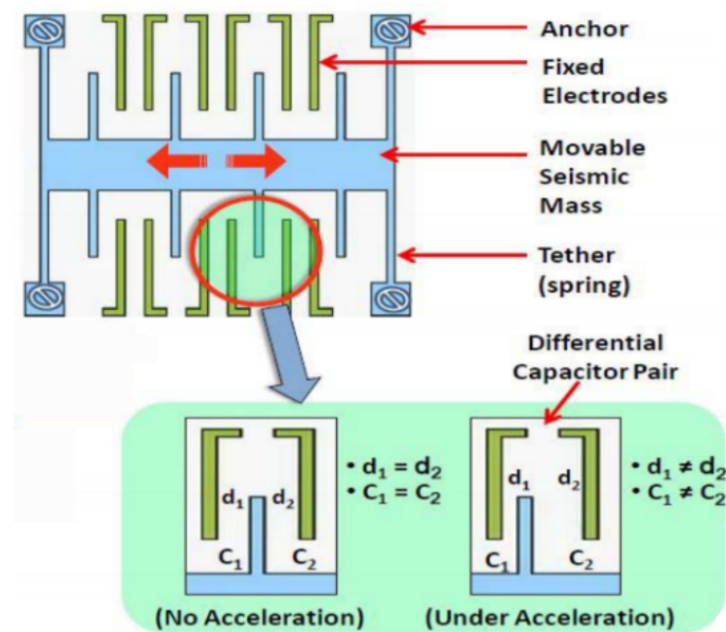
Όσον αφορά τις αντοχές του αισθητήρα, η μέγιστη επιτάχυνση που μπορεί να διαχειριστεί ο αισθητήρας είναι 10.000g για όλους του άξονες, το μέγιστο εύρος αντοχής του σε θερμοκρασία είναι από -55°C μέχρι $+125^{\circ}\text{C}$ ενώ τροφοδοτείται, ενώ όταν δεν τροφοδοτείται το εύρος είναι από -65°C μέχρι $+150^{\circ}\text{C}$. Το εύρος τάσης για την λειτουργία είναι από $-0,3\text{V}$ έως $+3,6\text{V}$. Για να εξασφαλιστεί ότι ο αισθητήρας θα λαμβάνει πάντα τροφοδοσία κατάλληλης τάσης περιέχει ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης στα 3,3V οπότε καθιστά εφικτή την σύνδεση των 3,3V με την πλατφόρμα του Arduino Uno αλλά και των 5V η οποία και χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση.

2.2.1 MEMS

Η τεχνολογία MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)[1], είναι μια τεχνολογία η οποία επιτρέπει την υλοποίηση πλατφορμών σε μεγέθη κλίμακας χιλιοστού ακόμα και μικρομέτρου. Το πλεονέκτημά της εξαιτίας του μεγέθους επομένως και του βάρους της τελικής συσκευής και της κατανάλωσης ενέργειας, καθιστά προτιμώμενο ένα τελικό προϊόν που υλοποιεί την συγκεκριμένη τεχνολογία από τους κατασκευαστές αφού οι εφαρμογές σε καθημερινές συσκευές είναι πολλές. Επιταχυνσιόμετρα τύπου MEMS μπορούν να βρεθούν σε inkjet εκτυπωτές μέχρι και στους αερόσακους ενός αυτοκινήτου. Σε όποια περίπτωση εφαρμογής επομένως χρειαζόμαστε raw data των 3 αξόνων [2] είτε αυτά προκύπτουν από δυνάμεις επιτάχυνσης είτε από περιστροφικές δυνάμεις τότε είναι πολύ πιθανό ένα τέτοιο project να περιέχει ένα MEMS επιταχυνσιόμετρο.

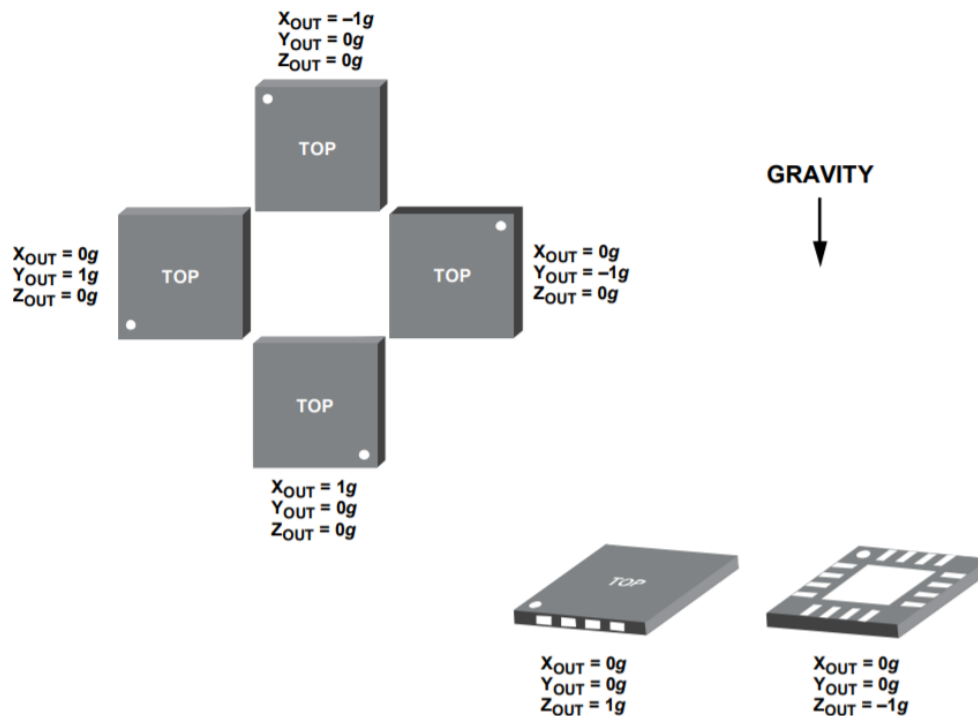
Το Σχήμα 2.4 παρουσιάζει το πως λειτουργεί στη βάση της η εν λόγω τεχνολογία. Το υλικό της αρχιτεκτονικής αποτελείται από έναν αριθμό σταθερών ηλεκτροδίων, μια κινούμενη σεισμική μάζα καθώς και κάποιους πυκνωτές που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει επιτάχυνση οι αποστάσεις d1 και d2 είναι ίσες αφού η κινούμενη σεισμική

μάζα βρίσκεται σε ισορροπία. Το αποτέλεσμα είναι η ισότητα μεταξύ των πυκνωτών. Σε περίπτωση επιτάχυνσης η σεισμική μάζα μετακινείται περισσότερο προς τα μια κατεύθυνση όπου βρίσκεται κάποιο ηλεκτρόδιο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της χωρητικότητας των πυκνωτών. Η διαφορά της χωρητικότητας των πυκνωτών ενισχύεται και παράγεται τάση ανάλογη με την επιτάχυνση του αισθητήρα. Έτσι, έχουμε την πλήρη μετατροπή από κίνηση (επιτάχυνση) σε τάση και έπειτα στην αντίστοιχη τιμή και μονάδα επιτάχυνσης της βαρύτητας επομένως είμαστε ικανοί να καταγράψουμε τις πραγματικές τιμές που μας ενδιαφέρουν από τέτοιες κινήσεις και δονήσεις.



Σχήμα 2.4: MEMS αρχιτεκτονική [2]

Αφού μελετήθηκε η λογική της αρχιτεκτονικής πίσω από το επιταχυνσιόμετρο με το οποίο ασχολείται η εργασία και κατανοήθηκε ο τρόπος με τον οποίο προκύπτουν τα αποτελέσματα από τον αισθητήρα, παρακάτω στο Σχήμα 2.5 παρατηρείται το πως αντιδράει ο αισθητήρας στον κάθε διαφορετικό πιθανό προσανατολισμό του και τι έξοδο παράγει στους άξονες αντιστοίχως. Η θέση στην οποία χρησιμοποιείται ο αισθητήρας στην προκείμενη περίπτωση είναι η οριζόντια θέση στο Σχήμα 2.5 με την ένδειξη TOP προς τα πάνω. Η θέση του αισθητήρα για την συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζεται καλύτερα παρακάτω στο κεφάλαιο πειραμάτων.



Σχήμα 2.5: Συμπεριφορά GY-61 ανάλογα με τον προσανατολισμό του [7]

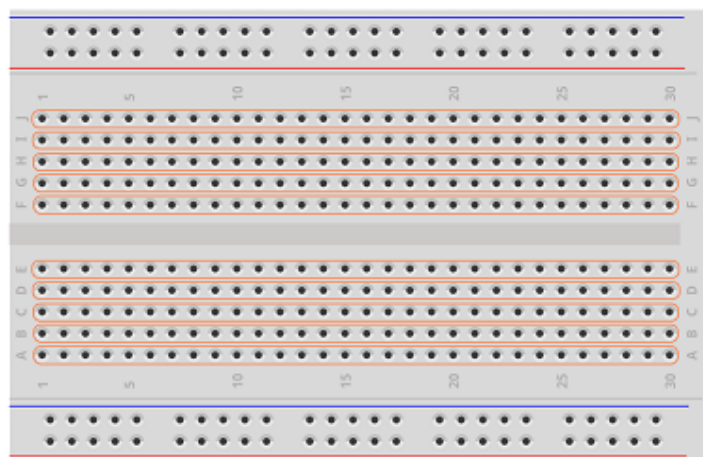
2.3 Breadboard

Ένα ακόμη μέρος του υλικού είναι το απεικονιζόμενο στο Σχήμα 2.6, Breadboard. Ο γενικός σκοπός του είναι να συνδέει διάφορους αισθητήρες, εξωτερικές επεκτάσεις αλλά και άλλα ηλεκτρονικά μέρη με την πλατφόρμα του Arduino αλλά και μεταξύ τους. Σε αυτήν την εργασία όμως χρησιμοποιείται και για την σταθεροποίηση του επιταχυνσιόμετρου έτσι ώστε να είναι πάντα σε ακριβή και οριζόντια θέση καθόλη την διάρκεια των πειραμάτων.

Το Breadboard χωρίζεται σε 2 περιοχές. Η κυρίως περιοχή είναι στην πραγματικότητα ένα πεδίο το οποίο θυμίζει schaκιέρα όπου οι θέσεις προκύπτουν από τις οριζόντιες γραμμές όπου χαρακτηρίζονται από γράμματα της αγγλικής αλφαβήτου από το γράμμα A έως το γράμμα J αλλά και κατακόρυφες οι οποίες επισημαίνονται από κάποιους αριθμούς. Η δεύτερη περιοχή βρίσκεται πάνω και κάτω από την κυρίως περιοχή και αποτελείται από 2 οριζόντιες γραμμές χωρίς καμία επισήμανση.

Η κύρια περιοχή του Breadboard είναι αρμόδια για την σύνδεση αισθητήρων και επεκτάσεων με το Arduino. Συνήθως χρησιμοποιείται όταν το σύνολο των καλωδίων για να πραγματοποιηθούν όλες οι απαραίτητες συνδέσεις είναι μεγαλύτερο από αυτές που παρέχει η πλατφόρμα του Arduino ή όταν θέλουμε να συνδέσουμε κάποιο ηλεκτρονικό εξάρτημα (π.χ. αντίσταση) του οποίου η σύνδεση είναι πολύ ευκολότερη και πρακτική με τα slots που παρέχει το Breadboard.

Η δεύτερη περιοχή υπάρχει για την τροφοδοσία αλλά και την γείωση των συσκευών που βρίσκονται στο Breadboard. Αν οι συσκευές που υπάρχουν στο Breadboard είναι πάνω από μια τότε αυτή η περιοχή διευκολύνει πολύ τις συνδέσεις καθώς στέλνει ένα μόνο συγκεντρωτικό καλώδιο για την τροφοδοσία και ένα για την γείωση για όλες τις συσκευές, στο Arduino.



Σχήμα 2.6: Απεικόνιση Breadboard μεσαίου μεγέθους [5]

Κεφάλαιο 3

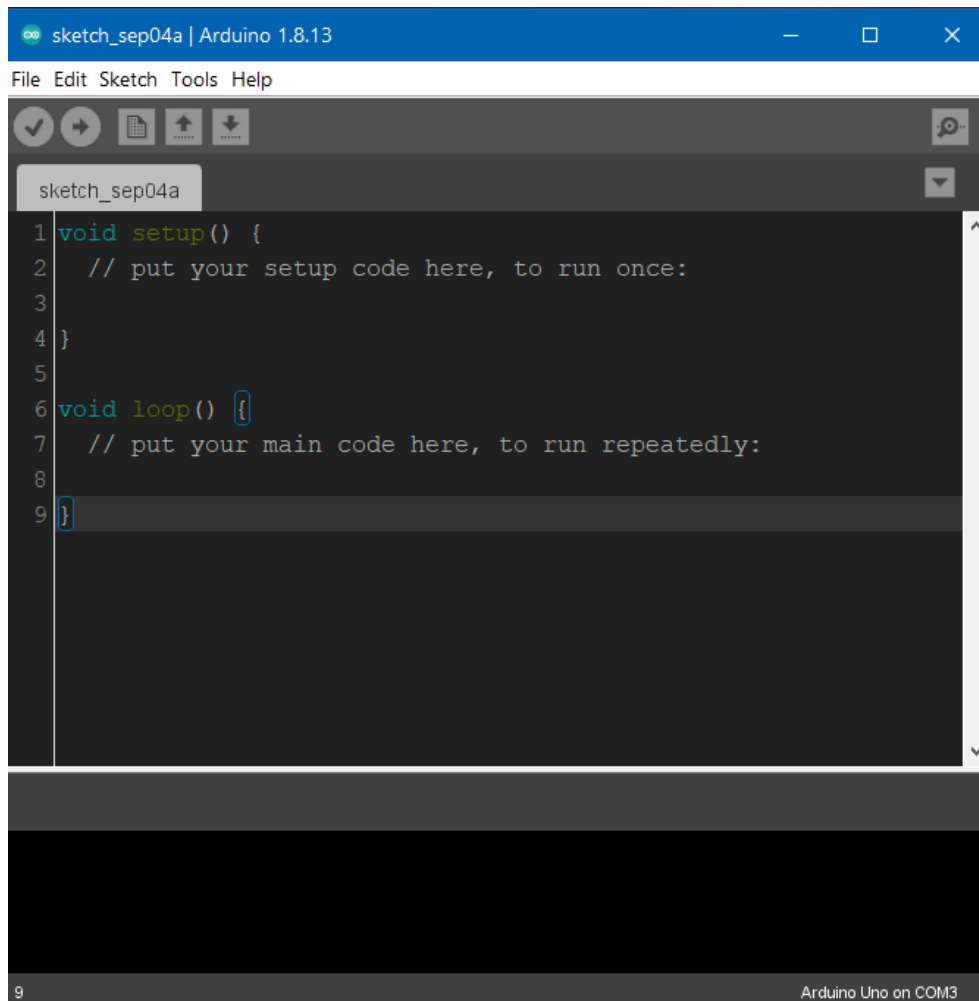
Περιγραφή του λογισμικού

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν όλα τα χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες των συσκευών υλικού αλλά και τον ρόλο που παίζουν στην εργασία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία, για ποιο λόγο επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα προγράμματα καθώς και τι χαρακτηριστικά και δυνατότητες προσφέρουν.

3.1 Arduino IDE

Το κυρίως προγραμματιστικό περιβάλλον με το οποίο προγραμματίζεται η λειτουργία του Arduino και του αισθητήρα ADXL 335 είναι το δωρεάν λογισμικό Arduino IDE που αναφέρθηκε και παραπάνω. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πιθανώς κάποιο άλλο περιβάλλον στο οποίο όμως για τις λειτουργίες του Arduino θα απαιτούνταν διάφορα extensions. Στο εν λόγω λογισμικό η διαδικασία του compile του κώδικα αλλά και του 'upload' (όπως το αναφέρει το λογισμικό), δηλαδή την εφαρμογή του κώδικα στην εκάστοτε πλακέτα Arduino, γίνεται χωρίς την προσθήκη κάποιου extension αφού από την πρώτη φορά εκτέλεσης το λογισμικό είναι έτοιμο να επικοινωνήσει με το Arduino. Αρχεί να επιλεγεί από το μενού tools το κατάλληλο board και η κατάλληλη θύρα επικοινωνίας η οποία αναφέρετε ως port.

Αφού επικοινωνήσει με το Arduino υπάρχουν κάποιες έτοιμες επιλογές για την εμφάνιση του output, δηλαδή την έξοδο της πληροφορίας από το Arduino (εάν υπάρχει). Συγκεκριμένα, στο μενού tools, η επιλογή serial monitor παρουσιάζει live απλώς τις τιμές των δεδομένων εξόδου που προκύπτουν με την διάταξη και ονομασία που έχει οριστεί από τον κώδικα. Επίσης, η επιλογή serial plotter μορφοποιεί τα δεδομένα και τα παρουσιάζει πάλι live ως διάγραμμα για κάθε μεταβλητή.



Σχήμα 3.1: Arduino IDE

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (Σχήμα 3.1) η περιοχή συγγραφής του κώδικα είναι χωρισμένη σε 2 τμήματα από προεπιλογή.

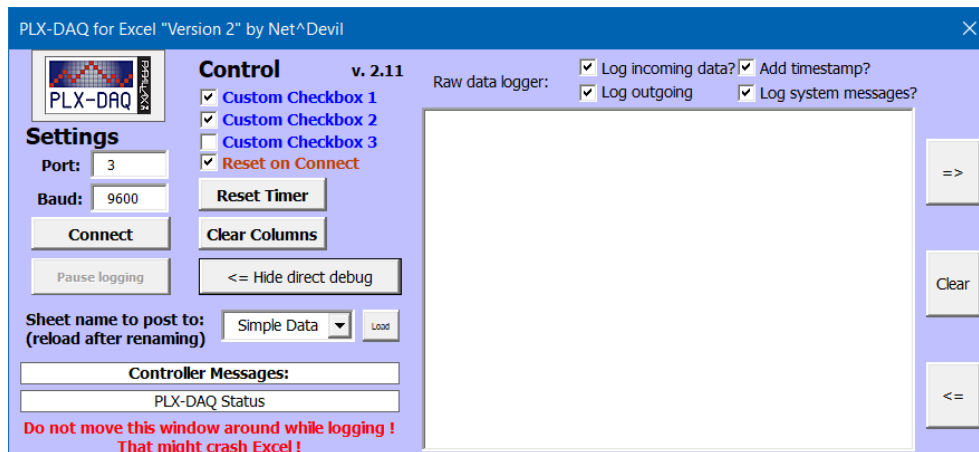
Το πρώτο τμήμα ουσιαστικά είναι μια συνάρτηση με όνομα `setup` της οποίας ο κώδικας εκτελείται μια φορά κάθε φορά που εκτελείται το πρόγραμμα. Συνήθως χρησιμοποιείται για τον ορισμό διαφόρων λειτουργιών οι οποίες δεν έχουν νόημα να αλλάζουν σε κάθε εκτέλεση. Μια συνηθισμένη αρχικοποίηση για παράδειγμα είναι η εντολή `Serial.begin(9600);` η οποία υποδεικνύει την ταχύτητα με την οποία επικοινωνεί το Arduino, ώστε να εμφανίζει αποτελέσματα στο serial monitor. Η τιμή 9600 είναι ο ρυθμός ανταλλαγής δεδομένων και μετρείται σε bits ανά δευτερόλεπτο. Στο λογισμικό αναφέρεται συνήθως ως baud rate.

Η δεύτερη περιοχή είναι η συνάρτηση `void loop`, στην οποία ουσιαστικά εκτελείται ο κώδικας που συνήθως θα μας επιστρέψει τα δεδομένα εξόδου από κάποιον αισθητήρα. Ο κώδικας που υπάρχει μέσα στην συνάρτηση εκτελείται επαναληπτικά μέχρι να διακοπεί είτε από κάποια συνθήκη είτε από τον χρήστη.

3.2 Excel/PLX-DAQ

Αφού σχολιάστηκε το πρώτο λογισμικό που λαμβάνει μέρος στην εργασία από την σκοπιά των βασικών λειτουργιών του, σειρά έχει το λογισμικό το οποίο θα λαμβάνει τα δεδομένα που προκύπτουν ως έξοδος. Σε αυτό το σημείο υπάρχουν πολλές εναλλακτικές και πάλι αφού τα δεδομένα δεν χρειάζονται κάποια ειδική μεταχείριση. Οι επιλογές που παρέχει το Arduino IDE αποκλείονται διότι είναι ικανές μόνο για την αναπαράσταση των δεδομένων και όχι για την αποθήκευσή τους. Στην περίπτωση της εργασίας τα δεδομένα είναι απλοί ακέραιοι αριθμοί σε συνάρτηση με τον χρόνο. Το "πρόβλημα" εμφανίζεται όταν θέλουμε να αποθηκεύσουμε live τις τιμές εξόδου ώστε να τις επεξεργαστούμε αργότερα. Θα πρέπει λοιπόν να είναι πλήρως συγχρονισμένα αυτά τα προγράμματα έτσι ώστε να μην χαθεί η τροποποιηθεί κάποια τιμή.

Γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται το πρόγραμμα PLX-DAQ [10] και συγκεκριμένα η έκδοση 2.11, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο σαν επέκταση του EXCEL παρά σαν αυτόνομο λογισμικό. Το εν λόγω πρόγραμμα δεν απαιτεί κάποια εγκατάσταση, απλά εκτελείται ενσωματωμένα όταν ανοίγει το αρχείο EXCEL το οποίο το περιέχει. Ως δυνατότητα έχει την άμεση λήψη δεδομένων σε έως και 26 στήλες δηλαδή 26 κανάλια επικοινωνίας. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να εμφανίζει διάφορα γραφήματα και να διαμορφώνονται live καθώς λαμβάνονται νέες τιμές. Τα δεδομένα χαρακτηρίζονται επιπλέον από την κανονική ώρα την δεδομένη χρονική στιγμή κάτι το οποίο μας διευκολύνει ιδιαίτερα στην μετέπειτα ανάλυση των δεδομένων. Για να ρυθμιστεί κατάλληλα η επέκταση απαιτείται να χρησιμοποιηθούν και να οριστούν συγκεκριμένες εντολές οι οποίες αντιστοιχίζονται με τις ρυθμίσεις στην γραφική απεικόνιση του προγράμματος. Αναλυτικότερα στο μέρος παράθεσης του κώδικα. Παρακάτω (Σχήμα 3.2) παρουσιάζεται το GUI της επέκτασης PLX-DAQ για το EXCEL.



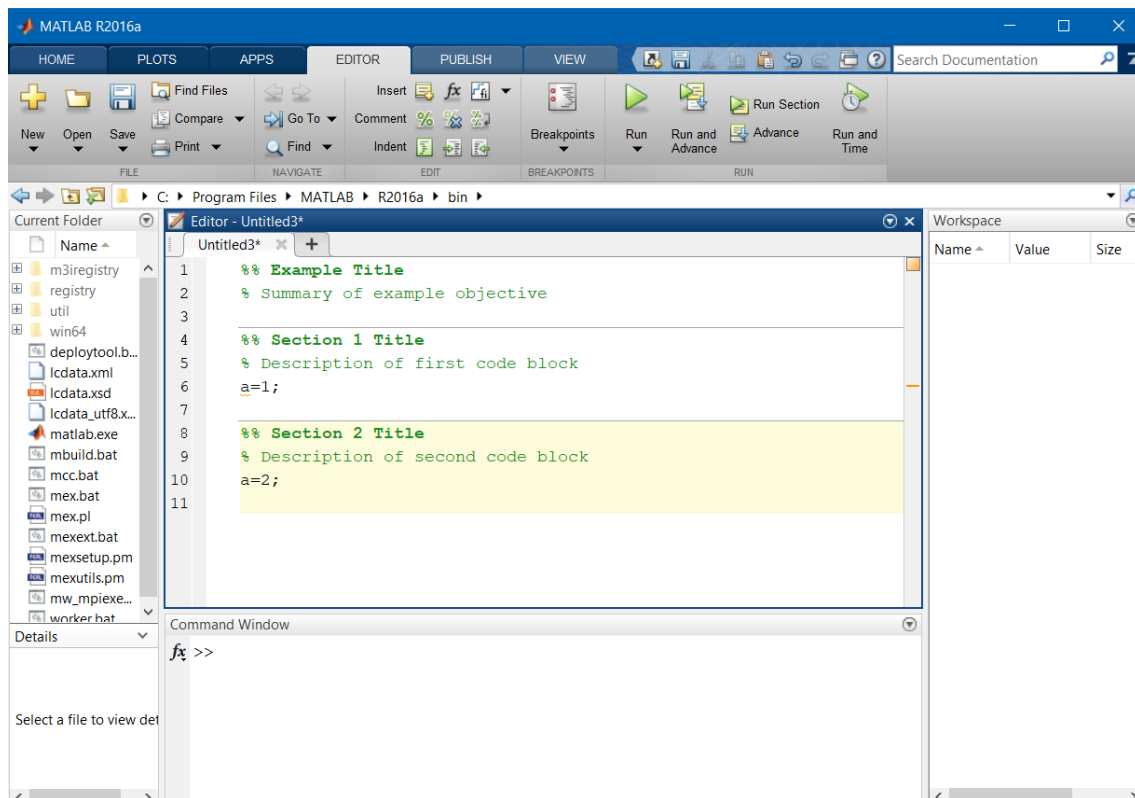
Σχήμα 3.2: PLX-DAQ v2.11

3.3 Matlab

Στην συνέχεια θα περάσουμε στο λογισμικό με το οποίο θα παράγουμε τις συχνότητες έτσι ώστε να πραγματοποιήσουμε τα πειράματα. Γι' αυτόν τον σκοπό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ακόμη και κάποιο online tone generator, ωστόσο στην προκειμένη περίπτωση, για να υπάρχει μεγαλύτερη ανεξαρτησία και ελαστικότητα στις επιλογές του generator θα χρησιμοποιήσουμε το λογισμικό Matlab και συγκεκριμένα την έκδοση R2016a.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Matlab.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, το γραφικό περιβάλλον είναι χωρισμένο σε διάφορα τμήματα. Υπάρχει ένα αναλυτικό μενού στην πάνω περιοχή για τις κλασσικές λειτουργίες σχετικά με τα αρχεία και την επεξεργασία τους, για την εισαγωγή διαφορών στοιχείων και την τροποποίηση του κώδικα, αλλά και για την δημιουργία γραφημάτων. Η μεσαία αριστερή πλευρά (Current Folder) παρουσιάζει τα αρχεία της τρέχουσας θέσης στο σύστημα αρχείων. Η κάτω αριστερά (Details), παρέχει πληροφορίες για όποιο αρχείο επιλέξει ο χρήστης. Η κεντρική περιοχή (Editor) βρίσκεται σε περίπτωση συγγραφής κάποιου προγράμματος ή συνάρτησης, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στην περίπτωση αυτή. Η ακριβώς από κάτω περιοχή (Command Window) είναι η περιοχή εντολών όπου εκτελείται μια μια κάθε εντολή. Τέλος, η δεξιά περιοχή (Workspace), εμφανίζει πληροφορίες για τις μεταβλητές που έχουν εκχωρηθεί μέχρι την προκειμένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 3.3: Matlab R2016a

Κεφάλαιο 4

Υλοποίηση κώδικα

Αφού ολοκληρώθηκε η παρουσίαση του υλικού και του λογισμικού που απαρτίζει την εργασία, σε αυτό το κεφάλαιο θα περάσουμε στο πρακτικό κομμάτι της εργασίας, στο οποίο αναλύεται ο διαθέσιμος κώδικας που εκτελείται κάθε φορά πίσω από κάθε πείραμα.

4.1 Κώδικας Arduino

Αρχικά ως πρώτο βήμα, θα πρέπει να προγραμματιστεί το Arduino και κατ' επέκταση ο αισθητήρας ADXL335. Οπότε, παρακάτω σχολιάζεται τμηματικά ο κώδικας για καλύτερη κατανόηση, στο Arduino IDE που προαναφέρθηκε.

```
#include "Arduino.h"
```

```
int xout = A0;
```

```
int yout = A1;
```

```
int zout = A2;
```

```
int RawMin = 0;
```

```
int RawMax = 1023;
```

Ο κώδικας ξεκινάει με τις κατάλληλες αρχικοποιήσεις πριν από τις 2 προκαθορισμένες συναρτήσεις. Εισάγεται η βιβλιοθήκη Arduino.h η οποία είναι από τις γενικότερες και βασικότερες βιβλιοθήκες όσον αφορά τον προγραμματισμό του Arduino. Στην συνέχεια αρχικοποιούνται οι 3 μεταβλητές που αντιστοιχούν στα 3 pins για τους 3 άξονες. Για να περιορίσουμε τις τιμές ώστε να είναι ελεγχόμενο το εύρος θέτουμε ως κάτω όριο την τιμή 0 και ως άνω όριο 1023 ανάλογα με την τάση που λαμβάνει το Arduino από την κάθε έξοδο του επιταχυνσιομέτρου. Το εύρος περιλαμβάνει αποκλειστικά ακέραιες τιμές.

```

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:

  Serial.begin(9600);

  Serial.println("CLEAR SHEET"); //clears sheet starting
  at row 1
  Serial.println("LABEL,TIME,Z"); //define columns
}

```

Ακολουθεί η συνάρτηση setup. Ορίζεται η ταχύτητα επικοινωνίας με το Arduino με την εντολή Serial.begin(9600) όπως προαναφέρθηκε. Οι επόμενες εντολές έχουν σκοπό μέσω του PLX-DAQ να διαμορφώσουν το περιβάλλον στο EXCEL για να υποδεχθεί και να μορφοποιήσει τα δεδομένα. Με την εντολή Serial.println("CLEAR SHEET") καθαρίζει το τρέχων φύλλο εργασίας από τυχόν προηγούμενα άσχετα δεδομένα. Η εντολή Serial.println ("LABEL,TIME,Z") ορίζει τις στήλες των δεδομένων. Η πρώτη (TIME), είναι η στήλη η οποία εμφανίζει την κανονική ώρα ως χρονική στιγμή για το κάθε δεδομένο.

```

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  //raw values

  xout = (170 + analogRead(A0));

  yout = (175 + analogRead(A1));

  zout = (99 + analogRead(A2));

```

Η συνάρτηση loop ξεκινάει με το διάβασμα των εξόδων και για τους 3 άξονες, παρόλο που στην επαλήθευση θα χρειαστεί μόνο ο Z. Οι τιμές αυτές είναι ακατέργαστες τιμές τάσης και συγκεκριμένα millivolts. Για να συμβαδίζουν οι τιμές εξόδου με τον προσανατολισμό του αισθητήρα, προστίθεται ένας αριθμός ως αντιστάθμισμα σε κάθε άξονα. Αφού γίνει αυτό, πλέον έχουμε τις ιδανικές αρχικές τιμές για κάθε άξονα πριν ξεκινήσει το οποιοδήποτε πείραμα.

```

//convert to milli-Gs
long xScaled=map(xout, RawMin, RawMax, -3000, 3000);
long yScaled=map(yout, RawMin, RawMax, -3000, 3000);
long zScaled=map(zout, RawMin, RawMax, -3000, 3000);

//scale to Gs

```

```
float xAccel = xScaled / 1000.0;
float yAccel = yScaled / 1000.0;
float zAccel = zScaled / 1000.0;
```

Για την μετατροπή των τιμών τάσης σε τιμές οι οποίες αντιπροσωπεύουν πραγματικά επιτάχυνση της βαρύτητας, θα πρέπει να γίνει εφαρμογή της εντολής `map(zout, RawMin, RawMax, -3000, 3000)`. Η συγκεκριμένη εντολή μεταφέρει τις τιμές από ένα εύρος σε ένα άλλο. Ουσιαστικά, από το εύρος `RawMin - RawMax`, δηλαδή από τις τιμές 0 έως 1023 που αντιπροσωπεύουν τάση, περνάμε στο νέο εύρος -3000, +3000 (milli-g) με το οποίο προσομοιώνουμε το εύρος της επιτάχυνσης της βαρύτητας του αισθητήρα το οποίο είναι $\pm 3g$. Για παράδειγμα, εάν η τιμή στο πρώτο εύρος ήταν 0, τότε στο νέο εύρος γίνεται -3000, δηλαδή -3g και ούτω κάθε εξής.

Έπειτα, υπάρχει και η μετατροπή μονάδων από (milli-g) σε g κάτι όμως που αποδείχθηκε ότι δεν είναι χρήσιμο, διότι στην περίπτωση πειραμάτων με ηχητικά κύματα οι δονήσεις είναι εξαιρετικά ασθενείς και προτιμάται η μικρότερη δυνατή μονάδα επιτάχυνσης της βαρύτητας.

```
Serial.print("DATA,TIME,");
//Serial.print(xScaled);
//Serial.print(",");
//Serial.print(yScaled);
//Serial.print(",");
Serial.println(zScaled);

delay(100);

}
```

Τέλος, στέλνονται τα δεδομένα μέσω του PLX-DAQ στο EXCEL ανάλογα με την μορφοποίηση που έχει επιλεχθεί νωρίτερα. Οι τιμές στέλνονται απλά με την εντολή `Serial.print`. Η εντολή `delay` χρησιμοποιείται έτσι ώστε να περιορίσει λίγο το πλήθος των δεδομένων όταν αυτά είναι υπερβολικά. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η τιμή 100, η οποία αναφέρεται στην παύση διάρκειας χιλιοστών του δευτερολέπτου από την επόμενη τιμή. Με την τροποποίηση αυτή τα δεδομένα περιορίζονται σε ρυθμό κατά μέσο όρο 10 τιμές ανά δευτερόλεπτο.

4.2 Κώδικας Matlab

4.2.1 Γεννήτρια συχνοτήτων

Όσον αφορά την παραγωγή των συχνοτήτων, δημιουργείται μια γεννήτρια συχνοτήτων με το λογισμικό Matlab όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί το κομμάτι του κώδικα για την δημιουργία της γεννήτριας συχνοτήτων. Η γενική ιδέα για τον σκοπό του εξής κώδικα είναι η δημιουργία μιας επαναληπτικής διαδικασίας η οποία θα παράγει διαδοχικά συχνότητες με σταθερό βήμα και χαρακτηριστικά, ενώ το εύρος τους θα είναι τελικά μεγαλύτερο από το εύρος συχνοτήτων που μπορεί να διεγείρει τον αισθητήρα ADXL335. Αυτό συμβαίνει διότι θέλουμε μέσα από τα πειράματα να προκύψει μια διαφορά στα αποτελέσματα ώστε να επαληθευτούν τα χαρακτηριστικά που παρέχει ο κατασκευαστής του αισθητήρα.

```

1   close all;
2
3   f=50;   %frequency
4
5   for i=0:+1:13
6       Amp=1;      %amplitude
7       fs=5000;    %sampling frequency
8       T=5;        %seconds
9       t=0:1/fs:T;
10      y=Amp*sin(2*pi*f*t);
11      %plot(t,y);
12      sound(y,fs);
13      pause(6);
14      f=f+50;
15  end

```

- Η εντολή close all κλείνει όποιο γράφημα είναι εμφανές ίσως από την προηγούμενη εκτέλεση του κώδικα.
- Η μεταβλητή f υποδηλώνει τις συχνότητες σε κάθε επανάληψη ξεκινώντας από την συχνότητα f=50Hz.
- Στην συνέχεια δημιουργείται μια διαδικασία 14 επαναλήψεων από την οποία προκύπτει το συνολικό εύρος συχνοτήτων από 50Hz έως 750Hz. Όπως καταλαβαίνει κανείς, μετά την συχνότητα 550Hz βγαίνουμε εκτός ορίων του αισθητήρα, όπου πρέπει να παρατηρηθεί μια διαφορά στην απόδοση του. Η κάθε επανάληψη περιέχει τα χαρακτηριστικά για την δημιουργία της κάθε συχνότητας.
- η μεταβλητή Amp υποδηλώνει το πλάτος, δηλαδή την ένταση του κύματος.

- Η μεταβλητή f_s ορίζει τον ρυθμό δειγματοληψίας του σήματος όπου είναι ίσος με 5000Hz. Ένας τέτοιος αριθμός ορίστηκε ώστε να υπάρχει απόσταση 'ασφαλείας' από την οποιαδήποτε συχνότητα που πρόκειται να παραχθεί. Ο λόγος θα κατανοηθεί καλύτερα παρακάτω με το θεώρημα Nyquist - Shannon.
- T είναι η χρονική περίοδος για την κάθε συχνότητα.
- ως t ορίζεται ο άξονας x ο οποίος έχει όρια από 0 έως T βήμα $1/f_s$.
- ως y ορίζεται η ημιτονοειδής καμπύλη που προκύπτει από την συνάρτηση 4.1.
- η εντολή `plot` και `sound` εμφανίζει το γράφημα και αναπαράγει την συχνότητα ως ηχητικό σήμα αντίστοιχα.
- η εντολή `pause` δίνει ουσιαστικά χρόνο στην κάθε συχνότητα να ακουστεί ξεχωριστά πριν προλάβει να εκτελεστεί η επόμενη. Η τιμή 6 αναφέρεται σε δευτερόλεπτα.

4.2.2 Ημιτονοειδής καμπύλη

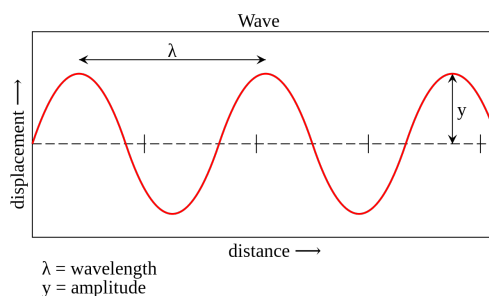
Στην ουσία μια συχνότητα δεν είναι τίποτα περισσότερο από ένα ημιτονοειδές κύμα το οποίο περιγράφεται από τον εξής μαθηματικό τύπο:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) \quad (4.1)$$

Για την παραπάνω συνάρτηση :

- A , πλάτος, η μέγιστη απόλυτη τιμή της συνάρτησης, πρακτικά η ένταση του σήματος
- f , η συχνότητα, ο αριθμός των ταλαντώσεων ανά μονάδα χρόνου
- ϕ , η φάση, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι 0

Η γραφική απεικόνιση της ημιτονοειδούς συνάρτησης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Ημιτονοειδής καμπύλη [14]

4.2.3 Θεώρημα Nyquist - Shannon

Όταν υπάρχει η επιθυμία για την παραγωγή από μια ψηφιακή πηγή ή την αποθήκευση ενός θεωρητικά συνεχούς σήματος ως προς τον χρόνο τότε θα πρέπει, καθώς την πληροφορία ενός αναλογικού σήματος είναι αδύνατον να την διαχειριστούμε ως έχει, να πάρουμε διακριτές τιμές ίσων αποστάσεων από το αρχικό σήμα ώστε να καταστεί διαχειρίσιμη η εν λόγω πληροφορία. Αυτές οι τιμές ονομάζονται δείγματα [8].

Μπορεί λοιπόν να αντιληφθεί κανείς ότι προκύπτει ένα δίλημμα στην επιλογή του αριθμού αυτών των δειγμάτων. Το ιδανικό θα ήταν να προσδιοριστούν όσο περισσότερα δείγματα, έτσι ώστε να υπάρχει μια πολύ υψηλή ακρίβεια προσομοίωσης του αναλογικού σήματος. Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να οριστεί αυθαίρετα, καθώς θα πρέπει να υπολογιστεί και το μέγεθος της πληροφορίας που θα προκύψει, αφού όσο περισσότερα δείγματα θέτουμε τόσο μεγαλώνει η πληροφορία του σήματος.

Περιορίζεται γι' αυτόν τον λόγο η επιλογή δειγμάτων αναλόγως την κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, όταν κάποιο πείραμα ασχολείται με υψίσυχνες συχνότητες όπως είναι η μουσική, τότε η ανάγκη για μεγάλο ρυθμό δειγματοληψίας αυξάνεται σε σχέση με κάποιο πείραμα το οποίο ασχολείται με χαμηλές συχνότητες.

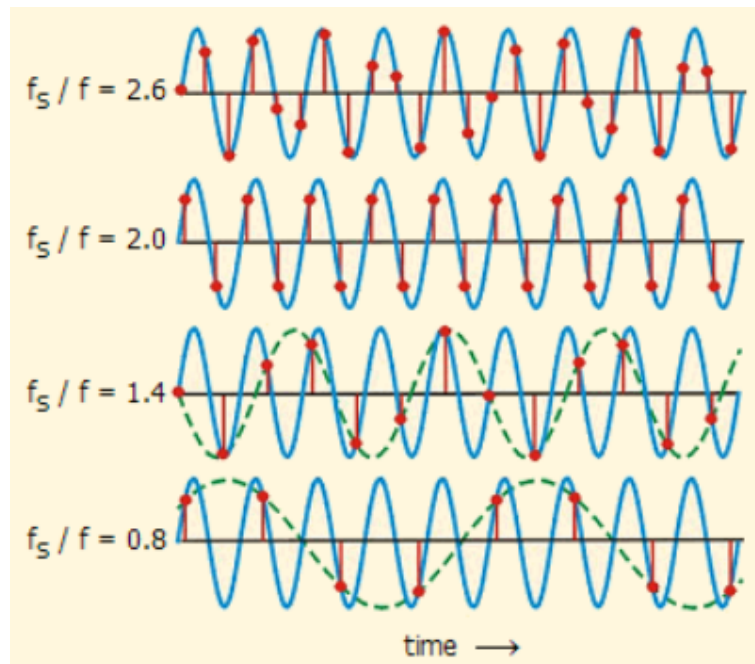
Επομένως το εξής θεώρημα δίνει απάντηση στο ερώτημα ποιο είναι το ελάχιστο αποδεκτό πλήθος δειγμάτων που μπορεί να τεθεί ανάλογα το κάθε σήμα με την εξής πρόταση :

“Η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας ενός σήματος, η οποία δεν εισάγει αλλοίωση στην υπάρχουσα σε αυτό πληροφορία, είναι διπλάσια της συχνότητας της πλέον υψίσυχνης συνιστώσας του.”

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, για παράδειγμα, εάν έχουμε ένα ρυθμό δειγματοληψίας f_s , ως κρίσιμη συχνότητα ή συχνότητα Nyquist ορίζεται η συχνότητα $f_s/2$.

Όταν μια συχνότητα ξεπερνάει την κρίσιμη συχνότητα τότε τα δείγματα δεν αρκούν για να την προσδιορίσουν και καθώς χάνεται πληροφορία συμβαίνει ένα φαινόμενο το οποίο στην αγγλική βιβλιογραφία αναφέρεται ως aliasing, ενώ στην ελληνική ως ψευδωνυμία, αναδίπλωση ή απλά αλλοίωση. Κατά το φαινόμενο αυτό τα ελάχιστα δείγματα προσδιορίζουν την πραγματική συχνότητα ως μια άλλη ψευδή, μικρότερη συχνότητα. Αυτό μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα στο παρακάτω παράδειγμα.

Έστω μια σταθερή συχνότητα f στην οποία κάθε φορά παίρνουμε διαφορετικό ρυθμό δειγματοληψίας f_s . Συγκεκριμένα εφαρμόζονται ως f_s οι τιμές 2.6, 2.0, 1.4 και 0.8 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα Aliasing [8]

Όπως παρατηρείται από το σχήμα 4.2:

- Στα πρώτα 2 παραδείγματα για $f_s=2.6$, 2.0 , η συχνότητα είναι μικρότερη από την κρίσιμη συχνότητα, δηλαδή από $f_n = f_s/2 = 1.3$ και 1 αντίστοιχα, οπότε δεν παρατηρείται κάποια αλλοίωση της αρχικής συχνότητας. Παρόλα αυτά είναι εμφανές ότι στην δεύτερη περίπτωση έχουμε μικρότερη ακρίβεια της συχνότητας καθώς έχουμε λιγότερα δείγματα.
- Στα 2 τελευταία παραδείγματα η συχνότητα ξεπερνάει την κρίσιμη συχνότητα, δηλαδή την $f_n = f_s/2 = 0.7$ και 0.4 αντίστοιχα δημιουργώντας μια νέα ψευδή συχνότητα η οποία απεικονίζεται με πράσινη διακεκομμένη γραμμή. Επίσης, διακρίνεται ότι στο τελευταίο παράδειγμα η συχνότητα που σχηματίζεται είναι μικρότερη από την συχνότητα του τρίτου παραδείγματος καθώς έχει ακόμα λιγότερα δείγματα.

Για να υπολογίσουμε την ψευδή συχνότητα σε κάθε περίπτωση δίνεται ο εξής τύπος [8] :

$$f' = |f - kf_s| \quad [8] \quad (4.2)$$

όπου :

$k = 1, 2, \dots$,

f' , η ψευδής συχνότητα,

f , η αρχική συχνότητα και

f_s , ο ρυθμός δειγματοληψίας

Π.χ. για την τελευταία περίπτωση, $f' = |f-1*0.8f| = 0.2f$

Όσον αφορά την περίπτωση της εργασίας, ο ρυθμός δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται είναι ίσος με 5000Hz ή 5kHz. Αν μελετήσουμε την κρίσιμη συχνότητα είναι η εξής, $f_n = f_s/2 = 5000/2 = 2000\text{Hz}$. Αυτό σημαίνει ότι μέχρι την συχνότητα 2000Hz δεν έχουμε κανένα πρόβλημα αλλοίωσης και αυτό ισχύει διότι η μεγαλύτερη συχνότητα που ενδέχεται να παραχθεί από τα πειράματα είναι 750Hz.

4.2.4 Διαχείριση δεδομένων

Έχοντας αναλύσει το τμήμα λογισμικού όπου παράγονται τα δεδομένα, δηλαδή την γεννήτρια συχνοτήτων αλλά και την κατάλληλη ρύθμιση του Arduino και του επιταχυνσιόμετρου ώστε να γίνεται σωστά η έξοδος των δεδομένων, το λογισμικό Matlab χρησιμοποιείται και για την εξαγωγή και διαχείριση των δεδομένων από το EXCEL ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα που επιθυμούμε.

Οπότε σε αυτό το σημείο θα εξηγηθεί ο κώδικας του Matlab ο οποίος έχει σκοπό τα όσα προαναφέρθηκαν.

```
close all;
```

```
y=[];
```

```
y(1) = std(Z1,1);
```

```
y(2) = std(Z2,1);
```

```
y(3) = std(Z3,1);
```

```
y(4) = std(Z4,1);
```

```
y(5) = std(Z5,1);
```

```
y(6) = std(Z6,1);
```

```
y(7) = std(Z7,1);
```

```
y(8) = std(Z8,1);
```

```
y(9) = std(Z9,1);
```

```
y(10) = std(Z10,1);
```

```
y(11) = std(Z11,1);
```

```
y(12) = std(Z12,1);
```

```
y(13) = std(Z13,1);
```

```
y(14) = std(Z14,1);
```

```
y(15) = std(Z15,1);
```

```
b=[50 100 150 200 250 300 350 400  
450 500 550 600 650 700 750];
```

```

fh = figure;
ah = axes(fh);
hold(ah,'on');
plot(ah,b,y,'r-','linewidth',1)
grid on
grid minor
xlabel('Frequency_in_Hz');
ylabel('Standard_Deviation');
title('Adxl_335_frequency_response');

```

Πριν ξεκινήσει η εκτέλεση του παραπάνω κώδικα, εισάγονται τα δεδομένα του EXCEL ως διαχωρισμένες 15 μεταβλητές οι οποίες αντιστοιχούν στις 15 συχνότητες. Υπάρχει η ανάγκη για τον διαχωρισμό τους διότι στο EXCEL, τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα σε μια στήλη καθώς το λογισμικό δεν καταλαβαίνει πότε η μια συχνότητα διαδέχεται την άλλη. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω του gui του Matlab.

Αφού έχουμε αποκτήσει λοιπόν τα δεδομένα για την κάθε συχνότητα τα οποία είναι κατά μέσο όρο 50 τιμές ανά μεταβλητή, θα περάσουμε στο πως θέλουμε να τα απεικονίσουμε.

Για να καταλάβουμε σε ποιο εύρος συχνοτήτων ο αισθητήρας διεγείρεται περισσότερο, θα πρέπει να βρεθεί ουσιαστικά για κάθε συχνότητα, σε τι βαθμό οι τιμές απομακρύνονται από την θέση ισορροπίας του αισθητήρα, δηλαδή την μέση τιμή των αποτελεσμάτων της συχνότητας. Αυτή η πρόταση περιγράφεται από ένα συγκεκριμένο μέτρο κύμανσης, την διασπορά ή αλλιώς την διακύμανση (variance) [11].

Αναλυτικότερα, αν $x, x_2, \dots, x_N$ πληθυσμός μεγέθους N γνωστού μέσου μ , η διακύμανση σ^2 των x_i ορίζεται ως ο αριθμητικός μέσος των τετραγώνων των αποκλίσεων των τιμών της μεταβλητής από τον αριθμητικό τους μέσο. Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω τύπος:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N} \quad (4.3)$$

όπου :

- $x_1, x_2, \dots, x_N$, ο πληθυσμός
- μ , η μέση τιμή
- N , το μέγεθος του πληθυσμού

Στην πραγματικότητα όμως η αλήθεια είναι ότι η διακύμανση απλώς χρειάζεται έτσι ώστε να υπολογιστεί το επόμενο μέτρο κύμανσης, το οποίο ονομάζεται τυπική απόκλιση (standard deviation) και είναι ένας άλλος τρόπος για τον υπολογισμό της συνολικής διασποράς των τιμών των δεδομένων γύρω από τον αριθμητικό τους μέσο. Αυτό το μέτρο πρακτικά θα δείξει την σχέση μεταξύ των συχνοτήτων για την διαφορά στην τυπική απόκλισή τους.

Από αυτόν τον ορισμό προκύπτουν 2 κατηγορίες διακύμανσης και όπως υπονοείται τυπικής απόκλισης, οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα την περίπτωση.

Η πρώτη κατηγορία είναι η διακύμανση του πληθυσμού (population variance) σ^2 , της οποίας ο τύπος είναι ο τύπος 4.3. Από αυτόν τον τύπο εκφράζεται στην συνέχεια η τυπική απόκλιση του πληθυσμού (population standard deviation) η οποία συμβολίζεται με σ . Η τυπική απόκλιση του πληθυσμού δεν είναι άλλη από την θετική τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης του πληθυσμού.

Για την τυπική απόκλιση πληθυσμού :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (4.4)$$

Στην περίπτωση όμως που αντί για πληθυσμό εξετάζουμε ένα συγκεκριμένο δείγμα από ένα μεγαλύτερο σύνολο, τότε η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στην δεύτερη κατηγορία στην οποία χρησιμοποιείται η δειγματική διακύμανση (sample variance) η οποία συμβολίζεται με s^2 και δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (4.5)$$

Παρατηρείται λοιπόν ότι η μόνη διαφορά αυτού του τύπου σε σχέση με τον τύπο 4.4 είναι ο παρονομαστής $n - 1$. Ο λόγος ουσιαστικά είναι ότι δίνει καλύτερη εκτίμηση για τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν.

Έτσι, από την δειγματική διακύμανση προκύπτει η τυπική απόκλιση δείγματος (sample standard deviation), η οποία συμβολίζεται με s και δίνεται από τον εξής τύπο:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.6)$$

Στην προκειμένη περίπτωση επειδή λαμβάνονται όλες οι τιμές που παράγονται από τα πειράματα και δεν ξεχωρίζεται κάποιο συγκεκριμένο δείγμα, η τυπική απόκλιση πληθυσμού είναι το ιδανικό μέτρο κύμανσης για να αναδειχθεί η διαφορά στις συχνότητες που προαναφέρθηκε.

Οπότε αφού ξεκαθαρίστηκε το ζήτημα επιλογής μέτρου κύμανσης, συνεχίζεται η επεξήγηση του κώδικα του Matlab από το σημείο όπου δημιουργούνται οι 15 μεταβλητές από τα δεδομένα των 15 συχνοτήτων.

Στην συνέχεια, εφαρμόζουμε για κάθε μεταβλητή την τυπική απόκλιση πληθυσμού, όπου στο Matlab ορίζεται πολύ εύκολα από την συνάρτηση `std()` της οποίας το όνομα όπως είναι προφανές προκύπτει από το standard deviation. Η συνάρτηση καλείται με τον εξής τρόπο $S = \text{std}(A,w)$. Η μεταβλητή A ορίζει τα δεδομένα που εισάγονται. Για να λειτουργήσει η συνάρτηση ως τυπική απόκλιση πληθυσμού η μεταβλητή w πρέπει να ίση με 1. Αν δεν οριστεί η μεταβλητή w ή αν είναι ίση με 0 τότε η συνάρτηση λειτουργεί ως τυπική απόκλιση δείγματος. Στην προκειμένη περίπτωση θέτουμε $w = 1$.

Οι τυπικές αποκλίσεις τοποθετούνται σε έναν μονοδιάστατο πίνακα 15 θέσεων. Δημιουργείται έπειτα ένας νέος πίνακας ίσου μεγέθους στον οποίο μπαίνουν διαδοχικά και οι 15 συχνότητες. Η λογική είναι η κάθε τιμή των τυπικών αποκλίσεων να αντιστοιχιστεί με την κάθε συχνότητα. Τελειώνοντας με τα δεδομένα σειρά έχει το τελευταίο βήμα το οποίο είναι η δημιουργία του διαγράμματος που δείχνει την διαφορά των τυπικών αποκλίσεων και κατ' επέκταση την απόκριση συχνοτήτων του αισθητήρα.

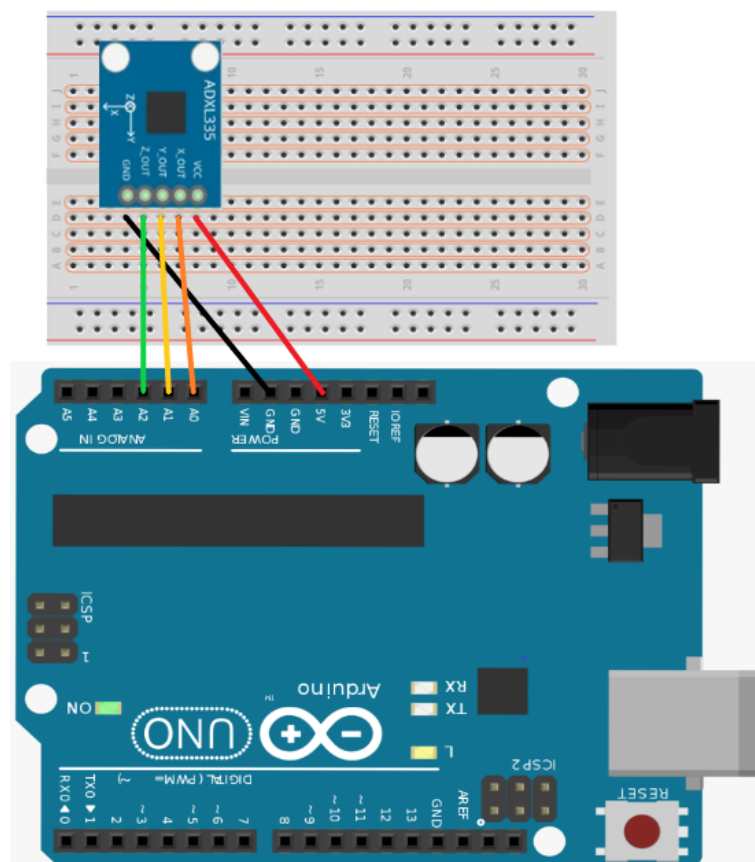
Δημιουργείται λοιπόν ένα διάγραμμα κατά το τέλος του προγράμματος, του οποίου ο άξονας x αποτελείται από τις συχνότητες, ενώ ο άξονας y από τις τυπικές αποκλίσεις.

Κεφάλαιο 5

Προετοιμασία - Πειράματα

Αφού ολοκληρώθηκε και το μέρος της επεξήγησης του λογισμικού αλλά και του υλικού που χρησιμοποιείται στην εργασία, σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί ο τρόπος που είναι στημένο το υλικό ώστε να περάσουμε στο τελικό επίπεδο των πειραμάτων.

Αρχικά, ας ξεκινήσουμε από την συνδεσμολογία του Arduino Uno με το ADXL335. Έχουν αναλυθεί όλα τα εμπλεκόμενα μέρη του σχεδιαγράμματος οπότε είναι το κατάλληλο σημείο της εργασίας για να παρουσιαστεί η συνδεσμολογία προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως.



Σχήμα 5.1: Συνδεσμολογία Arduino Uno - ADXL335

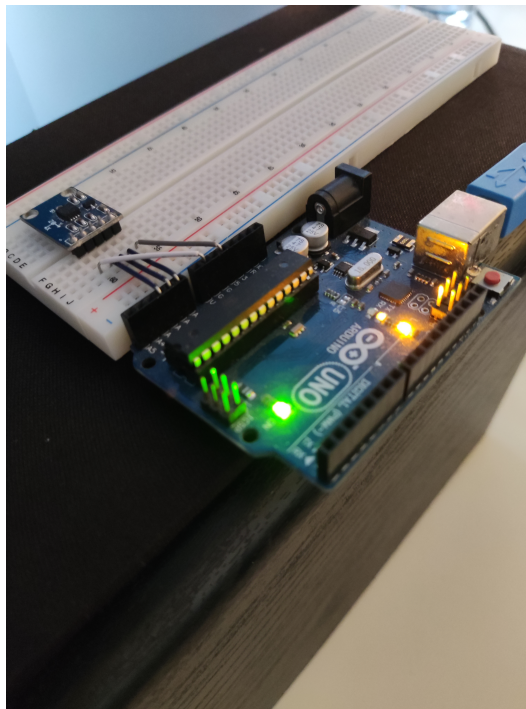
Η συνδεσμολογία αποτελείται από τα εξής στοιχεία :

- Arduino Uno
- ADXL335
- Breadboard μεγάλου μεγέθους
- καλώδια τύπου jumper wires
- usb type b

Παρατηρείται λοιπόν από το σχήμα 4.3 ότι οι συνδέσεις αφορούν τους 3 άξονες, την τροφοδοσία και την γείωση του επιταχυνσιομέτρου. Συγκεκριμένα, για την μεταφορά των δεδομένων από τους 3 άξονες X, Y και Z, είναι τα καλώδια με πορτοκαλί, κίτρινο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα. Οι αναλογικές θύρες στις οποίες αντιστοιχούν οι 3 άξονες είναι: η A0 για τον άξονα X, η A1 για τον άξονα Y και η A2, την οποία και θα χρησιμοποιήσουμε, για τον άξονα Z. Έτσι, εξηγείται και εικονικά γιατί επιλέχθηκαν αυτές οι θύρες προηγουμένως στον κώδικα του Arduino IDE.

Η τροφοδοσία απεικονίζεται με το κόκκινο καλώδιο και το τοποθετείται στην υποδοχή των 5V. Η γείωση απεικονίζεται με μαύρο καλώδιο και τοποθετείται στην υποδοχή GND.

Οπότε έπειτα από την γραφική απεικόνιση σειρά έχει η πραγματική φωτογραφία του πειράματος ώστε να γίνει αντιληπτό το πως είναι στημένο το υλικό στην πράξη.



Σχήμα 5.2: Φωτογραφία πειράματος

Όπως φαίνεται στην φωτογραφία (Σχήμα 5.2), το σύστημα όπως ακριβώς παρουσιάζεται και στο Σχήμα 5.1 τοποθετείται ακριβώς πάνω στο ηχείο το οποίο με την σειρά του τοποθετείται οριζοντίως σε ευθύγραμμη επιφάνεια. Η επιφάνεια που λειτουργεί ως βάση για το ηχείο, το επάνω μέρος του ηχείου αλλά και το επίπεδο του breadboard έχουν μετρηθεί με αλφάδι πριν από κάθε πείραμα ώστε να εξασφαλιστεί ότι το κάθε τμήμα είναι τελείως οριζόντιο.

Στο επάνω μέρος του ηχείου υπάρχει μια προστατευτική σίτα για την αποφυγή της οποιασδήποτε ζημιάς στο ηχείο. Η σίτα παράλληλα βοηθάει στην ισορροπία του αισθητήρα στον κατακόρυφο (Z) άξονα, αφού επιτρέπει την κίνηση προς τα πάνω αλλά και προς τα κάτω.

Η διάταξη αυτή του συστήματος αλλά και του ηχείου έχει προκύψει από αρκετές διαφορετικές δοκιμές. Παρατηρήθηκε μέσα από πειράματα ότι στην περίπτωση που το σύστημα ήταν τοποθετημένο μπροστά από το κατακόρυφα τοποθετημένο ηχείο, τα αποτελέσματα ήταν πολύ δύσκολο να γίνουν αντιληπτά καθώς και να αναλυθούν αργότερα. Αυτό συνέβαινε διότι το σύστημα δεν στερεωνόταν σε ελαστική βάση και εξαιτίας του γεγονότος ότι η μεγαλύτερη επιφάνεια του ηχείου έστελνε ηχητικά κύματα σε περιοχή όπου δεν επηρέαζε τον αισθητήρα λόγω της διάταξης αυτής.

Ένας παράγοντας επίσης ο οποίος παίζει καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα είναι η ένταση των συχνοτήτων των πειραμάτων. Τα πρώτα πειράματα ξεκίνησαν με ενδεικτική τιμή έντασης 50dB, όμως και πάλι οι τιμές των αποτελεσμάτων δεν ήταν ιδανικές ακόμη και στην κλίμακα των milli-g που λειτουργούν οι άξονες. Η τελική τιμή της έντασης στην οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας είναι 80dB, ώστε να είναι αρκετά ευδιάκριτα. Από την τιμή 80dB και πάνω τα πειράματα γίνονται ενοχλητικά για την ακοή και είναι αναγκαία η χρήση προστατευτικών ακουστικών.

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα

Συνθέτοντας όλες τις πληροφορίες που προηγήθηκαν εκτελούνται τα εν λόγω πειράματα.

Το τελευταίο μέρος της εργασίας αποτελείται αναμενόμενα από τα αποτελέσματα της εργασίας που παράχθηκαν από τα πειράματα και σαφώς από την επεξήγηση και ανάλυσή τους. Τελικά, γίνεται και αναφορά σε βελτιώσεις/επεκτάσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν.

6.1 Απόκριση συχνοτήτων ηχείου

Προτού σχολιαστεί το βασικότερο διάγραμμα του κεφαλαίου, θα πρέπει να γίνει ένας σχολιασμός της απόκρισης συχνοτήτων του ηχείου που χρησιμοποιείται στα πειράματα, το οποίο συνδέεται με την απόκριση συχνοτήτων του αισθητήρα ADXL335.

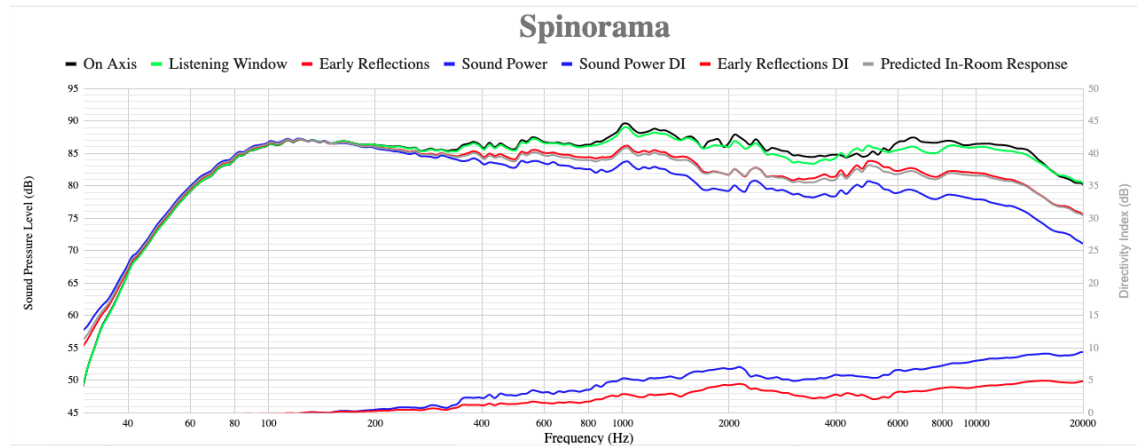
Όπως αναφέρθηκε και παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το ηχείο έχει άμεση σχέση με το υπόλοιπο σύστημα του πειράματος, εφόσον από αυτό εκπέμπονται τα ηχητικά κύματα της γεννήτριας συχνοτήτων. Γι' αυτόν τον λόγο, οι ιδιαιτερότητες που έχει το ηχείο εκπέμποντας στο συγκεκριμένο εύρος 0-750Hz, θα επηρεάσουν σαφώς και τα τελικά αποτελέσματα. Κάποια φαινόμενα που ενδεχομένως να παρατηρούνται σε διάφορα μοντέλα είναι η πιθανώς μέτρια απόδοσή τους σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων ενώ σε ένα άλλο η απόδοση πιθανώς να είναι καλή.

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει κυρίως διότι υπάρχουν κατασκευαστικές δυσκολίες καθώς είναι πρακτικά αδύνατο να κατασκευαστεί ένα flat response ηχείο. Με τον όρο flat response αναφερόμαστε στην υποθετική ίση απόδοση καθ' όλο το εύρος συχνοτήτων που μπορεί να παράγει το ηχείο. Το χαρακτηριστικό flat response που υπάρχει στην αγορά ηχείων και ακουστικών είναι η πιο κοντινή προσέγγιση σε αυτή τη λογική όμως με κάποιους περιορισμούς.

Το χαρακτηριστικό αναφέρεται σε συγκεκριμένο τμήμα από το γενικό εύρος συχνοτήτων και επιπλέον συνήθως εισάγεται μια τιμή η οποία προσδιορίζει το περιθώριο σφάλματος από την ιδανική απόκριση συχνοτήτων. Έτσι για παράδειγμα αν το περιθώριο σφάλματος ορίζεται από την τιμή $\pm 5\text{dB}$, τότε όλες οι εντάσεις των συχνοτήτων θα έχουν ως όριο μια απόκλιση της τάξεως των $\pm 5\text{dB}$.

Το συγκεκριμένο ηχείο που χρησιμοποιείται στην εργασία είναι ένα sony ss cs5. Στην πραγματικότητα υπάρχει και ένα δεύτερο ίδιο ηχείο το οποίο είναι σε λειτουργία σίγασης για να αποφευχθεί η σύγχυση των ηχητικών κυμάτων μεταξύ των ηχείων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η απόκριση συχνοτήτων του εν λόγω ηχείου σε μορφή spinorama (που εξηγείται στη συνέχεια), σε διαφορετικές περιπτώσεις.



Σχήμα 6.1: Απόκριση συχνοτήτων ηχείου Sony ss cs5 [12]

Γενικότερα, ένα Spinorama[12] αποτελείται από 70 μετρήσεις σε ειδικό περιβάλλον, το οποίο είναι ειδικά κατασκευασμένο ώστε να απορροφά όλες τις ηχητικές αντανακλάσεις και να αποκλείσει τυχόν εξωτερικό θόρυβο.

Οι μετρήσεις γίνονται σε απόσταση 2 μέτρων από την συσκευή που εξετάζεται, ενώ εφαρμόζονται διαδοχικές αυξήσεις 10° στον οριζόντιο και κάθετο άξονα. Το frequency resolution είναι ίσο με 2Hz. Frequency resolution ονομάζεται γενικά ο βαθμός ανάλυσης του διαγράμματος. Σχετίζεται δηλαδή με την διαφορά των συχνοτήτων μεταξύ των σημείων δεδομένων του διαγράμματος.

Τα παραγόμενα δεδομένα εμφανίζουν τις παρακάτω καμπύλες στο διάγραμμα:

- on-axis : Η απόκριση συχνοτήτων ακριβώς μπροστά από το ηχείο (κατεύθυνση που είναι προσανατολισμένο το ηχείο).
- listening-window : Η μέση απόκριση συχνοτήτων από γωνίες εύρους $\pm 30^\circ$ οριζόντια και $\pm 10^\circ$ κάθετα. Προσομοιώνεται ιδεατό παράθυρο ακρόασης από κοινό.
- early reflections : Η μέση απόκριση συχνοτήτων από γωνίες υπολογισμένες ώστε να επηρεάσουν οι πρώτες αντανακλάσεις σε κανονικό συμβατικό δωμάτιο.
- sound power : Η μέση απόκριση και των 70 αποκρίσεων συχνοτήτων από την ενέργεια που παράγει το ηχείο από κάθε πιθανή γωνία.

- sound power di : Η διαφορά μεταξύ της καμπύλης listening window και sound power.
- early reflections di : Η διαφορά μεταξύ της καμπύλης listening window και early reflections.
- predicted in-room response : Υπολογίζει πως θα ανταποκρινόταν το ηχείο σε συνθήκες κανονικού δωματίου συνδυάζοντας δεδομένα από όλες τις προηγούμενες καμπύλες.

Παρατηρείται λοιπόν ότι στο Σχήμα 6.1 υπάρχουν αρκετές καμπύλες, όλες πάνω στους ίδιους άξονες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν διαφορετικά χαρακτηριστικά η κάθε μια. Ο άξονας x είναι ο άξονας που περιέχει τις συχνότητες, ενώ ο άξονας y χαρακτηρίζει την ένταση (dB). Στην περίπτωση της εργασίας όπου ο αισθητήρας τοποθετείται ακριβώς μπροστά από το ηχείο μας ενδιαφέρει κυρίως η καμπύλη on-axis.

Εξετάζοντας επομένως την πορεία της μαύρης καμπύλης στο Spinorama, είναι διακριτή μια χαμηλή απόδοση στις χαμηλές συχνότητες, ενώ η καμπύλη ισορροπεί από την συχνότητα 100Hz και έπειτα. Αφού φτάσει η καμπύλη στην συχνότητα 100Hz, όσο ανεβαίνουμε στις συχνότητες παρατηρείται μια σταθερή σχετικά απόδοση κοντά στα 85dB μέχρι την συχνότητα 750Hz που μας ενδιαφέρει.

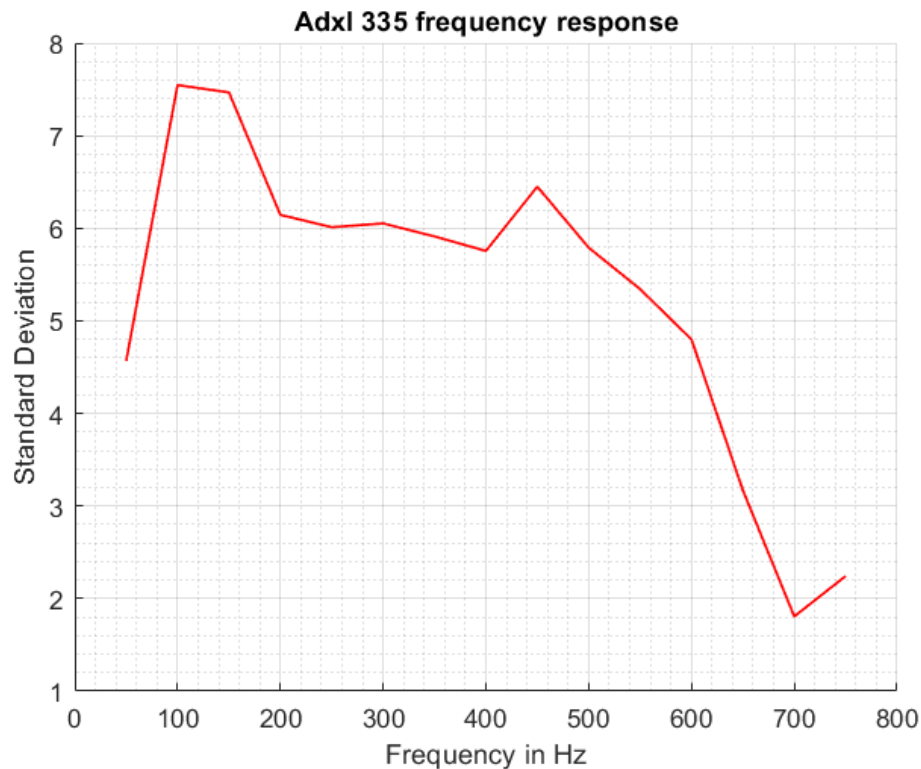
Αυτή η χαμηλή απόδοση του ηχείου μέχρι την συχνότητα 100Hz είναι κάτι που πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπ' όψιν κατά την ανάλυση των τελικών αποτελεσμάτων του επιταχυνσιομέτρου.

6.2 Απόκριση συχνοτήτων αισθητήρα ADXL335

Φτάνοντας τελικά στο κυρίως αποτέλεσμα της εργασίας, παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα το οποίο δείχνει την σχέση τυπικών αποκλίσεων και συχνοτήτων.

Μια ανακεφαλαίωση για το διάγραμμα που ακολουθεί. Όπως και το προηγούμενο (Σχήμα 6.1) που παρουσιάζει απόκριση συχνοτήτων έτσι και το επόμενο, χρησιμοποιεί ως άξονα x τον άξονα συχνοτήτων. Όσον αναφορά τον y άξονα όμως υπάρχει μια διαφοροποίηση. Χρησιμοποιούνται οι τυπικές αποκλίσεις οι οποίες προέκυψαν από 55 τιμές για κάθε συχνότητα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ώστε να αναδειχθεί η απόδοση του αισθητήρα σε κάθε συχνότητα.

Το διάγραμμα προκύπτει από τον κώδικα Matlab που σχολιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όλα τα δεδομένα που εμπλέκονται σε αυτό, παρέχονται στο παράρτημα Α.



Σχήμα 6.2: Απόκριση συχνοτήτων ADXL335 αναφορικά με την τυπική απόκλιση

Αναλύοντας τμηματικά το παραπάνω διάγραμμα :

- Από την αρχική συχνότητα 50Hz μέχρι την συχνότητα 100Hz και από την συχνότητα 550Hz μέχρι την 750Hz , οι τυπικές αποκλίσεις σε σχέση με το υπόλοιπο διάγραμμα είναι οι μικρότερες. Αυτό ερμηνεύεται ως τμήματα στα οποία οι τιμές δεν απέχουν "αρκετά" από την μέση τιμή. Με αυτό εννοούμε ότι στα σημεία αυτά ο αισθητήρας δεν δονήθηκε τόσο σε σχέση με άλλα σημεία της καμπύλης.
 - Την μείωση της απόδοσης του σημείου 50Hz θα μπορούσαμε να την δικαιολογήσουμε με την απόκριση συχνοτήτων του ηχείου στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων όπου εμφανίζει χαμηλή απόδοση.
 - Η μείωση μετά την συχνότητα 550Hz είναι κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς επαληθεύει τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή του επιταχυνσιόμετρου.
- Κατά την υπόλοιπη περιοχή της καμπύλης, τα δεδομένα είναι σχετικά σταθερά κοντά στην τιμή 6 της τυπικής απόκλισης, εκτός από τις τιμές 100Hz και 150Hz όπου παρουσιάζεται μια κορυφή (peak). Μια πιθανή εξήγηση για την κορυφή αυτή, είναι η σχέση με την σχετική κορυφή που εμφανίζει η καμπύλη απόκρισης συχνοτήτων του ηχείου στο ίδιο εύρος.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα από το διάγραμμα, ότι τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα επαληθεύονται στον μεγαλύτερο βαθμό, ενώ στα τμήματα στα οποία παρατηρείται μια απόκλιση εξηγείται με τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

6.3 Πιθανότητα ανακρίβειας αποτελεσμάτων

Για να φτάσουμε σε αυτό σημείο, δηλαδή να βγει ένα διάγραμμα που να μπορεί να επαληθεύει ως ένα βαθμό τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή του αισθητήρα και να μπορούν να εξηγηθούν τα χαρακτηριστικά που εμφανίζει, δοκιμάστηκαν διάφορες επιλογές π.χ. διαφορετικό στήσιμο υλικού κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, διαφορετικές επιλογές εντάσεων κλπ..

Σε μια τέτοια περίπτωση υπάρχει η ανάγκη για την κατάλληλη προσέγγιση των πειραμάτων έτσι ώστε να προκύψουν τα βέλτιστα αποτελέσματα ελαχιστοποιώντας τα περιθώρια σφάλματος. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Από την στιγμή όμως που ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην εργασία δεν είναι ο βέλτιστος για την διεξαγωγή τέτοιων πειραμάτων, θα υπάρχει μια σχετική απόκλιση από τα ιδανικά αποτελέσματα.

Αν και τελικά από τα αποτελέσματα της εργασίας προκύπτει ένα βάσιμο συμπέρασμα το οποίο είναι εφικτό να επαληθεύσει τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα, τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, στην συνέχεια αναφέρονται οι τρόποι βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων.

6.4 Βελτιώσεις

Ένας πολύ βασικός παράγοντας βελτίωσης των πειραμάτων είναι ο χώρος διεξαγωγής των πειραμάτων. Στην προκειμένη περίπτωση ο χώρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα συμβατικό δωμάτιο χωρίς χρήση ηχοαπορροφητικού υλικού. Κάτι τέτοιο μπορεί να επηρεάσει δραματικά τα αποτελέσματα, ειδικά στην περίπτωση που η γεννήτρια συχνοτήτων είναι μακριά από την συσκευή αποδοχής των ηχητικών κυμάτων, λόγω των πολλαπλών αντανακλάσεων των ηχητικών κυμάτων.

Μια ακόμα βελτίωση είναι η χρήση απομονωμένου χώρου και προστατευτικών ακουστικών. Κάτι τέτοιο είναι επίσης σημαντικό, διότι θα επιτρέψει την δοκιμή μεγαλύτερου εύρους συχνοτήτων και υψηλότερων εντάσεων, από την στιγμή που δεν υπάρχει η εύνοια για την ενόχληση τυχόν κοντινών ατόμων αλλά και την ασφάλεια του ατόμου που διενεργεί τα πειράματα από επικίνδυνες συχνότητες.

Επίσης, έγινε λόγος για την απόκριση συχνοτήτων του ηχείου. Θα ήταν καλό λοιπόν να χρησιμοποιηθεί ένα ηχείο το οποίο θα είχε όσο το δυνατόν καλύτερο flat response. Με αυτόν τον τρόπο θα μειωνόταν ακόμα περισσότερο η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων από εξωτερικούς παράγοντες.

Θα μπορούσε επίσης να προστεθεί κάποιου είδους ενισχυτής στο ήδη υπάρχον κύκλωμα της εργασίας, έτσι ώστε ακόμα και τα δεδομένα που προκύπτουν από μικρότερης κλίμακας δονήσεις, να είναι ευδιάκριτα και διαχειρίσιμα.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Μελετώντας τα αποτελέσματα προκύπτει τελικά ότι η απόδοση του επιταχυνσιομέτρου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την απόδοση του ηχείου που παράγει το ηχητικό περιεχόμενο. Λαμβάνοντας υπόψιν τον παράγοντα αυτόν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο αισθητήρας ADXL335 είναι ικανός να αντιδράει με αρκετή ακρίβεια στις συχνότητες που αναφέρει ο κατασκευαστής.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση αφοσιωθήκαμε στον άξονα Z του αισθητήρα, αλλά δεδομένου ότι οι άλλοι 2 (X, Y) δεν παρουσιάζουν άλλες ιδιαιτερότητες με βάση τον κατασκευαστή παρά μόνο το διαφορετικό εύρος συχνοτήτων το οποίο φτάνει μέχρι 1600 Hz, υποθέτουμε ότι επαληθεύονται αντίστοιχα με τον ίδιο τρόπο.

Τοποθετώντας τον λοιπόν σε κοντινή απόσταση από την γεννήτρια συχνοτήτων και με μια σχετική ένταση συχνοτήτων της τάξης των 80dB τουλάχιστον, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου το input πλέον δεν θα είναι, για παράδειγμα, μια περιστροφική κίνηση του χρήστη ή ένας μεγάλος κραδασμός της συσκευής αλλά συγκεκριμένες συχνότητες ανάλογα τις ανάγκες της εφαρμογής.

Ο προσανατολισμός του αισθητήρα παίζει καθοριστικό ρόλο στα τελικά αποτελέσματα όπως είδαμε και στο κεφάλαιο των πειραμάτων, αφού θα πρέπει να υπάρχει ελευθερία κίνησης στον άξονα που εξετάζεται.

Παρόλα αυτά, οι συχνότητες σε αυτές τις εντάσεις μπορεί να γίνουν επιβλαβείς για τον χρήστη, γι' αυτό και θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να προβλέπεται η ασφάλεια του.

Θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον να μελετηθεί μελλοντικά η αντίδραση του αισθητήρα καθώς απομακρύνεται από την πηγή συχνοτήτων έτσι ώστε να υπολογιστεί η απόδοση του αισθητήρα με επιπλέον παράγοντα την απόσταση. Κάτι τέτοιο θα άλλαζε αρκετά την χρησιμότητα του αισθητήρα καθώς σε κάποιες εφαρμογές πιθανώς να μην υπάρχει η επιλογή αισθητήρα και πηγή να βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση.

Επίσης, θα μπορούσε πλέον κάποια εφαρμογή η οποία περιλαμβάνει τον συγκεκριμένο

αισθητήρα, να εξετάζει ταυτόχρονα το πως αντιδράει ο αισθητήρας σε κάθε άξονα στέλνοντας ηχητικά κύματα απ' όλες τις κατευθύνσεις. Κάτι το οποίο είναι πολύ πιθανό να προκύψει σε εφαρμογές τις καθημερινότητας.

Μια ενδιαφέρουσα επέκταση τέλος, θα ήταν η ενσωμάτωση κάποιου είδους ενισχυτή στο υλικό που χρησιμοποιείται στα πειράματα προκειμένου να αποκτήσουμε μια μεγαλύτερης ακρίβειας ανάλυση στα φαινόμενα που διερευνούμε. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο σημείο, οι δονήσεις που προέρχονται από ηχητικά κύματα είναι μικρής κλίμακας και έτσι τα τελικά αποτελέσματα δεν απεικονίζουν μεγάλες διακυμάνσεις.

Παράρτημα Α΄

Δεδομένα

Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρέχονται όλα τα δεδομένα που προκύπτουν από τα πειράματα και από τα οποία παράγεται το διάγραμμα απόκρισης συχνοτήτων του αισθητήρα ADXL335. Κάθε στήλη προσδιορίζει μια συχνότητα. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν επιτάχυνση της βαρύτητας στην τάξη των milli-g.

Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15
2	2	-9	8	8	8	8	2	8	2	8	2	2	2	-3
2	2	2	8	-3	-9	-9	-3	-9	-3	-3	-3	-3	-3	2
2	2	2	-3	2	8	8	8	14	8	-3	8	2	2	2
2	-9	-9	8	2	14	14	14	14	8	-3	8	-3	-3	2
2	-3	-9	2	-3	2	-3	14	-3	8	-3	8	-3	2	2
2	-9	2	2	8	8	-3	8	-9	-3	2	8	2	2	2
-3	-9	8	8	2	8	-9	-3	8	-3	2	-3	-3	2	2
-3	-3	8	8	8	-3	2	-3	8	14	-9	2	2	2	8
-9	2	14	8	-9	2	2	2	2	2	8	8	-3	2	2
-3	8	8	2	-3	-3	-3	-3	2	-9	8	2	2	2	2
2	8	8	-3	14	2	2	2	8	8	-3	2	3	2	2
8	8	2	8	14	8	-3	8	-3	8	-3	-9	2	2	2
-3	14	-3	14	2	8	8	8	8	2	8	2	2	2	-3
2	14	-3	14	-3	14	2	2	-3	-3	2	-3	2	2	2
-3	14	-9	8	-9	14	14	2	2	2	-3	2	2	2	2
2	14	-3	-3	-3	2	14	8	8	14	8	8	8	2	2
2	8	-3	2	2	-3	2	8	2	-3	8	-3	2	2	2
2	8	2	-9	2	8	8	2	-3	-3	-3	8	2	2	8
2	2	8	2	8	2	-3	2	8	8	2	2	8	2	2
2	-3	8	2	2	-3	-3	2	8	8	-3	2	8	2	2
2	-3	14	-3	8	2	-9	2	8	-3	2	2	2	2	2

8	-3	14	-3	8	2	-3	8	2	-3	-3	-3	2	2	-3
8	-9	8	2	2	8	-3	-3	2	8	8	8	2	2	2
8	-9	2	2	2	8	8	-9	2	8	2	2	2	2	-3
8	-9	2	8	2	8	8	2	8	-3	-9	8	-3	2	2
8	-3	-9	8	8	8	8	-3	-3	-3	8	2	2	2	2
8	-3	-9	-3	2	2	2	2	-3	8	8	2	-3	2	2
8	8	-3	2	8	2	2	2	-9	8	-3	-3	2	2	2
14	8	-3	14	2	-3	8	-3	8	-3	-3	2	2	2	-3
8	8	8	-3	8	-3	8	2	2	2	8	2	2	2	2
8	14	14	-9	2	2	2	14	-3	8	2	-3	2	2	2
8	14	14	2	2	14	14	14	2	8	-9	8	2	2	2
8	14	20	8	14	14	14	8	14	-3	8	2	2	2	2
8	8	8	8	8	-3	2	2	14	2	8	8	-3	2	2
8	8	2	8	-3	-9	8	-3	2	14	-3	8	9	2	2
8	8	2	2	8	-3	8	-3	-3	2	2	2	3	8	-3
2	-3	-3	-3	2	2	2	8	8	-3	8	-9	2	8	2
2	-9	-3	-3	-3	2	2	2	8	8	2	-3	-3	8	2
2	-3	-3	8	2	2	2	2	-3	14	-3	2	8	2	2
-3	-9	2	14	-3	2	2	2	-9	8	2	-9	2	2	2
-3	-3	8	14	-9	2	2	2	-3	-3	8	2	-3	2	2
-3	-3	8	8	-9	8	8	2	8	8	-3	2	8	2	2
-3	-3	8	8	-3	8	8	2	2	8	2	-3	2	2	2
-3	8	14	8	2	2	2	-3	2	-3	8	2	-3	2	2
2	2	14	2	14	2	2	2	2	-3	2	2	2	2	-3
-3	8	14	-3	14	-3	2	8	8	8	-9	2	-3	2	2
2	8	2	-3	2	-9	8	8	-3	8	8	2	2	2	2
-3	14	-3	-9	-3	2	-3	-3	-9	-3	8	2	2	2	2
-3	2	-3	-3	-9	-3	2	-9	-3	-3	-3	-3	2	2	-3
2	2	-9	2	8	2	-3	-3	2	8	2	2	2	2	2
2	2	-3	8	-3	14	2	8	8	8	8	-3	2	2	2
2	-3	2	8	2	14	14	14	14	-3	-3	-9	2	-3	2
2	-3	2	2	2	2	2	14	14	2	2	8	2	2	2
8	2	2	8	2	-3	-3	8	2	2	2	2	-3	2	-3
2	-3	-3	14	2	2	2	-3	-3	2	-3	8	2	2	2

Πίνακας Α'.1: Πίνακας Δεδομένων

Βιβλιογραφία

- [1] Takao AIZAWA, Toshinori KIMURA, Toshifumi MATSUOKA, Tetsuya TAKEDA και Youichi ASANO. Application of mems accelerometer to geophysics. International Journal of the JCRM, 2008.
- [2] Irene Amerini, Paolo Bestagini, Luca Bondi, Roberto Caldelli, Matteo Casini και Stefano Tubaro. Robust smartphone fingerprint by mixing device sensors features for mobile strong authentication, 2016.
- [3] Atmel. Atmega328p, 8-bit avr microcontroller with 32k bytes in-system programmable flash, datasheet, 2015.
- [4] Yusuf Abdullahi Badamasi. The working principle of an arduino. International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2014.
- [5] Josh Bishop. How to use a breadboard. <https://www.circuitbread.com/tutorials/how-to-use-a-breadboard>, 2018.
- [6] Crystal Chen, Greg Novick και Kirk Shimano. What is risc. <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/risc/whatis/index.html>, 2000.
- [7] Analog Devices. Small, low power, 3-axis ± 3 g accelerometer, adxl335, 2009.
- [8] C. E. Efstathiou. Δειγματοληψία σήματος: Θεώρημα nyquist - shannon. University of Athens, 2018.
- [9] Stanislav Korbel και Vlastimil Janes. Interesting applications of atmel avr microcontrollers, 2004.
- [10] parallax. Plx-daq. <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>, 2020.
- [11] ΚΛΕΩΝ ΤΣΙΜΠΟΣ και ΦΩΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΚΩΔΗΣ. Μέτρα Κύμανσης. Στο Περιγραφική και Διερευνητική Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων, σελίδες 283–292. Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, 2010.
- [12] Floyd E. Toole. Music, rooms and listeners science in the creation and delivery of audio art. Acoustics Today, 2013.
- [13] <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>, 2021.

- [14] <https://thaifasr110.weebly.com/blog/waves-physics>. Waves physics, 2020.
- [15] <https://www.robotpark.com/GY-61-DXL335-3-Axis-Accelerometer-Module>, 2015.