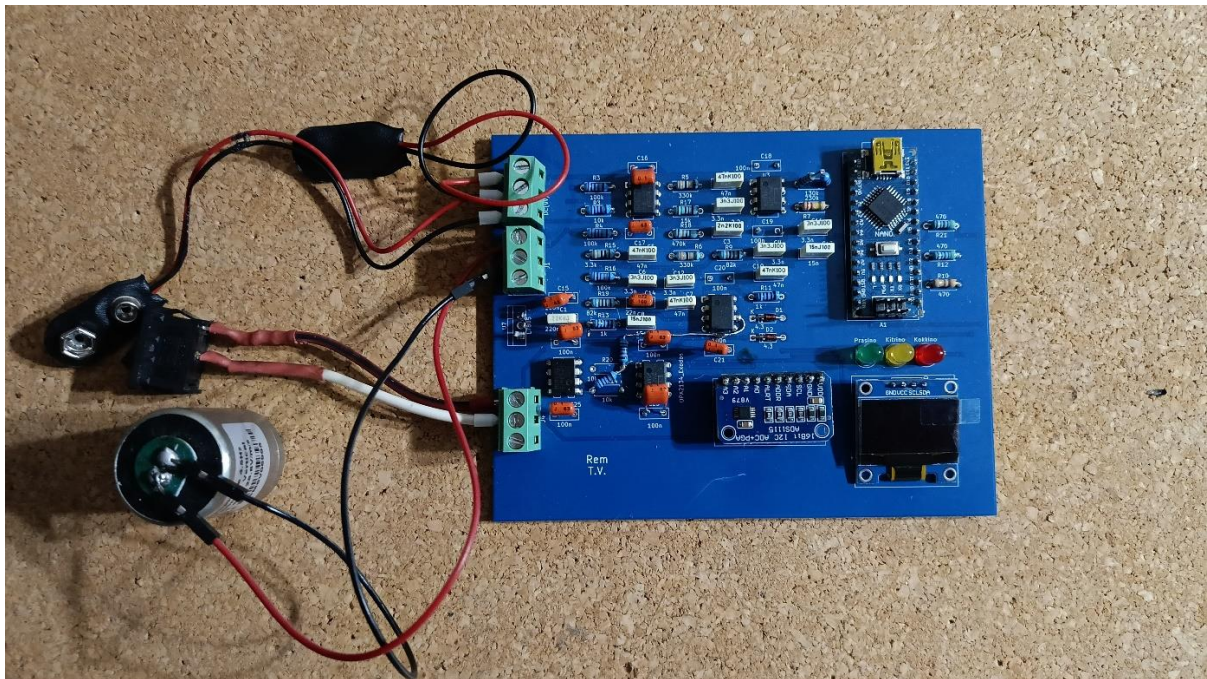


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Σχεδίαση και υλοποίηση σειсмоγράφου»



Του φοιτητή
Αναστάσιου Βοσκίδη
Αρ. Μητρώου: 518021

Επιβλέπων
Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία 30-5-2026

Σχεδίαση και υλοποίηση σειсмоγράφου

25123

Αναστάσιος Βοσκίδης

Ιορδάνης Κιοσκερίδης

21-2-2025

30-5-2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Αναστάσιου Βοσκίδη που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος «Κατασκευή σειсмоγράφου με κατακόρυφο γεώφωνο» έγινε τόσο για επιστημονικούς όσο και για προσωπικούς λόγους. Η Ελλάδα αποτελεί μία από τις πλέον σεισμογενείς χώρες της Ευρώπης, γεγονός που καθιστά τη μελέτη και την καταγραφή σεισμικών φαινομένων ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση της φυσικής συμπεριφοράς του υπεδάφους και την προστασία των κατασκευών και της ανθρώπινης ζωής.

Ως φοιτητής στον τομέα της Ηλεκτρονικής, επιδίωξα να συνδυάσω τη θεωρητική γνώση με την πρακτική εφαρμογή, υλοποιώντας ένα λειτουργικό σύστημα καταγραφής σεισμικών δονήσεων. Η εργασία αυτή μου έδωσε τη δυνατότητα να εφαρμόσω γνώσεις αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων, φίλτρων, ενισχυτών και συστημάτων ψηφιοποίησης, καθώς και να εξοικειωθώ με την ανάλυση πραγματικών δεδομένων.

Μέσα από την πτυχιακή εργασία απέκτησα ουσιαστική εμπειρία στη σχεδίαση, κατασκευή και αξιολόγηση ενός μετρητικού συστήματος, ενώ ταυτόχρονα κατανόησα βαθύτερα τον ρόλο της ηλεκτρονικής στην παρακολούθηση φυσικών φαινομένων και στην ανάπτυξη τεχνολογιών πρόληψης και ασφάλειας.

Περίληψη

Οι σεισμοί είναι το αποτέλεσμα της απότομης απελευθέρωσης αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης στον φλοιό της Γης, η οποία μεταδίδεται με τη μορφή σεισμικών κυμάτων και προκαλεί τη δόνηση της επιφάνειας του εδάφους. Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζει τη θεωρητική και πρακτική βάση για την καταγραφή σεισμικών δονήσεων μέσω της κατασκευής και αξιολόγησης ενός σειсмоγραφικού συστήματος.

Αρχικά, πραγματοποιείται ανάλυση των σεισμικών κυμάτων και των φυσικών μηχανισμών που τα προκαλούν, με στόχο την κατανόηση της διάδοσής τους και της καταγραφής τους. Στη συνέχεια, αναλύεται το κεντρικό στοιχείο του σειμογράφου το οποίο είναι το γεώφωνο και το οποίο μετατρέπει τη μηχανική κίνηση του εδάφους σε ηλεκτρικό σήμα μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε κατακόρυφο γεώφωνο (vertical geophone) φυσικής συχνότητας 4.5 Hz, κατάλληλο για την ανίχνευση χαμηλών συχνοτήτων που σχετίζονται με σεισμικά φαινόμενα.

Δεδομένου ότι το σήμα εξόδου του γεωφώνου είναι χαμηλού πλάτους και περιέχει ανεπιθύμητες συχνότητες, αναπτύχθηκε κύκλωμα αναλογικής προεπεξεργασίας, το οποίο περιλαμβάνει φίλτρα και ενισχυτές, με σκοπό τη βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο και την προσαρμογή του σήματος στο εύρος εισόδου του συστήματος ψηφιοποίησης. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μεθοδολογία ψηφιακής ανάλυσης των δεδομένων στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, μέσω κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας σήματος.

Τα αποτελέσματα της εργασίας καταδεικνύουν ότι το αναπτυγμένο σύστημα είναι ικανό να καταγράφει αξιόπιστα σεισμικές δονήσεις και να παρέχει μετρήσιμα δεδομένα για περαιτέρω επιστημονική ανάλυση.

«Design and Implementation of a Seismograph»

«Anastasios Voskidis»

Earthquakes are the result of the sudden release of stored elastic strain energy within the Earth's crust. This energy propagates in the form of seismic waves, causing ground motion and vibrations at the Earth's surface. This thesis presents the theoretical background and practical implementation of a seismic recording system designed to detect and analyze seismic vibrations.

Initially, an overview of seismic waves and the physical mechanisms responsible for their generation is provided, aiming to explain their propagation and recording principles. Subsequently, the main sensing element of the seismograph, the geophone, is analyzed. The geophone converts ground motion into an electrical signal through the principle of electromagnetic induction. In this work, a vertical geophone with a natural frequency of 4.5 Hz was employed, making it suitable for the detection of low-frequency vibrations associated with seismic activity.

Since the output signal of the geophone is characterized by low amplitude and may contain unwanted frequency components, an analog signal conditioning circuit was developed. This circuit includes amplification and filtering stages in order to improve the signal-to-noise ratio and adapt the signal to the input range of the digitization system. Furthermore, the methodology for digital signal analysis in both the time and frequency domains is presented using appropriate signal processing techniques.

The results demonstrate that the developed system is capable of reliably recording seismic vibrations and providing measurable data suitable for further scientific analysis. The proposed design represents a low-cost and educationally valuable approach to seismic monitoring, while also serving as a foundation for future improvements and more advanced seismic measurement systems.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ιορδάνη Κιοσκερίδη καθώς με βοήθησε και με καθοδήγησε όσες φορές χρειάστηκα μία συμβουλή. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	v
Περίληψη	vi
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Κατάλογος Πινάκων	xii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Σεισμικές δονήσεις	1
1.2 Σεισμικά κύματα	2
1.2.1 Επιμήκη κύματα P	2
1.2.2 Εγκάρσια κύματα S	3
1.2.3 Επιφανειακά κύματα Rayleigh	3
1.2.4 Επιφανειακά κύματα Love	3
1.2.5 Ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων	3
1.3 Καταγραφή σεισμών	4
1.4 Μεγέθη σεισμών	5
1.5 Σεισμογράφοι και σεισμόμετρα	5
1.6 Στόχος της εργασίας	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Θεωρητικό Υπόβαθρο	8
2.1 Εισαγωγή	8
2.2 Εισαγωγή στο γεώφωνο	8
2.3 Βασικές αρχές λειτουργίας γεωφώνου	9
2.4 Κατηγορίες γεωφώνων	9
2.4.1 Κατακόρυφα γεώφωνα	9
2.4.2 Οριζόντια γεώφωνα	10
2.4.3 Γεώφωνα τύπου moving-coil	10
2.4.4 Γεώφωνα τύπου moving-magnet	10
2.5 Αρχιτεκτονική και δομή γεωφώνου moving-coil	10
2.5.1 Μαγνήτης	10
2.5.2 Σύστημα ανάρτησης	11
2.5.3 Σύστημα απόσβεσης	11

2.5.4 Πηνίο	11
2.5.5 Περίβλημα αισθητήρα	11
2.5.6 Ακροδέκτες εξόδου	12
2.6 Μαθηματική ανάλυση της συμπεριφοράς του γεωφώνου	12
2.6.1 Μηχανική συμπεριφορά.....	12
2.6.2 Ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά.....	13
2.7 Κυκλωματική αναπαράσταση του γεωφώνου	14
2.8 Φίλτρα anti-aliasing	15
2.9 ADC και μικροελεγκτές σε συστήματα γεωφώνων	16
2.10 Συμπεράσματα κεφαλαίου	16
Κεφάλαιο 3ο: Μεθοδολογία.....	18
3.1. Εισαγωγή.....	18
3.2. Χαρακτηριστικά σήματος γεωφώνου.....	18
3.3. Ανάγκη ενίσχυσης του σήματος	19
3.4. Ρόλος του φίλτρου χαμηλής διέλευσης (Low-Pass).....	20
3.4 Συνδυασμένη λειτουργία ενισχυτή και φίλτρου	22
3.5. Ψαλιδιστής τάσης (Voltage Clipper).....	22
3.7. Offset τάσης 5V (DC Bias).....	23
3.8. Μετατροπέας A/D (ADC)	24
3.9 Arduino Nano V3.....	25
3.10.Συμπεράσματα	26
Κεφάλαιο 4ο: Αρχιτεκτονική και Υλοποίηση Συστήματος	27
4.1 Εισαγωγή.....	27
4.2 Αναλογικό στάδιο του συστήματος	28
4.2.1 Αισθητήρας.....	29
4.2.2 Ενίσχυση.....	30
4.2.3 Ενεργό Χαμηλοπερατό φίλτρο (Low Pass).....	32
4.2.4 Αρχιτεκτονική κυκλώματος ψαλιδισμού τάσης και DC offset	34
4.2.5 Διακόπτης επιλογής τροφοδοσίας 5V.....	36
4.3 Ψηφιακό στάδιο	36
4.3.1 Μετατροπέας A/D	36
4.3.2 Arduino Nano V3	39
4.4 Τροφοδοσία συστήματος.....	42
4.5 Διάγραμμα Ροής.....	42

4.6 Συνολική αξιολόγηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Αποτελέσματα και Ανάλυση Μετρήσεων	48
5.1 Εισαγωγή.....	48
5.2 Θεωρητικό υπόβαθρο υπολογισμών – Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε.....	49
5.2.1 Υπολογισμός περιόδου	49
5.2.2 Υπολογισμός συχνότητας	49
5.2.3 Υπολογισμός ταχύτητας εδάφους.....	49
5.2.3 Υπολογισμός μετατόπισης	49
5.2.4 Υπολογισμός τοπικού μεγέθους ML	49
5.2.5 Προσεγγιστική μετατροπή σε επιφανειακό μέγεθος (Ms)	50
5.2 Πίνακες μετρήσεων.....	50
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών	50
5.4 Συμπεράσματα	54
Κεφάλαιο 6: Ανασκόπηση, συμπεράσματα και βελτιώσεις.....	55
6.1 Διαδικασία της έρευνας που ακολουθήθηκε.....	55
6.2: Μελλοντικές βελτιώσεις.....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ	61
Arduino	61

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 4.1: Block diagram του συστήματος.....	27
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Ροής σελ	42
Σχήμα 5.1 Ακολουθία βημάτων σελ	48

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Σχέσεις μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών μεγεθών.....	7
Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωφώνου EG-4.5-II.....	29
Πίνακας 4.2: LSB με βάση το FSR.....	38
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά Arduino Nano.....	40
Πίνακας 5.1: Τιμές του $-\log A_0$ για διάφορα Δ	50
Πίνακας 5.2: Ενδεικτικές τιμές τάσης και συχνότητας σειсмоγραφήματος 1.....	51
Πίνακας 5.2: Ενδεικτικές τιμές τάσης και συχνότητας σειсмоγραφήματος 2.....	52
Πίνακας 5.2: Ενδεικτικές τιμές τάσης και συχνότητας σειсмоγραφήματος 3.....	53

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σεισμικές δονήσεις

Ο φλοιός της Γης αποτελείται από μεγάλες λιθосφαιρικές πλάκες, οι οποίες κινούνται συνεχώς και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η αλληλεπίδραση αυτή προκαλεί μακροχρόνια παραμόρφωση και συσσώρευση τάσης στα όρια των πλακών και στα γεωλογικά ρήγματα.

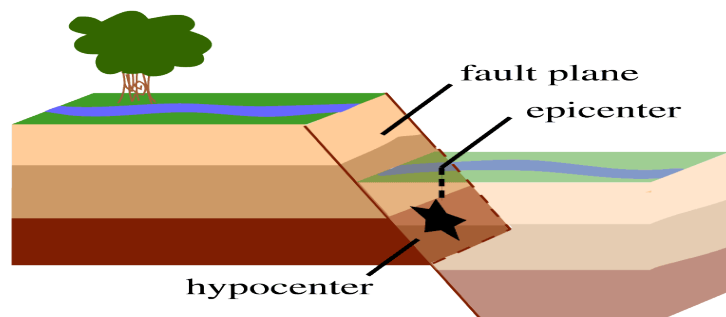


Εικόνα 1.1: Χάρτης τεκτονικών πλακών [1]

Όταν η συσσωρευμένη τάση υπερβεί την αντοχή των πετρωμάτων, απελευθερώνεται απότομα ενέργεια με τη μορφή σεισμικών κυμάτων, προκαλώντας σεισμό.

Οι σεισμοί είναι το αποτέλεσμα ξαφνικών μετακινήσεων κατά μήκος ρηγμάτων που βρίσκονται στον φλοιό της Γης. Οι λιθосφαιρικές πλάκες μπορεί να συγκρούονται, να απομακρύνονται ή να ολισθαίνουν η μία δίπλα στην άλλη, οδηγώντας σε συσσώρευση ελαστικής ενέργειας. Η απότομη απελευθέρωση της ενέργειας αυτής δημιουργεί σεισμικά κύματα, τα οποία διαδίδονται στο εσωτερικό και στην επιφάνεια της Γης.

Το σημείο στο εσωτερικό της Γης όπου ξεκινά η θραύση ονομάζεται εστία ή υπόκεντρο του σεισμού, ενώ το σημείο της επιφάνειας που βρίσκεται κατακόρυφα πάνω από το υπόκεντρο ονομάζεται επίκεντρο [2][3].



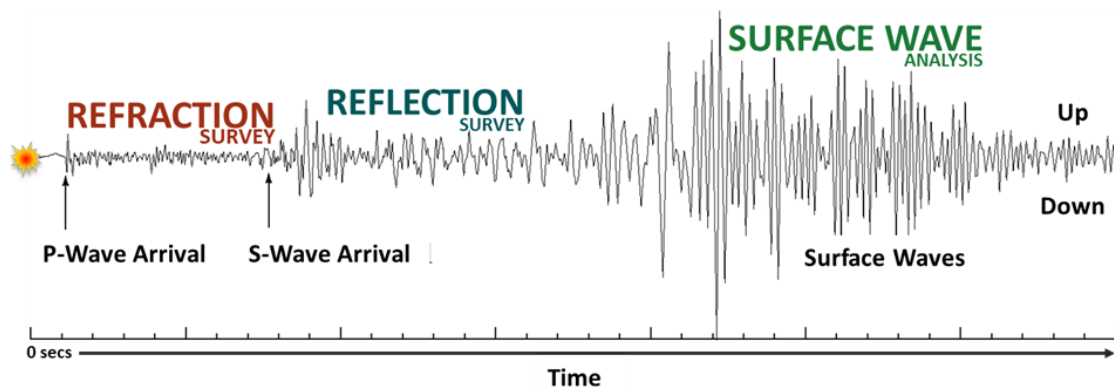
Εικόνα 1.2: Επίκεντρο και υπόκεντρο [3]

Οι καταστροφικές συνέπειες των σεισμών έχουν οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στην αναζήτηση τρόπων πρόβλεψης και καλύτερης κατανόησής τους. Κατά τη διάρκεια της ιστορίας, πολλές χώρες με

έντονη σεισμική δραστηριότητα, όπως η Ιαπωνία, η Κίνα, οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ρωσία αλλά και η Ελλάδα, έκαναν σημαντικές επενδύσεις στην έρευνα για την πρόγνωση των σεισμών. Οι προσπάθειες αυτές περιλάμβαναν τη μελέτη σεισμικών δεδομένων, την παρακολούθηση γεωφυσικών μεταβολών, καθώς και την ανάπτυξη δικτύων καταγραφής της σεισμικής δραστηριότητας. Παρόλο που μέχρι σήμερα δεν έχει επιτευχθεί η ακριβής πρόβλεψη του χρόνου, του τόπου και του μεγέθους ενός σεισμού, η συστηματική μελέτη ιστορικών και σύγχρονων σεισμών έχει συμβάλει σημαντικά στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου και στη βελτίωση των μέτρων προστασίας των κοινωνιών.

Για την καλύτερη κατανόηση της σεισμικής δραστηριότητας και την αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου, οι επιστήμονες μελετούν τα σεισμικά κύματα που παράγονται κατά τη γένεση ενός σεισμού. Η καταγραφή και η ανάλυση των κυμάτων αυτών παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη θέση της εστίας, το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του σεισμού. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα, τα σεισμόμετρα, τα οποία καταγράφουν με μεγάλη ακρίβεια τις ταλαντώσεις του εδάφους. Τα δεδομένα που συλλέγονται επιτρέπουν τον υπολογισμό του μεγέθους των σεισμών και συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της Γης.

1.2 Σεισμικά κύματα



Εικόνα 1.3: Απεικόνιση βασικών στοιχείων ενός σειсмоγραφήματος[4]

Κατά τη γένεση ενός σεισμού, η αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια απελευθερώνεται με τη μορφή σεισμικών κυμάτων, τα οποία διαδίδονται μέσα στη Γη και προκαλούν δονήσεις στην επιφάνεια του εδάφους.

Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Ελαστικά κύματα χώρου,
- Ελαστικά επιφανειακά κύματα.

Τα κύματα χώρου διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης προς όλες τις κατευθύνσεις και προκύπτουν από κυματικές εξισώσεις που βασίζονται σε έναν πίνακα που είναι γνωστός ως ταυσιτής παραμόρφωσης (strain tensor), ενώ τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται κατά μήκος των επιφανειακών στρωμάτων της. Τα κύματα χώρου διακρίνονται στα κύματα P και S ενώ τα επιφανειακά κύματα στα κύματα Rayleigh και Love [5][6].

1.2.1 Επιμήκη κύματα P

Τα επιμήκη κύματα P (Primary waves) είναι κύματα στα οποία τα μόρια του μέσου δονούνται παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, δημιουργώντας πυκνώματα και αραιώματα. Τα

κύματα αυτά είναι ταχύτερα από όλα τα σεισμικά κύματα και φτάνουν πρώτα στους σειсмоγραφικούς σταθμούς. Η ταχύτητα διάδοσής τους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$a = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1.1)$$

Όπου:

- λ, μ : ελαστικές σταθερές Lamé
- ρ : Πυκνότητα σε gr/cm^3

1.2.2 Εγκάρσια κύματα S

Τα εγκάρσια κύματα S (Secondary waves) είναι κύματα στα οποία τα μόρια του μέσου δονούνται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης. Δημιουργούν όρη και κοιλίες και διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα από τα κύματα P.

Η ταχύτητα διάδοσής τους υπολογίζεται από την σχέση:

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.2)$$

Τα κύματα S δεν μπορούν να διαδοθούν μέσα σε υγρά, γεγονός που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της εσωτερικής δομής της Γης.

1.2.3 Επιφανειακά κύματα Rayleigh

Τα κύματα Rayleigh είναι επιφανειακά κύματα μεγάλης περιόδου. Κατά τη διάδοσή τους τα μόρια κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές. Η κίνηση αυτή μοιάζει με την κίνηση κυμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας.

Τα κύματα Rayleigh εμφανίζονται μετά τα κύματα S στα σειсмоγραφήματα και συνήθως προκαλούν σημαντικές επιφανειακές καταστροφές.

Αν ισχύει $\lambda = \mu$, ($\sigma = 1/4$ και $\alpha = \beta\sqrt{2}$) τότε η ταχύτητα των κυμάτων είναι:

$$C = 0.9194\beta \quad (1.3)$$

1.2.4 Επιφανειακά κύματα Love

Τα κύματα Love δημιουργούνται όταν ένα στρώμα μικρής ταχύτητας διάδοσης βρίσκεται πάνω από στρώμα μεγαλύτερης ταχύτητας. Τα μόρια δονούνται παράλληλα προς την επιφάνεια και κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης.

Τα κύματα αυτά καταγράφονται κυρίως από οριζόντια σεισμόμετρα και παρουσιάζουν έντονη καταστροφική δράση σε επιφανειακές κατασκευές.

1.2.5 Ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων

Η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων διακρίνεται σε:

Ταχύτητα φάσης

Η ταχύτητα φάσης εκφράζει την ταχύτητα διάδοσης ενός απλού αρμονικού κύματος και δίνεται από την σχέση:

$$C = \frac{\omega}{k} \quad (1.4)$$

Ταχύτητα ομάδας

Ταχύτητα ομάδας είναι η ταχύτητα των διαταράξεων με ορισμένη περίοδο που συμβάλουν μεταξύ τους και δίνεται από την σχέση:

$$U = \frac{d\omega}{dk} \quad (1.5)$$

Η καταγραφή των σεισμικών κυμάτων πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Ιστορικά χρησιμοποιήθηκαν [7]:

- μηχανική αναγραφή (σεισμόμετρα Mainka και Wiechert),
- οπτική αναγραφή (Milne-Shaw και Wood-Anderson),
- και ηλεκτρομαγνητική αναγραφή (Galitzin και Benioff).

1.3 Καταγραφή σεισμών

Η καταγραφή των σεισμών πραγματοποιείται μέσω σειсмоγράφων και σεισμόμετρων. Τα σύγχρονα σεισμολογικά συστήματα χρησιμοποιούν αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας που μπορούν να ανιχνεύσουν εξαιρετικά μικρές μετακινήσεις της τάξης των μικρομέτρων ή ακόμη και μικρότερες. Για την πλήρη περιγραφή ενός σεισμικού γεγονότος απαιτείται η μέτρηση διαφορετικών φυσικών μεγεθών, όπως:

- η μετατόπιση του εδάφους,
- η ταχύτητα κίνησης,
- η επιτάχυνση,
- η περιστροφή,
- και η παραμόρφωση των γεωλογικών σχηματισμών.

Στη σεισμολογία ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα όργανα που καταγράφουν τη μετατόπιση και τις χρονικές παραγώγους της, δηλαδή την ταχύτητα και την επιτάχυνση. Τα γεώφωνα ανήκουν στην κατηγορία αισθητήρων ταχύτητας (velocity sensors), καθώς η τάση εξόδου τους είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας της εδαφικής κίνησης.

Η καταγραφή των σεισμών πραγματοποιείται μέσω δικτύων σεισμολογικών σταθμών που είναι εγκατεστημένοι σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές [8]. Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν συνεχώς και μεταδίδουν δεδομένα σε κέντρα επεξεργασίας, όπου γίνεται:

- ανάλυση των κυματομορφών,
- υπολογισμός του επικέντρου,
- εκτίμηση του βάθους,
- και προσδιορισμός του μεγέθους του σεισμού.

Τα σύγχρονα συστήματα σεισμικής καταγραφής είναι πλέον πλήρως ψηφιακά και περιλαμβάνουν:

- αισθητήρες υψηλής ακρίβειας,
- αναλογικά κυκλώματα ενίσχυσης,
- φίλτρα anti-aliasing,
- μετατροπείς ADC,
- και υπολογιστικά συστήματα αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων.

Η ψηφιακή καταγραφή επιτρέπει την ανάλυση σεισμικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο, την εφαρμογή τεχνικών φασματικής ανάλυσης και τη δημιουργία συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης σεισμών. Επιπλέον, η χρήση μικροελεγκτών και χαμηλού κόστους αισθητήρων έχει επιτρέψει την ανάπτυξη φορητών και εκπαιδευτικών συστημάτων σεισμικής παρακολούθησης.

1.4 Μεγέθη σεισμών

Κάθε σεισμός καταγράφεται από ένα σεισμολογικό δίκτυο αποτελούμενο από πολλούς σεισμικούς σταθμούς, οι οποίοι μετρούν την κίνηση του εδάφους σε διαφορετικές περιοχές.

Το μέγεθος (Magnitude) αποτελεί το βασικό μέτρο εκτίμησης ενός σεισμού και σχετίζεται με την ενέργεια που απελευθερώνεται στην πηγή του σεισμού [9].

Η πρώτη λογαριθμική κλίμακα μεγέθους αναπτύχθηκε από τον Charles Richter τη δεκαετία του 1930 για τη μέτρηση σεισμών στην Καλιφόρνια. Η κλίμακα αυτή ονομάστηκε ML (Local Magnitude) και έγινε γνωστή ως κλίμακα Richter.

Με την ανάπτυξη παγκόσμιων σειсмоγραφικών δικτύων έγινε φανερό ότι η κλίμακα Richter δεν ήταν κατάλληλη για όλες τις αποστάσεις και όλα τα φάσματα συχνοτήτων [10]. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν νέες κλίμακες μεγέθους, όπως:

- το μέγεθος κυμάτων σώματος (Mb),
- και το μέγεθος επιφανειακών κυμάτων (Ms).

Λόγω περιορισμών των παραπάνω κλιμάκων, αναπτύχθηκε αργότερα η κλίμακα μεγέθους ροπής (Moment Magnitude — Mw), η οποία χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως.

Το μέγεθος ροπής σχετίζεται με:

- την ολίσθηση του ρήγματος,
- την επιφάνεια θραύσης,
- και τη συνολική απελευθερωμένη ενέργεια.

Η κλίμακα Mw θεωρείται πιο αξιόπιστη, ιδιαίτερα για μεγάλους σεισμούς.

1.5 Σεισμογράφοι και σεισμόμετρα

Από το πρώτο σεισμοσκόπιο του Zhang Heng (εικόνα 1.4) το 132 μ.Χ. έως τα σύγχρονα ψηφιακά σεισμογραφικά συστήματα, τα όργανα καταγραφής σεισμών εξελίχθηκαν σημαντικά με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μετρήσεων.



Εικόνα 4.1: Σεισμοσκόπιο Zhang Heng [11]

Τα βασικά είδη σειсмоγραφικών οργάνων είναι τα εξής:

Σεισμοσκόπια

Τα σεισμοσκόπια είναι απλά όργανα που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση σεισμών χωρίς ακριβή καταγραφή της κυματομορφής.

Σεισμογράφοι εκκρεμούς

Οι σεισμογράφοι εκκρεμούς αποτελούνται από:

- εκκρεμές,
- σύστημα μεγέθυνσης,
- και σύστημα αναγραφής.

Βασικό μειονέκτημα των πρώτων σεισμογράφων ήταν η απουσία συστήματος απόσβεσης, με αποτέλεσμα οι καταγραφές να επηρεάζονται από την ταλάντωση του ίδιου του εκκρεμούς.

Επιταχυνσιογράφοι

Οι επιταχυνσιογράφοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην τεχνική σεισμολογία και καταγράφουν τη σεισμική επιτάχυνση ως συνάρτηση του χρόνου. Συχνά τοποθετούνται σε κτίρια και τεχνικές κατασκευές.

Σεισμόμετρα

Τα σεισμόμετρα είναι όργανα υψηλής ακρίβειας που καταγράφουν τη σεισμική κίνηση με μεγαλύτερη πιστότητα. Σε αντίθεση με τους πρώτους σεισμογράφους, διαθέτουν σύστημα απόσβεσης, το οποίο επιτρέπει την ταχύτερη επαναφορά της μάζας στη θέση ισορροπίας.

Η χρήση συστήματος απόσβεσης βελτίωσε σημαντικά την ποιότητα των σεισμογραφημάτων και οδήγησε στην ανάπτυξη σύγχρονων ηλεκτρομαγνητικών σεισμομέτρων, όπως τα συστήματα Galitzin και Benioff [12].

1.6 Στόχος της εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η ανάπτυξη ενός πειραματικού συστήματος καταγραφής μηχανικών δονήσεων χαμηλής συχνότητας με χρήση γεωφώνου και μικροελεγκτή. Η εργασία επικεντρώνεται στην κατανόηση της λειτουργίας των αισθητήρων σεισμικής δόνησης, στη σχεδίαση της αλυσίδας επεξεργασίας του αναλογικού σήματος και στη συλλογή δεδομένων για πειραματική ανάλυση.

Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιείται η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος μέτρησης, το οποίο περιλαμβάνει στάδια ενίσχυσης, φιλτραρίσματος και ψηφιοποίησης του σήματος του γεωφώνου, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας της καταγραφής και τη δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Η παρούσα διάταξη δεν αποτελεί επαγγελματικό σεισμολογικό όργανο ούτε προορίζεται για ακριβή υπολογισμό σεισμικού μεγέθους (κλίμακας Richter ή Mw). Αντίθετα, παρουσιάζει τη μελέτη της συμπεριφοράς των γεωφώνων, της απόκρισης σε μηχανικές δονήσεις και της λειτουργίας συστημάτων απόκτησης δεδομένων.

Επιπλέον, η εργασία αποσκοπεί:

- στην κατανόηση των βασικών αρχών σεισμικής καταγραφής,
- στη μελέτη της αναλογικής και ψηφιακής επεξεργασίας σήματος,

- στην αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος σε διαφορετικά επίπεδα διέγερσης,
- και στη διερεύνηση της δυνατότητας ανάπτυξης φορητών συστημάτων μέτρησης βασισμένων σε μικροελεγκτές.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε μπορεί να αξιοποιηθεί σε εκπαιδευτικές εφαρμογές, σε πειραματικές μετρήσεις κραδασμών και στη μελέτη βασικών τεχνικών σεισμικής καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση της λειτουργίας του γεωφώνου και των συστημάτων καταγραφής σεισμικών και μηχανικών δονήσεων. Η ανάλυση επικεντρώνεται στις φυσικές αρχές λειτουργίας του γεωφώνου, στη μηχανική και ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του αισθητήρα, καθώς και στις βασικές τεχνικές ψηφιακής απόκτησης και επεξεργασίας σημάτων.

Αρχικά πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των σεισμολογικών οργάνων και στην ανάπτυξη των σύγχρονων γεωφώνων, παρουσιάζοντας τη συμβολή σημαντικών επιστημόνων στη διαμόρφωση της σεισμολογίας και της γεωφυσικής μέτρησης. Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας του γεωφώνου, οι διαφορετικοί τύποι αισθητήρων και τα κύρια δομικά τους στοιχεία.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα γεώφωνα τύπου moving-coil, τα οποία χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική τους, η λειτουργία του μηχανικού συστήματος ανάρτησης και απόσβεσης, καθώς και η διαδικασία ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής της μηχανικής δόνησης σε ηλεκτρικό σήμα μέσω του νόμου ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday.

Επιπλέον παρουσιάζεται ένας τρόπος μετατροπής του γεωφώνου στο ηλεκτρονικό του μοντέλο για καλύτερη προσομοίωση σε κυκλώματα και συστήματα γεωεδαφικών μετρήσεων.

Τέλος, παρουσιάζονται βασικές έννοιες σχετικές με την ψηφιακή απόκτηση δεδομένων, όπως τα φίλτρα anti-aliasing, οι μετατροπές αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADC) και η χρήση μικροελεγκτών σε σύγχρονα συστήματα καταγραφής δονήσεων. Το θεωρητικό αυτό υπόβαθρο αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη, υλοποίηση και ανάλυση του συστήματος γεωφώνου που παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

2.2 Εισαγωγή στο γεώφωνο

Το γεώφωνο αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους αισθητήρες στη σεισμολογία και στη γεωφυσική εξερεύνηση, καθώς χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και καταγραφή μηχανικών δονήσεων του εδάφους. Η λειτουργία του βασίζεται στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα μέσω της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Τα γεώφωνα χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές σεισμικής καταγραφής, γεωτεχνικών μελετών, παρακολούθησης κραδασμών, ελέγχου κατασκευών και γεωφυσικής αναζήτησης κοιτασμάτων.

Η βασική αρχή λειτουργίας του γεωφώνου προέρχεται από τον νόμο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Michael Faraday [13], ο οποίος διατυπώθηκε το 1831 και της θεωρίας των ταλαντώσεων. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, η μεταβολή της μαγνητικής ροής που διαπερνά ένα πηνίο προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του. Η αρχή αυτή αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη όλων των ηλεκτροδυναμικών αισθητήρων και ειδικότερα των γεωφώνων.

Η εξέλιξη των γεωφώνων συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη της σεισμολογίας και των πρώτων σειсмоγραφικών οργάνων. Στα τέλη του 19ου αιώνα, ο John Milne [14] ανέπτυξε στην Ιαπωνία τα πρώτα σύγχρονα σεισμόμετρα, τα οποία χρησιμοποιούσαν αδρανειακές μάζες για την καταγραφή των εδαφικών δονήσεων. Οι διατάξεις αυτές αποτέλεσαν τη βάση για τα μετέπειτα ηλεκτρομηχανικά συστήματα σεισμικής καταγραφής.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, ο Boris Borisovich Golitsyn [15] παρουσίασε έναν από τους πρώτους ηλεκτρομαγνητικούς σειсмоγράφους, αντικαθιστώντας τη μηχανική και οπτική καταγραφή με ηλεκτρική μετατροπή της κίνησης. Η συμβολή του θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς εισήγαγε πρακτικά την αρχή λειτουργίας των σύγχρονων ηλεκτροδυναμικών γεωφώνων.

Παράλληλα, ο Jean Perrin [16] συνέβαλε θεωρητικά στη μελέτη αδρανειακών και ταλαντωτικών συστημάτων υψηλής ευαισθησίας, επηρεάζοντας την εξέλιξη ηλεκτρομηχανικών διατάξεων μέτρησης. Αν και δεν θεωρείται άμεσος εφευρέτης του γεωφώνου, οι θεωρητικές του εργασίες επηρέασαν σημαντικά την εξέλιξη των συστημάτων ανίχνευσης δονήσεων.

Η μετάβαση από τα πρώτα σεισμολογικά όργανα στα πρακτικά γεώφωνα πεδίου πραγματοποιήθηκε κυρίως μέσω των εργασιών των Ludger Mintrop [17] και Ernst Karcher. Ο Mintrop χρησιμοποίησε σεισμικές τεχνικές για γεωφυσική εξερεύνηση υπεδάφειων σχηματισμών, ενώ ο Karcher συνέβαλε στην ανάπτυξη της σεισμικής ανάκλασης για την αναζήτηση κοιτασμάτων πετρελαίου. Έτσι, τα γεώφωνα καθιερώθηκαν ως βασικά όργανα της γεωφυσικής βιομηχανίας.

Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, η πρόοδος στους μόνιμους μαγνήτες, στα υλικά των πηνίων και στα ηλεκτρονικά κυκλώματα ενίσχυσης οδήγησε στην ανάπτυξη γεωφώνων υψηλής ευαισθησίας και χαμηλής ιδιουσυχνότητας. Σήμερα, τα γεώφωνα συνδυάζονται με ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα και μικροελεγκτές, επιτρέποντας την ανάπτυξη φορητών και χαμηλού κόστους συστημάτων καταγραφής σεισμικών δονήσεων.

2.3 Βασικές αρχές λειτουργίας γεωφώνου

Το γεώφωνο είναι ένας ηλεκτρομηχανικός αισθητήρας που μετατρέπει τις μηχανικές δονήσεις σε ηλεκτρικό σήμα. Η λειτουργία του βασίζεται στη σχετική κίνηση μεταξύ μίας αδρανειακής μάζας και ενός πηνίου ή μαγνήτη. Όταν το περίβλημα του γεωφώνου ακολουθεί τη δόνηση του εδάφους, η εσωτερική μάζα παρουσιάζει σχετική καθυστέρηση λόγω αδράνειας. Η σχετική αυτή κίνηση οδηγεί σε μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πηνίο και προκαλεί επαγόμενη ηλεκτρική τάση [18]. Στα περισσότερα σύγχρονα γεώφωνα χρησιμοποιείται η αρχή του moving-magnet ή του moving-coil. Στην πρώτη περίπτωση κινείται ο μόνιμος μαγνήτης ενώ το πηνίο παραμένει σταθερό, ενώ στη δεύτερη κινείται το πηνίο μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο.

Το γεώφωνο λειτουργεί ουσιαστικά ως αισθητήρας ταχύτητας. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας μεταξύ της αδρανειακής μάζας και του περιβλήματος. Η ιδιότητα αυτή καθιστά τα γεώφωνα ιδιαίτερα κατάλληλα για ανίχνευση σεισμικών κυμάτων και δονήσεων χαμηλού πλάτους.

2.4 Κατηγορίες γεωφώνων

Τα γεώφωνα διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη διεύθυνση ευαισθησίας και την εσωτερική τους δομή [19].

2.4.1 Κατακόρυφα γεώφωνα

Τα κατακόρυφα γεώφωνα (vertical geophones) χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση δονήσεων κατά τον κατακόρυφο άξονα. Η διάταξη της αδρανειακής μάζας και της ανάρτησης είναι προσανατολισμένη ώστε να αποκρίνεται σε κατακόρυφες κινήσεις του εδάφους. Τα γεώφωνα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται συχνά σε σεισμικές και γεωτεχνικές εφαρμογές.

2.4.2 Οριζόντια γεώφωνα

Τα οριζόντια γεώφωνα ανιχνεύουν κινήσεις κατά μήκος οριζόντιων αξόνων. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται ανάλυση πλευρικών δονήσεων και οριζόντιων σεισμικών κυμάτων.

2.4.3 Γεώφωνα τύπου moving-coil

Στα γεώφωνα τύπου moving-coil το πηνίο αποτελεί το κινούμενο στοιχείο, ενώ ο μαγνήτης παραμένει σταθερός. Η σχετική κίνηση του πηνίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο προκαλεί επαγόμενη τάση. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται σε αρκετές κλασικές σεισμικές διατάξεις.

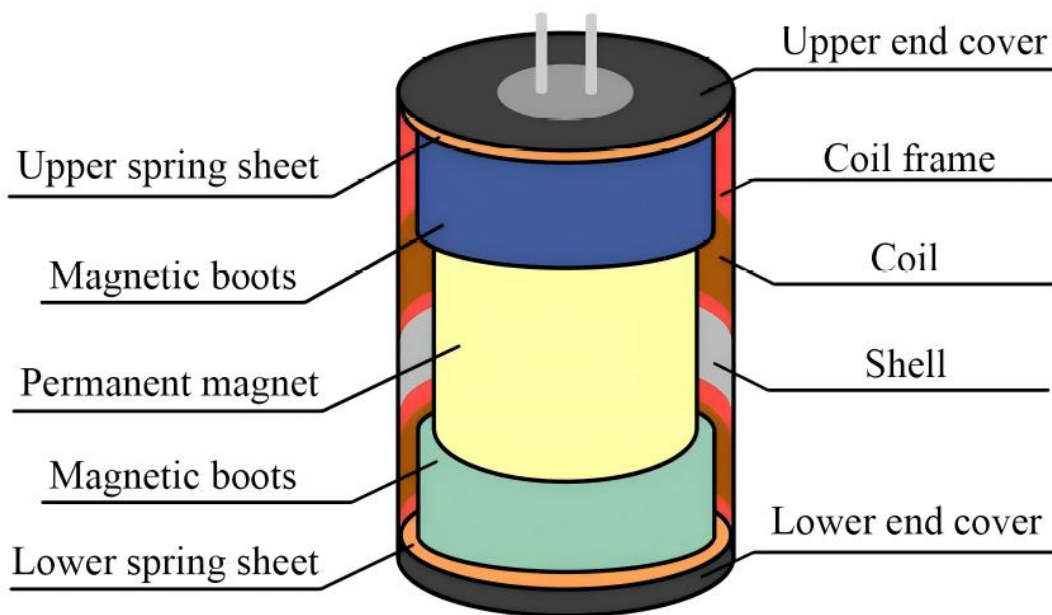
Το γεώφωνο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι κατακόρυφου τύπου moving-coil με ονομαστική ιδιοσυχνότητα 4.5 Hz.

2.4.4 Γεώφωνα τύπου moving-magnet

Στα γεώφωνα moving-magnet ο μαγνήτης αποτελεί την κινούμενη μάζα, ενώ το πηνίο παραμένει σταθερό στο περίβλημα του αισθητήρα. Η αρχιτεκτονική αυτή προσφέρει μεγαλύτερη μηχανική σταθερότητα και καλύτερη συμπεριφορά σε χαμηλές συχνότητες.

2.5 Αρχιτεκτονική και δομή γεωφώνου moving-coil

Ένα γεώφωνο τύπου moving-coil αποτελείται από μηχανικά και ηλεκτρομαγνητικά υποσυστήματα, τα οποία συνεργάζονται για τη μετατροπή της μηχανικής δόνησης σε ηλεκτρικό σήμα, δηλαδή την μετατροπή της ενέργειας από κινητική σε δυναμική, μαγνητική και τελικά σε ηλεκτρομαγνητική με απόδοση τάσης.



Εικόνα 2.1: Εσωτερική δομή του γεωφώνου [20]

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια μέρη ενός γεωφώνου.

2.5.1 Μαγνήτης

Ο μόνιμος μαγνήτης αποτελεί την μάζα M του συστήματος και λειτουργεί ως μαγνητική πηγή. Ο μαγνήτης είναι τοποθετημένος σε βοηθητικό σιδηρομαγνητικό κύκλωμα (πολικούς πόλους, κέλυφος μαγνήτη), ώστε να διαμορφώνεται σταθερό και συμμετρικό μαγνητικό πεδίο μέσα στο πηνίο. Η αύξηση της μάζας οδηγεί σε χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα και μεγαλύτερη ευαισθησία στις χαμηλές συχνότητες.

Κατά τη διέγερση του περιβλήματος η μεταβολή της θέσης του ως προς το κινούμενο πηνίο προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής ροής.

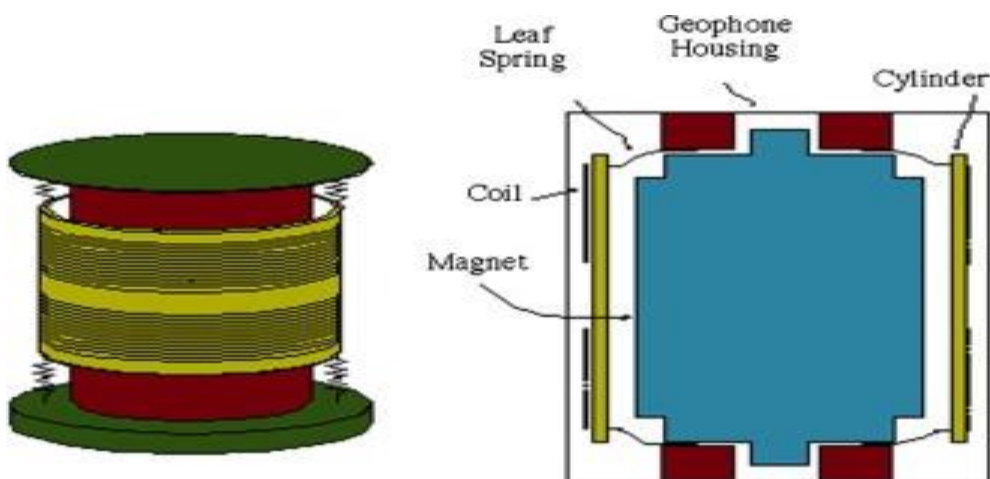
2.5.2 Σύστημα ανάρτησης

Το πηνίο στηρίζεται μέσω ελατηρίων ή εύκαμπτων μεταλλικών στοιχείων. Η σταθερά K του ελατηρίου ή οποία ονομάζεται και σκληρότητα ελατηρίου καθορίζει την ισχύ της δύναμης επαναφοράς της μάζας. Μεγαλύτερη σταθερά οδηγεί σε υψηλότερη ιδιοσυχνότητα και μικρότερη μετατόπιση για δεδομένη διέγερση.

2.5.3 Σύστημα απόσβεσης

Η απόσβεση μειώνει τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και περιορίζει τα φαινόμενα συντονισμού. Η απόσβεση μπορεί να είναι μηχανική ή ηλεκτρική και επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της μέτρησης. Ο συντελεστής απόσβεσης D αναπαριστά τις απώλειες ενέργειας, κυρίως μέσω εσωτερικής τριβής και ηλεκτρικής απόσβεσης. Επηρεάζει το εύρος ζώνης γύρω από την ιδιοσυχνότητα και καθορίζει τον παράγοντα ποιότητας Q . Μικρό D οδηγεί σε έντονο συντονισμό, μεγάλο D σε πιο επίπεδη αλλά λιγότερο ευαίσθητη απόκριση.

2.5.4 Πηνίο



Εικόνα 2.2: Το κινητό πηνίο του γεωφώνου [21]

Το πηνίο αποτελεί το κινούμενο μέλος του γεωφώνου το οποίο κινείται γύρω από τον σταθερό μαγνήτη κατά τις δονήσεις του εδάφους. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής που το διαπερνά προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του. Ο αριθμός N των σπειρών του πηνίου είναι ο πολλαπλασιαστής της επαγόμενης τάσης όπου μέσω του νόμου του Faraday, η αύξηση των σπειρών αυξάνει την τάση εξόδου αλλά και την αντίσταση του πηνίου. Η αντίσταση R του πηνίου επηρεάζει το ηλεκτρικό φορτίο και συνεισφέρει στην ηλεκτρική απόσβεση του ζητήματος. Μεγαλύτερη R μειώνει το πλάτος του σήματος σε υψηλές συχνότητες και αυξάνει τον θερμικό θόρυβο.

2.5.5 Περίβλημα αισθητήρα

Το περίβλημα είναι το εξωτερικό τμήμα του γεωφώνου και βρίσκεται σε άμεση επαφή με το έδαφος ή την επιφάνεια μέτρησης. Η κίνηση του περιβλήματος μεταφέρεται στο εσωτερικό μηχανικό σύστημα.

2.5.6 Ακροδέκτες εξόδου

Οι ακροδέκτες εξόδου συνδέονται με το πηνίο και παρέχουν το ηλεκτρικό σήμα προς τα επόμενα ηλεκτρονικά στάδια επεξεργασίας.

2.6 Μαθηματική ανάλυση της συμπεριφοράς του γεωφώνου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που αφορά την μηχανική και την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του γεωφώνου. Πρώτα όμως πρέπει να δοθούν κάποιες απαραίτητες σχέσεις για την κατανόηση του μοντέλου. Από την θεωρία των ταλαντώσεων και του ηλεκτρομαγνητισμού χρειαζόμαστε τις παρακάτω σχέσεις:

Μετατόπιση σωματιδίου:

$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

Όπου:

- x_m : πλάτος ταλάντωσης

Νόμος του Hook:

$$F = -kx \Rightarrow k = m\omega^2 \quad (2.2)$$

Όπου:

- x : μετατόπιση ελατηρίου από φυσικό μήκος
- k : σταθερά/σκληρότητα/ελαστικότητα ελατηρίου

Νόμος του Faraday για την επαγωγή:

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.3)$$

Όπου:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \times d\vec{A} \quad (2.4)$$

η μαγνητική ροπή.

2.6.1 Μηχανική συμπεριφορά

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει την μηχανική συμπεριφορά του γεωφώνου ως προς τον χρόνο παρουσιάζεται παρακάτω:

$$M\xi'' + D\xi' + K\xi = -MU'' \quad (2.5)$$

Όπου:

- ξ : μετατόπιση ελατηρίου με ξ' και ξ'' τις παραγώγους της δηλαδή ταχύτητα και επιτάχυνση αντίστοιχα
- M : Μάζα του μαγνήτη
- D : Απόσβεση
- K : Σταθερά του ελατηρίου (σκληρότητα)
- U'' : επιτάχυνση του εδάφους

Μετά από κάποιες τροποποιήσεις μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω σχέση:

$$\xi'' + 2\varepsilon\xi' + \omega_0^2\xi = -U'' \quad (2.6)$$

Όπου:

$$\omega_0^2 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.7)$$

και

$$\varepsilon = \frac{D}{2M} \quad (2.8)$$

η σταθερά απόσβεσης (damping constant).

Υποθέτοντας ότι η κίνηση του εδάφους είναι απλή αρμονική και θεωρώντας $X(\omega)$ την ενίσχυση, τότε προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του γεωφώνου:

$$X(\omega) = \frac{\omega^2}{[\omega^2 - \omega_0^2 + 2\varepsilon j\omega]} \quad (2.9)$$

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η ιδιοσυχνότητα του γεωφώνου εξαρτάται άμεσα από την μάζα του μαγνήτη και την σκληρότητα του ελατηρίου.

Η σχέση μεταξύ της ενίσχυσης και της περιόδου T της εδαφικής κίνησης συνδέεται με την παρακάτω σχέση:

$$X(T) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{T}{T_0}\right)^2 + \frac{4h^2 T^2}{T_0^2}}} \quad (2.10)$$

όπου:

$$h = \frac{\varepsilon}{\omega_0} \quad (2.11)$$

ο παράγοντας απόσβεσης (damping factor).

2.6.2 Ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά

Για μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι κάθετο στο μέσο επαγωγής και B ομογενές η (2.3) μπορεί να γίνει:

$$E = \frac{d(BA)}{dt} \quad (2.12)$$

Επειδή το A είναι σταθερό και το πηνίο αποτελείται από πολλές σπείρες (N σπείρες) η (2.12) τελικά γίνεται:

$$E = NA \frac{dB}{dt} \quad (2.13)$$

Το μαγνητικό πεδίο B εξαρτάται από την κίνηση του ελατηρίου η οποία οφείλεται στην κατακόρυφη ταλάντωση του λόγω του ελατηρίου, δηλαδή:

$$\frac{dB}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dB}{dx} \xi' \quad (2.14)$$

Όπου ξ' η ταχύτητα του ελατηρίου.

Με βάση την (2.1) έχουμε:

$$\xi' = x' = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.15)$$

Επειδή οι σπείρες του πηνίου είναι κύκλοι έχουμε:

$$A = \pi r^2 \quad (2.16)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η τάση που παράγει το γεωφώνο προκύπτει από την σχέση:

$$E = \pi r^2 N \frac{dB}{dx} \omega x_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.17)$$

2.7 Κυκλωματική αναπαράσταση του γεωφώνου

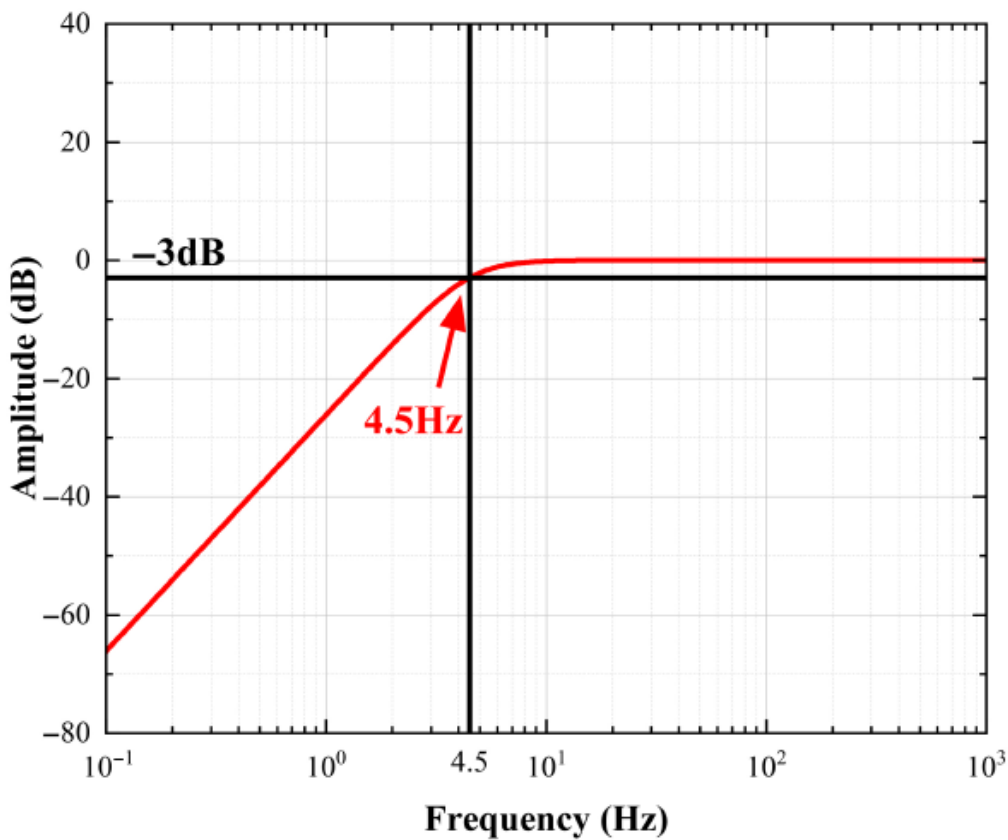
Το γεώφωνο σαν ηλεκτρομηχανικός αισθητήρας έχει την δυνατότητα να προσομοιωθεί εξολοκλήρου ως κυκλωματικό στοιχείο με την αντιστοίχιση των μηχανικών μελών του σε ηλεκτρονικά στοιχεία μέσω κατάλληλων εξισώσεων.

Το γεγονός αυτό προσφέρει τεράστιες δυνατότητες και διευκολύνσεις σε μηχανικούς και επιστήμονες που θέλουν να διαμορφώσουν την τελική απόκριση του σειсмоγραφικού συστήματος που σχεδιάζουν χρησιμοποιώντας ένα γεώφωνο του οποίου οι δυνατότητες από μόνες τους δεν είναι επαρκείς για τους σκοπούς τους. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να μεταβάλουν την έξοδο του ηλεκτρονικού κυκλώματος είτε αλλάζοντας είτε προσθέτοντας και αφαιρώντας κάποια στοιχεία του, όπως πυκνωτές και αντιστάσεις τα οποία είναι πολύ φθηνά, χωρίς να χρειάζεται να αντικαταστήσουν το γεώφωνο με κάποιο άλλο όταν οι τιμές που μπορεί να έχουν αυτοί οι αισθητήρες είναι τεράστιες.

Κατά την έρευνα τρόπων μετατροπής του φυσικού οργάνου σε κύκλωμα προσομοίωσης βρέθηκαν αρκετά άρθρα τα οποία παρουσίαζαν τρόπους ώστε να μπορεί γίνει αυτή η μετατροπή [20][22][23][24].

Σκοπός των ερευνητών ήταν τροποποίηση της απόκρισης συχνότητας του γεωφώνου για εύρος συχνοτήτων πολύ χαμηλότερων από αυτό που προσφέρει.

Η απόκριση συχνότητας ενός γεωφώνου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.3: Απόκριση συχνότητας του γεωφώνου [21]

Όπως παρατηρούμε από την παραπάνω εικόνα είναι πως το γεώφωνο λειτουργεί ως ένα φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων με συχνότητα αποκοπής $f_0 = 4.5\text{Hz}$.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι σχέσεις μεταξύ των μηχανικών και των ηλεκτρικών μεγεθών

Πίνακας 2.1: Σχέσεις μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών μεγεθών

Μηχανικοί τύποι	Ηλεκτρονικοί τύποι
$F = m \frac{du}{dt}$	$i = C \frac{du}{dt}$
$F = k \int u dt$	$i = \frac{1}{L} \int u dt$
$F = cu$	$i = \frac{u}{R}$
$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, 2\xi_0\omega_0 = \frac{c}{m}$	$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, 2\xi_0\omega_0 = \frac{1}{RC}$

Από τους παραπάνω τύπους μπορούμε να κάνουμε τις παρακάτω συσχετίσεις:

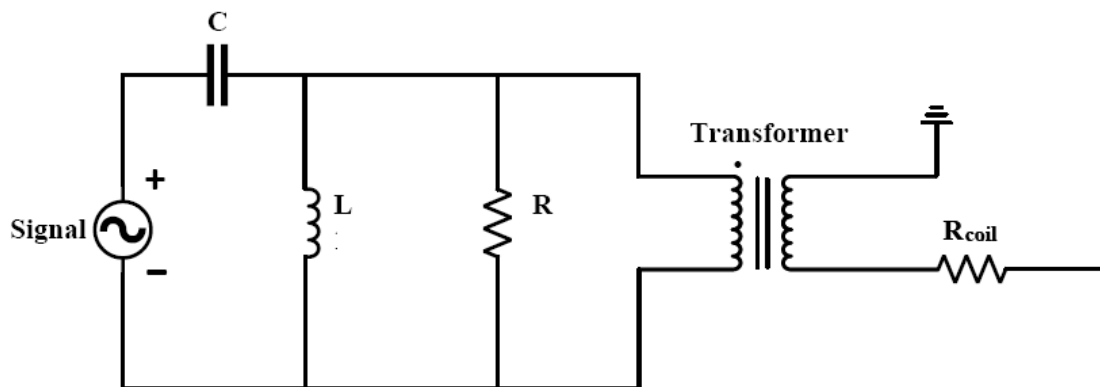
$$C = m \quad (2.17)$$

$$L = \frac{1}{k} \quad (2.18)$$

$$R = \frac{1}{c} \quad (2.19)$$

$$\text{Λόγος γυρισμάτων μετασχηματιστή } 1:K \quad (2.20)$$

Πρέπει να σημειωθεί πως τα ηλεκτρονικά στοιχεία μέσω των παραπάνω συσχετίσεων μπορεί να πάρουν τιμές οι οποίες να μην είναι δυνατό να υπάρξουν σε πραγματικές συνθήκες. Ωστόσο αυτό δεν έχει σημασία καθώς εδώ μας ενδιαφέρει το κομμάτι της προσομοίωσης. Από τα άρθρα που αναφέρθηκαν παραπάνω εξετάστηκαν πολλά από τα κυκλώματα προσομοίωσης που παρουσιάζουν ωστόσο στην δική μας περίπτωση καταλήξαμε στο παρακάτω:



Εικόνα 2.4: Ηλεκτρονικό μοντέλο γεωφώνου

2.8 Φίλτρα anti-aliasing

Κατά τη διαδικασία ψηφιοποίησης ενός αναλογικού σήματος είναι απαραίτητο να προηγηθεί φιλτράρισμα anti-aliasing [25][26].

Το aliasing αποτελεί φαινόμενο κατά το οποίο συχνότητες υψηλότερες από τη συχνότητα Nyquist αναδιπλώνονται στο φάσμα του σήματος, προκαλώντας αλλοίωση της πληροφορίας.

Για την αποφυγή του φαινομένου χρησιμοποιούνται φίλτρα χαμηλής διέλευσης πριν από τον ADC. Τα φίλτρα αυτά περιορίζουν τις υψηλές συχνότητες και απομακρύνουν θόρυβο που δεν μπορεί να ληφθεί ως δείγμα σωστά.

Στα συστήματα γεωφώνων χρησιμοποιούνται συνήθως ενεργά φίλτρα με τελεστικούς ενισχυτές, καθώς παρέχουν:

- σταθερότερη απόκριση
- μεγαλύτερη ακρίβεια
- δυνατότητα ενίσχυσης
- χαμηλότερο θόρυβο

Η επιλογή της συχνότητας αποκοπής εξαρτάται από τη συχνότητα δειγματοληψίας του ADC και το εύρος συχνοτήτων που επιθυμούμε να μετρήσουμε.

2.9 ADC και μικροελεγκτές σε συστήματα γεωφώνων

Η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό πραγματοποιείται μέσω μετατροπέων αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (Analog to Digital Converters – ADC).

Ο ADC δειγματοληπτεί την αναλογική τάση σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και μετατρέπει κάθε δείγμα σε ψηφιακή τιμή. Η ποιότητα της μετατροπής εξαρτάται από:

- τη συχνότητα δειγματοληψίας
- την ανάλυση του ADC
- τον θόρυβο του συστήματος
- τη σταθερότητα της τάσης αναφοράς

Η χρήση μικροελεγκτών σε συστήματα γεωφώνων έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια λόγω:

- χαμηλού κόστους
- ευκολίας προγραμματισμού
- μικρών διαστάσεων
- δυνατότητας διασύνδεσης με υπολογιστές
- ανάπτυξης φορητών συστημάτων μέτρησης

Η ψηφιακή επεξεργασία επιτρέπει την αποθήκευση, ανάλυση και απεικόνιση των σεισμικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο.

2.10 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο της λειτουργίας των γεωφώνων και των συστημάτων σεισμικής καταγραφής. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των σεισμολογικών οργάνων και στη δημιουργία των πρώτων ηλεκτρομαγνητικών γεωφώνων. Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας ενός γεωφώνου, οι κατηγορίες αισθητήρων και η αρχιτεκτονική ενός γεωφώνου τύπου moving-coil.

Επιπλέον παρουσιάστηκε οι μηχανικές εξισώσεις οι οποίες βασίζονται στην θεωρία των ταλαντώσεων και μέσω των οποίων περιγράφεται η δυναμική συμπεριφορά του αισθητήρα. Αναλύθηκε επίσης η ηλεκτρομαγνητική μετατροπή της μηχανικής κίνησης σε ηλεκτρική τάση μέσω εξισώσεων που προκύπτουν από συνδυασμό του νομού του Faraday για την επαγωγή και εξισώσεων της θεωρίας των ταλαντώσεων.

Το κυκλωματικό μοντέλο του γεωφώνου που παρουσιάστηκε και οι εξισώσεις που συνδέουν τις μηχανικές δυνατότητες με τα στοιχεία του ηλεκτρονικού του μοντέλου μπορούν να αξιοποιηθούν ως εισαγωγή για κάποιον που θέλει να κατανοήσει καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας του αισθητήρα όχι μόνο ως μηχανική συσκευή αλλά και ως κομμάτι ενός ολόκληρου συστήματος.

Τέλος, έγινε αναφορά στα συστήματα απόκτησης δεδομένων, στα φίλτρα anti-aliasing και στη χρήση ADC και μικροελεγκτών για την ψηφιακή καταγραφή των σημάτων του γεωφώνου. Το θεωρητικό αυτό υπόβαθρο αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη και υλοποίηση του συστήματος καταγραφής που παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

Κεφάλαιο 3ο: Μεθοδολογία

3.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία σχεδιασμού και υλοποίησης του συστήματος καταγραφής δονήσεων που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την ανάλυση των χαρακτηριστικών του σήματος εξόδου του γεωφώνου, τα στάδια αναλογικής προεπεξεργασίας, καθώς και τη διαδικασία ψηφιοποίησης και καταγραφής των δεδομένων μέσω μικροελεγκτή.

Αρχικά εξετάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του σήματος που παράγεται από το γεωφώνο και αναλύεται η συμπεριφορά του ως αισθητήρα ταχύτητας. Δεδομένου ότι το πλάτος της παραγόμενης τάσης είναι ιδιαίτερα μικρό και ευάλωτο σε θόρυβο, παρουσιάζεται η ανάγκη χρήσης ενίσχυσης για τη βελτίωση σήματος και το διαχωρισμό του από τον θόρυβο και καθώς και την την προσαρμογή του στο δυναμικό εύρος του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADC).

Στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία του φίλτρου χαμηλής διέλευσης (low-pass filter), το οποίο χρησιμοποιείται ως φίλτρο anti-aliasing πριν από τη δειγματοληψία. Παρουσιάζεται η επιλογή της συχνότητας αποκοπής, η επίδρασή της στη φασματική απόκριση του συστήματος και ο ρόλος της στην απομάκρυνση ανεπιθύμητων υψηλών συχνοτήτων και θορύβου.

Επιπλέον, περιγράφεται η συνδυασμένη λειτουργία φίλτρου και ενισχυτή, καθώς και τα κυκλώματα προστασίας και προσαρμογής του σήματος, όπως ο ψαλιδιστής τάσης (voltage clipper) και η εφαρμογή DC offset, ώστε το σήμα να παραμένει εντός των ορίων λειτουργίας του ADC και του μικροελεγκτή.

Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία ψηφιοποίησης μέσω του μετατροπέα A/D και η χρήση του Arduino Nano V3. Η συνολική μεθοδολογία στοχεύει στη δημιουργία ενός αξιόπιστου συστήματος καταγραφής σεισμικών και μηχανικών δονήσεων, ικανού να παρέχει μετρήσεις κατάλληλες για περαιτέρω ανάλυση και αξιολόγηση.

3.2. Χαρακτηριστικά σήματος γεωφώνου

Το γεωφώνο ως αισθητήρας ταχύτητας, έχει τάση εξόδου $V(t)$ η οποία είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας κίνησης του εδάφους

$$V(t) = G \times u(t) \quad (3.1)$$

Όπου

- G : Ευαισθησία γεωφώνου

Η εξίσωση αυτή αποτελεί συντομία της εξίσωσης (2.17) που περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 2.6

Το γεωφώνο της συγκεκριμένης εργασίας έχει

- ιδιοσυχνότητα 4.5 Hz
- Ευαισθησία 28.8 v/m/s

Το πλάτος της παραγόμενης τάσης κυμαίνεται από μερικά millivolt έως δεκάδες millivolt, ανάλογα με την ένταση του σεισμικού γεγονότος.

Η ιδιοσυχνότητα ορίζει το κατώφλι κάτω από το οποίο η απόκριση του αισθητήρα μειώνεται σημαντικά, ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες από αυτήν η συμπεριφορά του γεωφώνου προσεγγίζει γραμμική

απόκριση ταχύτητας. Το σήμα εξόδου ενός γεωφώνου χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό πλάτος τάσης και σχετικά χαμηλό εύρος συχνοτήτων. Η ακριβής μορφή του εξαρτάται από:

- την ένταση της μηχανικής διέγερσης,
- τη συχνότητα της δόνησης,
- την απόσταση από την πηγή δόνησης,
- τη μηχανική σύζευξη του αισθητήρα με το έδαφος,
- καθώς και από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του αισθητήρα.

Σε εφαρμογές σεισμικής καταγραφής, τα σήματα συχνά βρίσκονται μεταξύ λίγων μV έως κάποιων mV , γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα κρίσιμη τη σωστή σχεδίαση της αναλογικής βαθμίδας επεξεργασίας.

Το γεώφωνο παρουσιάζει συμπεριφορά ζωνοπερατού συστήματος, καθώς η απόκρισή του περιορίζεται από:

- τη φυσική ιδιοσυχνότητα,
- την απόσβεση,
- και τη μηχανική αδράνεια της κινούμενης μάζας.

Για συχνότητες κάτω από την ιδιοσυχνότητα, η απόκριση μειώνεται σημαντικά, επειδή η κινούμενη μάζα ακολουθεί σχεδόν πλήρως την κίνηση του περιβλήματος. Αντίθετα, για συχνότητες υψηλότερες της ιδιοσυχνότητας, η μάζα παραμένει σχεδόν ακίνητη λόγω αδράνειας και το σήμα εξόδου γίνεται ανάλογο της ταχύτητας του εδάφους.

Η συμπεριφορά αυτή καθιστά τα γεώφωνα ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές σεισμικής ανίχνευσης [27]:

- γεωτεχνικής παρακολούθησης,
- ανάλυσης κραδασμών,
- και monitoring κατασκευών.

3.3. Ανάγκη ενίσχυσης του σήματος

Το σήμα εξόδου του γεωφώνου δεν είναι άμεσα κατάλληλο για ψηφιοποίηση από μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (ADC), οι οποίοι απαιτούν τάσεις της τάξης των εκατοντάδων millivolt ή volt. Επιπλέον, χωρίς ενίσχυση, το σήμα είναι συγκρίσιμο με το επίπεδο θορύβου του συστήματος, γεγονός που μειώνει σημαντικά τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Η ενίσχυση του σήματος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στάδια του συστήματος απόκτησης δεδομένων.

Χωρίς επαρκή ενίσχυση, το σήμα του γεωφώνου:

- καταλαμβάνει μικρό μέρος του δυναμικού εύρους του ADC,
- επηρεάζεται έντονα από ηλεκτρικό θόρυβο,
- και οδηγεί σε χαμηλή ανάλυση μέτρησης.

Η χρήση ενισχυτή (amplifier) επιτρέπει:

- καλύτερη αξιοποίηση του ADC,
- μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα,
- και βελτιωμένη ποιότητα σήματος.

Ο ενισχυτής σχεδιάστηκε ώστε να διαθέτει:

- υψηλή αντίσταση εισόδου,

- χαμηλό θόρυβο,
- και γραμμική λειτουργία στην περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος.

Η υψηλή αντίσταση εισόδου είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αποτρέπει τη φόρτωση του γεωφώνου και τη μεταβολή της ηλεκτρομηχανικής του συμπεριφοράς.

Επιπλέον, η επιλογή του κατάλληλου operational amplifier επηρεάζει:

- το επίπεδο θερμικού θορύβου,
- το offset τάσης,
- το slew rate,
- και τη συνολική σταθερότητα του συστήματος.

Κατά την διαδικασία επεξεργασίας του σήματος του γεωφώνου της πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής τάσης με ενίσχυσης $A_v = 10$, ο οποίος τοποθετείται πριν από το φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Η έξοδος του γεωφώνου είναι χαμηλού πλάτους, συνεπώς η ενίσχυση είναι απαραίτητη ώστε το σήμα να προσαρμοστεί στο δυναμικό εύρος του μετατροπέα A/D. Η σχέση εισόδου-εξόδου του ενισχυτή δίνεται από:

$$V_{out} = A_v \cdot V_{in} \quad (3.2)$$

όπου $A_v = 10$. Η ενίσχυση αυτή βελτιώνει την εκμετάλλευση του δυναμικού εύρους του A/D και τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), δεδομένου ότι:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{signal}}{V_{noise}} \right) \quad (3.3)$$

Η επιλογή τοποθέτησης του ενισχυτή πριν το φίλτρο επιτρέπει την ενίσχυση του χρήσιμου σήματος πριν αυτό επηρεαστεί από το φιλτράρισμα, μειώνοντας τη σχετική επίδραση του θορύβου του επόμενου σταδίου

Ο ενισχυτής που χρησιμοποιείται είναι μη αναστρέφων (non-inverting) με υψηλή αντίσταση εισόδου, ώστε να μην επηρεάζεται η δυναμική συμπεριφορά του αισθητήρα.

Το κέρδος (gain) του ενισχυτή δίνεται από τη σχέση:

$$A_v = \frac{R_F}{R_G} + 1 \quad (3.4)$$

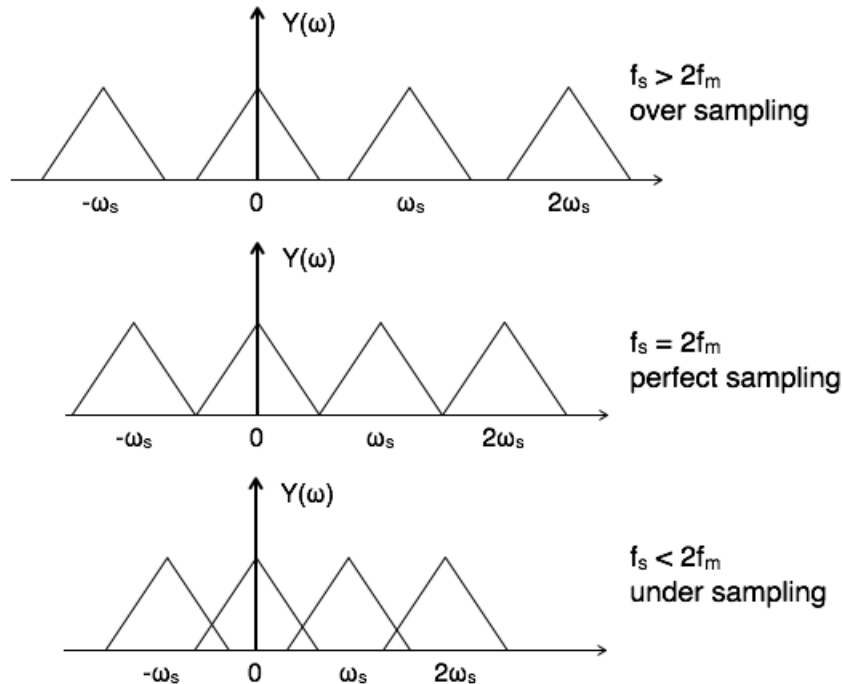
όπου R_F και R_G είναι οι αντιστάσεις του δικτύματος ανάδρασης.

3.4. Ρόλος του φίλτρου χαμηλής διέλευσης (Low-Pass)

Το φίλτρο anti-aliasing αποτελεί κρίσιμο στάδιο πριν τη δειγματοληψία. Η ύπαρξη συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων μπορεί να οδηγήσει σε:

- αναδίπλωση συχνοτήτων,
- ψευδή φασματικά στοιχεία,
- και αλλοίωση της πραγματικής πληροφορίας του σήματος.

Το φαινόμενο aliasing είναι μη αναστρέψιμο μετά τη δειγματοληψία, επομένως η αποφυγή του πρέπει να πραγματοποιείται στο αναλογικό στάδιο.



Εικόνα 3.2: Φαινόμενο aliasing [28]

Η επιλογή φίλτρου υψηλής τάξης προσφέρει:

- απλή υλοποίηση,
- χαμηλό κόστος,
- και ικανοποιητική απόκριση για πειραματική διάταξη.
- μεγαλύτερη κλίση απόσβεσης,
- καλύτερη καταστολή θορύβου,
- αλλά αυξημένη πολυπλοκότητα.

Στην αλυσίδα απόκτησης σήματος του γεωφώνου χρησιμοποιήθηκε στην πτυχιακή εργασία αναλογικό φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων 7ης τάξης (low-pass filter) με συχνότητα αποκοπής 30 Hz, το οποίο λειτουργεί και ως φίλτρο anti-aliasing πριν από τη διαδικασία δειγματοληψίας.

Στην παρούσα διάταξη, η επιλογή συχνότητας αποκοπής στα 30 Hz συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα δειγματοληψίας του συστήματος. Για παράδειγμα, σε σύστημα δειγματοληψίας 100 Hz, η συχνότητα Nyquist είναι 50 Hz· συνεπώς, η επιλογή αποκοπής σημαντικά χαμηλότερα (π.χ. 30 Hz) εξασφαλίζει επαρκή απόσβεση πριν το όριο Nyquist, μειώνοντας αποτελεσματικά το aliasing. Επιπλέον, το φίλτρο περιορίζει τον θόρυβο εξαιτίας των υψηλών συχνοτήτων που δεν σχετίζεται με τη φυσική διέγερση του γεωφώνου, βελτιώνοντας τον λόγο σήματος προς θόρυβο και την ποιότητα της μέτρησης. Συνεπώς, το φίλτρο αποτελεί κρίσιμο στάδιο προεπεξεργασίας, εξασφαλίζοντας ότι το ψηφιοποιημένο σήμα είναι φασματικά περιορισμένο και αντιπροσωπευτικό της πραγματικής δυναμικής απόκρισης του αισθητήρα.

Συνολικά, η επιλογή της συχνότητας αποκοπής στα 30 Hz πραγματοποιήθηκε ώστε να διατηρείται το χρήσιμο φάσμα λειτουργίας του γεωφώνου, το οποίο συγκεντρώνεται σε χαμηλές συχνότητες, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται επαρκής απομάκρυνση συνιστωσών υψηλών συχνοτήτων πριν από το όριο Nyquist. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται βέλτιστη διατήρηση της πληροφορίας και αποφυγής φαινομένων aliasing.

3.4 Συνδυασμένη λειτουργία ενισχυτή και φίλτρου

Η αλληλουχία των σταδίων της αναλογικής επεξεργασίας επηρεάζει άμεσα τη συνολική ποιότητα του σήματος. Στην παρούσα εργασία έχουμε την συγκεκριμένη διάταξη:

Γεώφωνο → Ενισχυτής → Low-pass φίλτρο → Clipper + offset → ADC

Η τοποθέτηση του ενισχυτή πριν το φίλτρο επιτρέπει:

- αύξηση του χρήσιμου σήματος,
- καλύτερη εκμετάλλευση του δυναμικού εύρους,
- και μείωση της σχετικής επίδρασης του θορύβου των επόμενων σταδίων.

Παράλληλα, το φίλτρο:

- απομακρύνει τις υψηλές συχνότητες,
- περιορίζει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές,
- και βελτιώνει τη σταθερότητα της δειγματοληψίας.

Το συνολικό σύστημα λειτουργεί ως αλυσίδα conditioning του σήματος, προσαρμόζοντας την έξοδο του αισθητήρα στις απαιτήσεις του ψηφιακού συστήματος.

Ο συνδυασμός ενισχυτή και φίλτρου χαμηλής διέλευσης αποτελεί κρίσιμο στάδιο προεπεξεργασίας πριν τη δειγματοληψία. Τα δύο αυτά στάδια οδηγούν σε βελτιωμένη ποιότητα σήματος, Η διάταξη αυτή επιτρέπει την ενίσχυση του χρήσιμου σήματος και τον ταυτόχρονο περιορισμό του θορύβου υψηλών συχνοτήτων, βελτιώνοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα της μέτρησης

Το τελικό σήμα χαρακτηρίζεται από:

- Ελαχιστοποιημένο DC offset.
- Βελτιωμένο λόγο σήματος προς θόρυβο.
- Κατάλληλο δυναμικό εύρος για περαιτέρω ψηφιακή ανάλυση.

3.5. Ψαλιδιστής τάσης (Voltage Clipper)

Μετά το χαμηλοπερατό φίλτρο, το σήμα οδηγείται σε κύκλωμα ψαλιδισμού τάσης (voltage clipper) το οποίο έχει ως σκοπό τον περιορισμό του εύρους της τάσης σε προκαθορισμένα επίπεδα. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση διόδων ή ενεργών στοιχείων, τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση του σήματος μόνο εντός συγκεκριμένων ορίων τάσης, αποκόπτοντας τις υπερβάσεις. Η χρήση ψαλιδιστή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προστασία του μετατροπέα A/D, καθώς αποτρέπει την είσοδο τάσεων εκτός του επιτρεπτού εύρους λειτουργίας του (0–5 V), οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν παραμόρφωση ή ακόμη και καταστροφή του μετατροπέα. Επιπλέον, συμβάλλει στη σταθεροποίηση του σήματος και στον περιορισμό αιχμών θορύβου. Ο ψαλιδιστής τάσης περιορίζει το σήμα εντός ασφαλών ορίων μέσω διόδων clamp. Όταν η τάση υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο, οι δίοδοι οδηγούνται άγουν και αποκόπτον το μη επιτρεπτό τμήμα του σήματος.

Οι στιγμιαίες αιχμές τάσης μπορεί να προκύψουν από:

- έντονες μηχανικές κρούσεις,
- ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές,
- ή μεταβατικά φαινόμενα κατά την εκκίνηση του κυκλώματος.

Οι αιχμές αυτές μπορούν να προκαλέσουν:

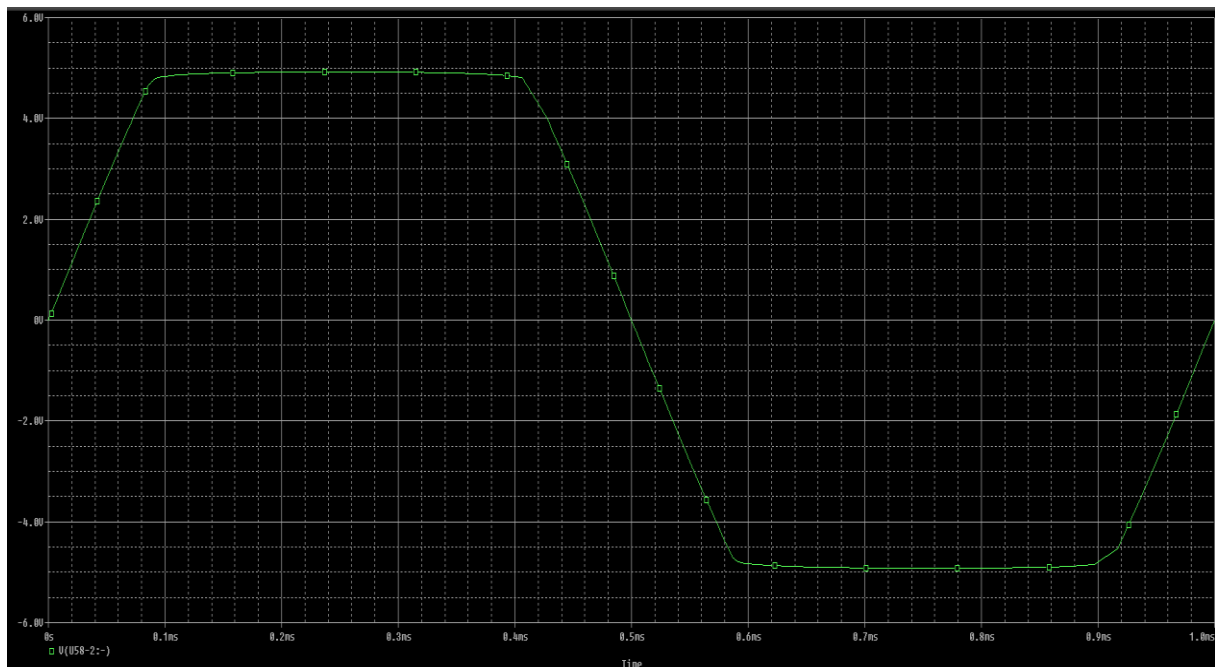
- κορεσμό του ADC,
- παραμόρφωση,

- ή ακόμη και καταστροφή ηλεκτρονικών στοιχείων.

Η χρήση clipper:

- αυξάνει την αξιοπιστία,
- προστατεύει τον μετατροπέα,
- και μειώνει τον κίνδυνο υπερτάσεων.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα σήμα εισόδου στα 20V p-p το οποίο έχει υποστεί ψαλιδισμό στα 10V p-p:



Εικόνα 3.3: Ψαλιδισμός σήματος στα 10V p-p

3.7. Offset τάσης 5V (DC Bias)

Το αναλογικό κύκλωμα παράγει συμμετρικό AC σήμα γύρω από τα 0 V. Ωστόσο, οι περισσότεροι adc και μικροελεγκτές:

- δεν μπορούν να διαβάσουν αρνητικές τάσεις,
- λειτουργούν μόνο σε θετικό εύρος τάσεων.

Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται DC offset, ώστε:

- το σήμα να μετατοπιστεί,
- να αποφευχθεί clipping αρνητικών ημιπεριόδων,
- και να αξιοποιηθεί πλήρως το εύρος του ADC.

Στην πράξη, το offset επιτρέπει:

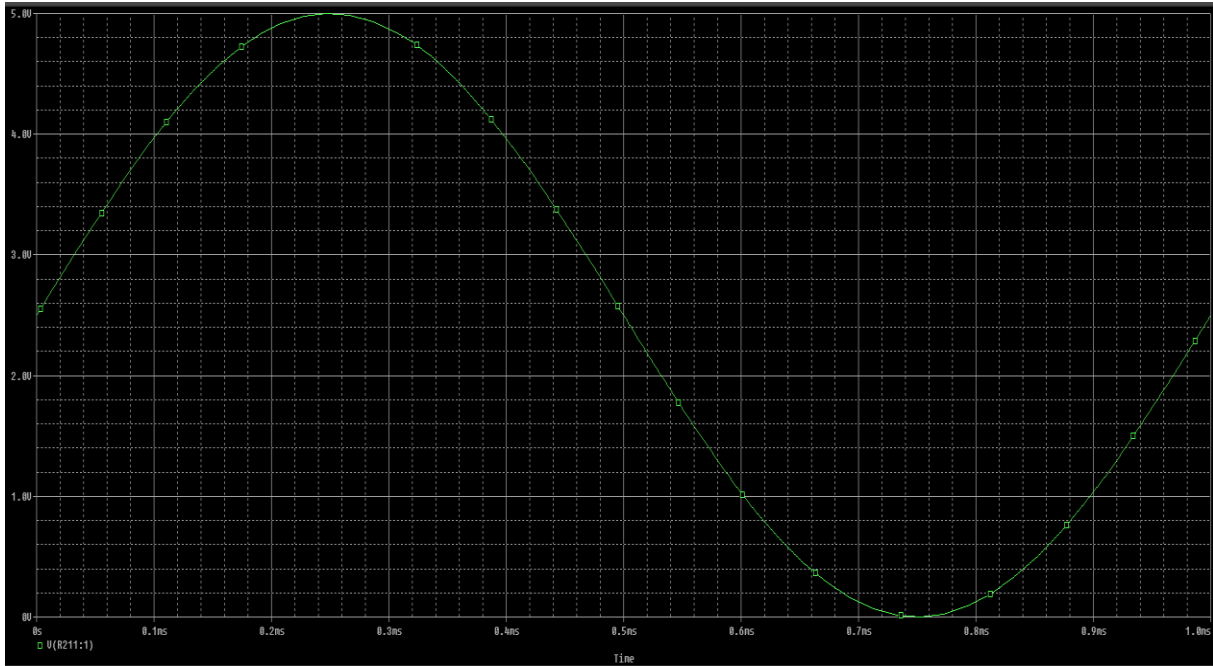
- ακριβέστερη δειγματοληψία,
- καλύτερη δυναμική περιοχή,
- και σωστή ανακατασκευή του αρχικού AC σήματος μέσω software.

Για την ορθή λειτουργία του συστήματος, εφαρμόστηκε μετατόπιση DC (offset) της τάσης κατά 5 V, η οποία συνδέεται με το κύκλωμα ψαλιδισμού. Η τάση μετά την εφαρμογή του offset δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{offset} = V_{signal} + V_{DC} \quad (4.5)$$

όπου $V_{DC} = 2.5V$. Για να μην υπάρχει απώλεια σήματος θα πρέπει $V_{signal} = 2.5V$ έτσι ώστε το τελικό σήμα να μην ξεπερνάει τα $5V$. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού εύρους του A/D χωρίς απώλεια πληροφορίας από αρνητικές τιμές αλλά και του σήματος γενικότερα.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα σήμα των $5V$ το οποίο έχει υποστεί επεξεργασία μέσω κυκλώματος offset:



Εικόνα 3.4: Σήμα μετά από εφαρμογή offset

3.8. Μετατροπές A/D (ADC)

Η διαδικασία μετατροπής αναλογικού σε ψηφιακό σήμα [29] περιλαμβάνει:

- Δειγματοληψία,
- Κβαντοποίηση,
- Κωδικοποίηση.

Η ανάλυση του ADC καθορίζει το μικρότερο βήμα τάσης που μπορεί να ανιχνευθεί. Για ADC 16-bit:

- υπάρχουν 63536 διακριτά επίπεδα,
- γεγονός που επιτρέπει τη διακριτική ικανότητα μικρών σημάτων.

Αν και η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist, στην πράξη χρησιμοποιείται μεγαλύτερη συχνότητα για:

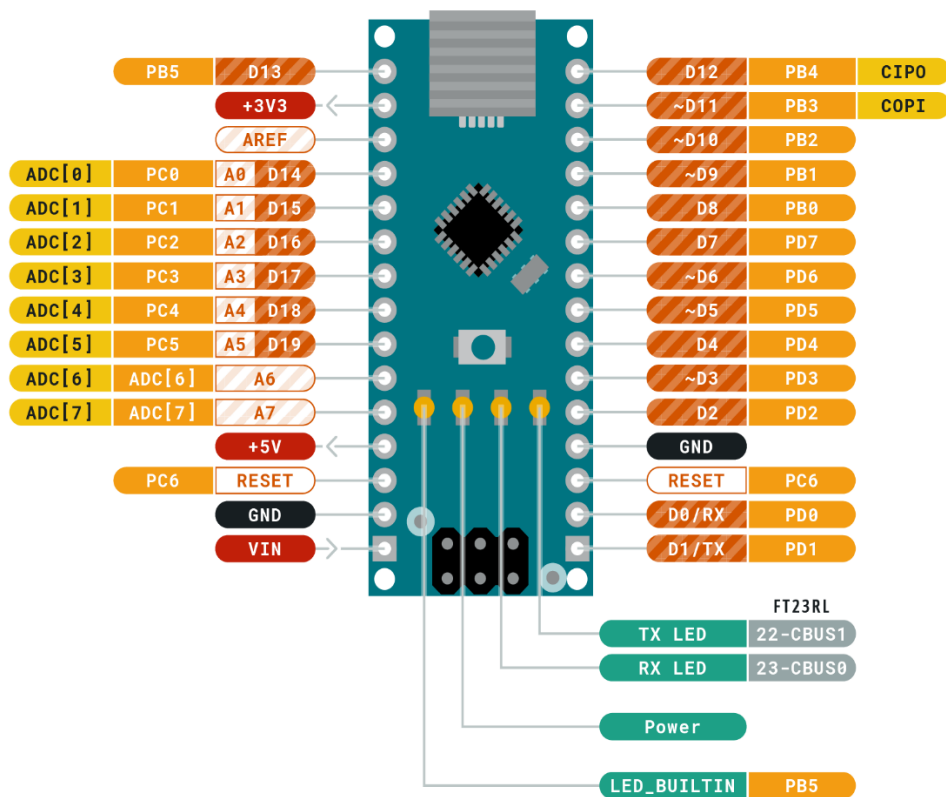
- καλύτερη φασματική ανάλυση,
- μικρότερο σφάλμα,
- και ασφαλέστερη αποφυγή aliasing.

Ο μετατροπές αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) λαμβάνει το φιλτραρισμένο, ενισχυμένο και περιορισμένο σήμα και το μετατρέπει σε διακριτή ψηφιακή μορφή. Η λειτουργία του βασίζεται στη δειγματοληψία και κβαντοποίηση του σήματος, με ανάλυση που καθορίζεται από τον αριθμό bits. Ο

ψαλιδιστής και το offset εξασφαλίζουν ότι το σήμα βρίσκεται εντός του επιτρεπτού εύρους του ADC, αποφεύγοντας κορεσμό και απώλεια δεδομένων.

3.9 Arduino Nano V3

Το Arduino Nano V3 χρησιμοποιείται ως πλατφόρμα μικροελεγκτή για την ανάγνωση και επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων από τον ADC. Βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328 και διαθέτει ενσωματωμένο ADC 16-bit, με τάση αναφοράς συνήθως 5 V. Το Arduino αναλαμβάνει τη δειγματοληψία του σήματος μέσω των αναλογικών εισόδων του, τη μετατροπή σε ψηφιακές τιμές και τη μεταφορά των δεδομένων σε υπολογιστή μέσω σειριακής επικοινωνίας. Η ευκολία προγραμματισμού και η συμβατότητα με πληθώρα αισθητήρων καθιστούν το Arduino κατάλληλο για πειραματικές διατάξεις και συστήματα καταγραφής χαμηλού κόστους.



Εικόνα 3.3: Εικονική περιγραφή του Arduino Nano [30]

Το Arduino Nano V3 είναι

- χαμηλού κόστους,
- μικρού μεγέθους,
- ευκολίας προγραμματισμού,
- και ευρείας υποστήριξης λογισμικού.

Ο μικροελεγκτής ATmega328 διαθέτει:

- ADC 10-bit,
- χρονιστή υψηλής ακρίβειας,
- σειριακή επικοινωνία UART,

- και δυνατότητα πραγματικού χρόνου δειγματοληψίας.

Η πλατφόρμα Arduino επιτρέπει:

- αποθήκευση μετρήσεων,
- real-time visualization,
- σειριακή μετάδοση δεδομένων,
- και εύκολη ενσωμάτωση για περαιτέρω ανάλυση.

Επιπλέον, η χρήση ανοικτού λογισμικού (open-source hardware/software) καθιστά τη διάταξη επεκτάσιμη και κατάλληλη για εκπαιδευτικές και ερευνητικές εφαρμογές.

3.10.Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η μεθοδολογία σχεδιασμού και υλοποίησης του συστήματος καταγραφής δονήσεων που βασίζεται σε γεώφωνο τύπου moving-coil με ιδιοσυχνότητα 4.5 Hz. Αρχικά αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά του σήματος εξόδου του αισθητήρα και η συμπεριφορά του ως αισθητήρα ταχύτητας, ενώ στη συνέχεια παρουσιάστηκε η ανάγκη ενίσχυσης του σήματος λόγω του μικρού πλάτους τάσης που παράγεται από το γεώφωνο.

Επιπλέον, έγινε περιγραφή των σταδίων αναλογικής προεπεξεργασίας του σήματος, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ενισχυτή, χαμηλοπερατού φίλτρου, ψαλιδιστή τάσης και κυκλώματος μετατόπισης DC offset. Τα κυκλώματα αυτά εξασφαλίζουν τη σωστή προσαρμογή του σήματος στις απαιτήσεις λειτουργίας του μετατροπέα A/D και συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας και της αξιοπιστίας της μέτρησης.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η διαδικασία ψηφιοποίησης μέσω ADC και η χρήση του Arduino Nano V3 ως μέσου δειγματοληψίας, επεξεργασίας και μεταφοράς των δεδομένων προς τον υπολογιστή. Η συνδυασμένη λειτουργία όλων των επιμέρους σταδίων επιτρέπει την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος για την καταγραφή και ανάλυση μηχανικών και σεισμικών δονήσεων.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο αυτό αποτελεί τη βάση για την πειραματική διαδικασία και την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

Κεφάλαιο 4ο: Αρχιτεκτονική και Υλοποίηση Συστήματος

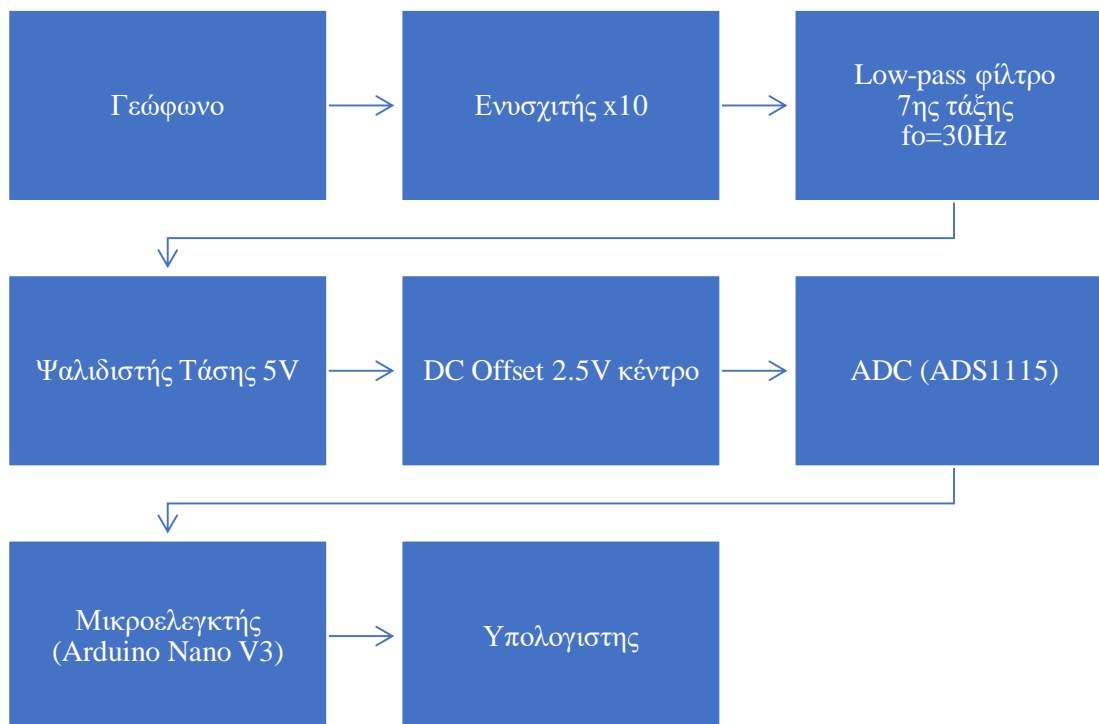
4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική και η υλοποίηση του συστήματος καταγραφής εδαφικών δονήσεων που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Σκοπός του συστήματος είναι η ανίχνευση δονήσεων μέσω γεωφώνου, ο οποίος αποτελεί τον αισθητήρα του κυκλώματος, η αναλογική επεξεργασία του σήματος και η ψηφιοποίηση του για περαιτέρω ανάλυση μέσω μικροελεγκτή.

Η συνολική διάταξη αποτελείται από διαδοχικά στάδια επεξεργασίας σήματος, τα οποία συνεργάζονται ώστε το ασθενές σήμα του γεωφώνου να μετατραπεί σε σταθερό και κατάλληλο σήμα για δειγματοληψία από το Arduino Nano V3. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα περιλαμβάνει:

- το γεώφωνο ως αισθητήρα δονήσεων,
- στάδιο ενίσχυσης σήματος,
- ενεργό χαμηλοπερατό φίλτρο,
- κύκλωμα ψαλιδισμού τάσης (clipping) στα 5V,
- κύκλωμα εφαρμογής DC offset,
- ψηφιοποίηση μέσω ADC.
- τελικό στάδιο επεξεργασίας του σήματος από μικροελεγκτή

Η συνολική διαδρομή του σήματος παρουσιάζεται ως block diagram στο σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1: Block diagram του συστήματος

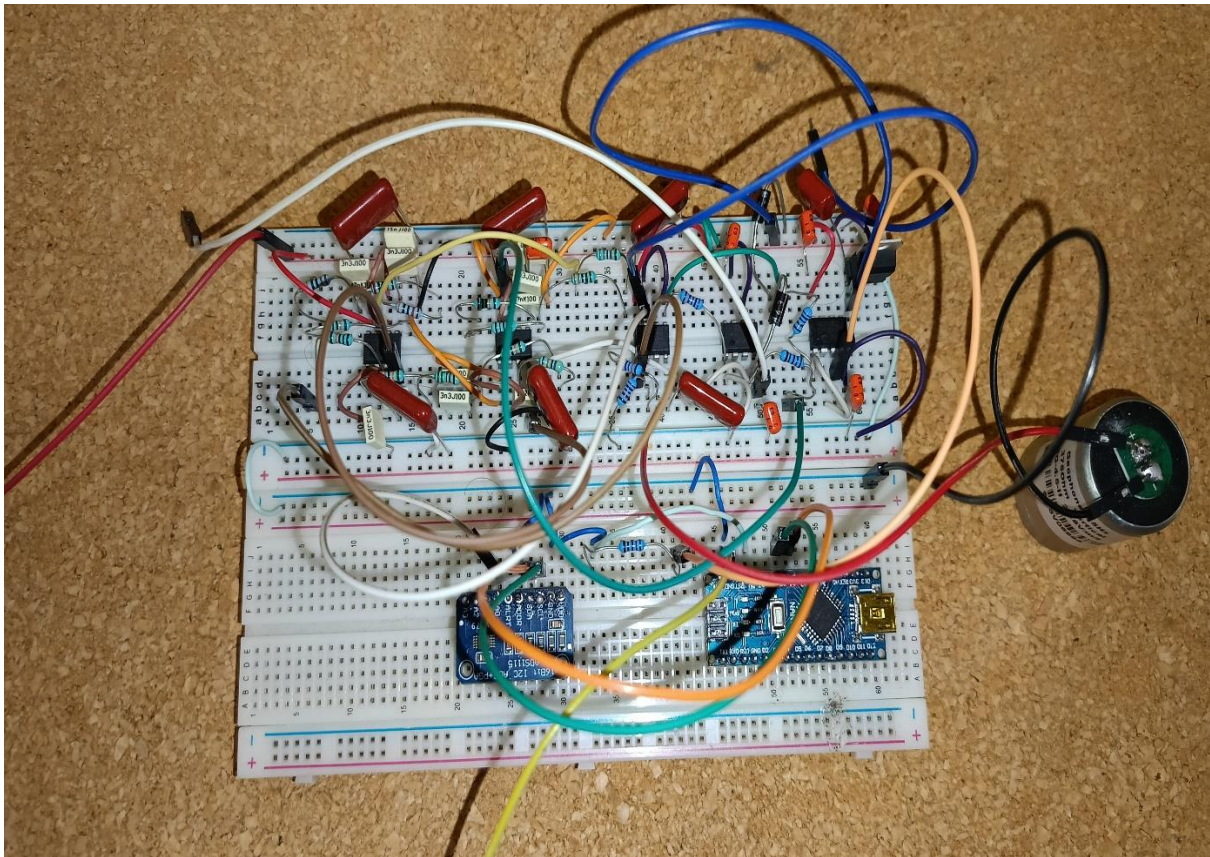
Κατά τη σχεδίαση δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση:

- στη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου,
- στην προστασία του ADC από υπερτάσεις,
- και στη διατήρηση της ποιότητας του αναλογικού σήματος.

Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι τελεστικοί ενισχυτές OPA2134 και MCP601, καθώς και παθητικά στοιχεία RC για την κατασκευή των βαθμίδων φιλτραρίσματος και προσαρμογής σήματος. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά:

- οι επιμέρους ηλεκτρονικές διατάξεις
- η λειτουργία κάθε βαθμίδας,
- η συνδεσμολογία του συστήματος,
- και οι σχεδιαστικές επιλογές που πραγματοποιήθηκαν κατά την ανάπτυξη της κατασκευής.

Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται το κύκλωμα υλοποιημένο πάνω στο ράστερ (breadboard).



Εικόνα 4.1: Το κύκλωμα πάνω στο ράστερ

4.2 Αναλογικό στάδιο του συστήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και αναλύονται οι επιμέρους αναλογικές διατάξεις τους συστήματος. Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ανοχή της τάξης του 1% ενώ οι πυκνωτές που χρησιμοποιήθηκαν είναι πολυεστερικοί, κατάλληλοι για σήματα χαμηλών συχνοτήτων. Μεταξύ της θετικής και της αρνητικής τροφοδοσίας των τελεστικών ενισχυτών και της γείωσης τοποθετήθηκαν πολυεστερικοί πυκνωτές αποσύζευξης (decoupling capacitors) των 100nF καθώς χωρίς αυτούς στις εξόδους των ενισχυτών παρατηρούνταν ανεπιθύμητες ταλαντώσεις. Ο σχεδιασμός των αναλογικών διατάξεων έγινε με την χρήση του Capture της OrCAD ενώ η προσομοίωση με την χρήση του PSpice της ίδιας εταιρίας.

4.2.1 Αισθητήρας

Στη συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιήθηκε γεωφώνο τύπου vertical moving magnet. Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι το EG-4.5-II της EGL [31], το οποίο παρουσιάζει υψηλή ευαισθησία σε χαμηλές συχνότητες και είναι κατάλληλο για εφαρμογές καταγραφής μικρών μηχανικών δονήσεων και σεισμικών σημάτων χαμηλής έντασης.



Εικόνα 4.2: EG-4.5-II από της EGL

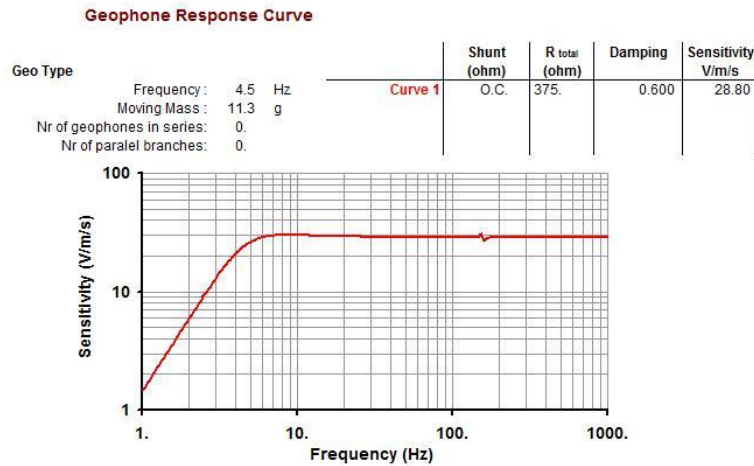
Η φυσική συχνότητα λειτουργίας του αισθητήρα είναι 4.5 Hz, γεγονός που επιτρέπει την αποτελεσματική ανίχνευση ταλαντώσεων χαμηλών συχνοτήτων. Η υψηλή ευαισθησία του γεωφώνου επιτρέπει την παραγωγή μετρήσιμου ηλεκτρικού σήματος ακόμη και για μικρές μετατοπίσεις της κινούμενης μάζας.

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωφώνου EG-4.5-II

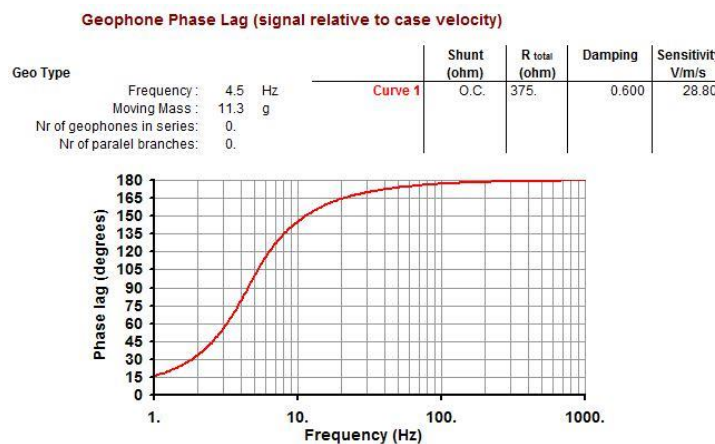
Παράμετρος	Τιμή
Τύπος	EG-4.5-II
Φυσική Συχνότητα	4.5Hz
Αντίσταση Πηνίου	375±5% Ω
Απόσβεση	0.6±5%
Ευαισθησία Εγγενούς Τάσης Ανοικτού Κυκλώματος	28.8 v/m/s ±5%
Αρμονική Παραμόρφωση	≤0.2%
Τυπική Παρασιτική Συχνότητα	≥140Hz
Κινούμενη Μάζα	11.3g
Τυπική Απόσταση Μεταξύ Των Σπειρών p-p	4mm
Επιτρεπόμενη Κλίση	≤20°
Ύψος	36mm
Διάμετρος	25.4mm
Βάρος	86g
Εύρος Θερμοκρασίας Λειτουργίας	-40°C με +100°C

Στον παραπάνω πίνακα δίνονται τα χαρακτηριστικά του γεωφώνου σύμφωνα με την σελίδα του κατασκευαστή και αντιστοιχούν σε θερμοκρασία λειτουργίας: 20°C ± 2°C

Στις παρακάτω δύο εικόνες βλέπουμε την απόκριση συχνότητας και της καθυστέρηση φάσης με βάση την συχνότητα του γεωφώνου αντιστοιχα:



Εικόνα 4.3: Απόκριση συχνότητας γεωφώνου



Εικόνα 4.4: Απόκλιση φάσης γεωφώνου με την συχνότητα

Η επιλογή του συγκεκριμένου γεωφώνου πραγματοποιήθηκε λόγω:

- της υψηλής ευαισθησίας του,
- της σχετικά φθηνής τιμής του σε σχέση με αντίστοιχα εξαρτήματα,
- της φυσικής συχνότητας του ή οποία είναι η χαμηλότερη στο εμπόριο,
- του μικρού μεγέθους,

Στους ακροδέκτες του γεωφώνου έχουν ενωθεί jumper τα οποία μέσω κλέμας ενώνονται με το κύκλωμα και τη πρώτη διάταξη που είναι η ενίσχυση.

4.2.2 Ενίσχυση

Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από το γεώφωνο παρουσιάζει μικρό πλάτος και απαιτεί ενίσχυση πριν την ψηφιοποίηση. Θεωρητικά η τάση που παράγεται μπορεί να είναι μέχρι και της τάξης των μV . Η ενίσχυση που επιλέχθηκε είναι $\times 10$. Για την υλοποίηση του κυκλώματος ο τελεστικός ενισχυτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο OPA2134PA που κατασκευάζεται από την BURR BROWN και βασίζεται σε

αυτών της Texas Instruments. Η διάταξη λειτουργεί ως μη αναστρέφων ενισχυτής (non-inverting amplifier), με το σήμα εισόδου να εφαρμόζεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Η ανάδραση πραγματοποιείται μέσω των αντιστάσεων R_{113} και R_{117} .

Η απολαβή τάσης του κυκλώματος δίνεται από:

$$A_v = \frac{R_f}{R_g} \quad (4.1)$$

όπου:

- $R_f = R_{113} = 100k\Omega$
- $R_g = R_{117} = 10k\Omega$

Επομένως:

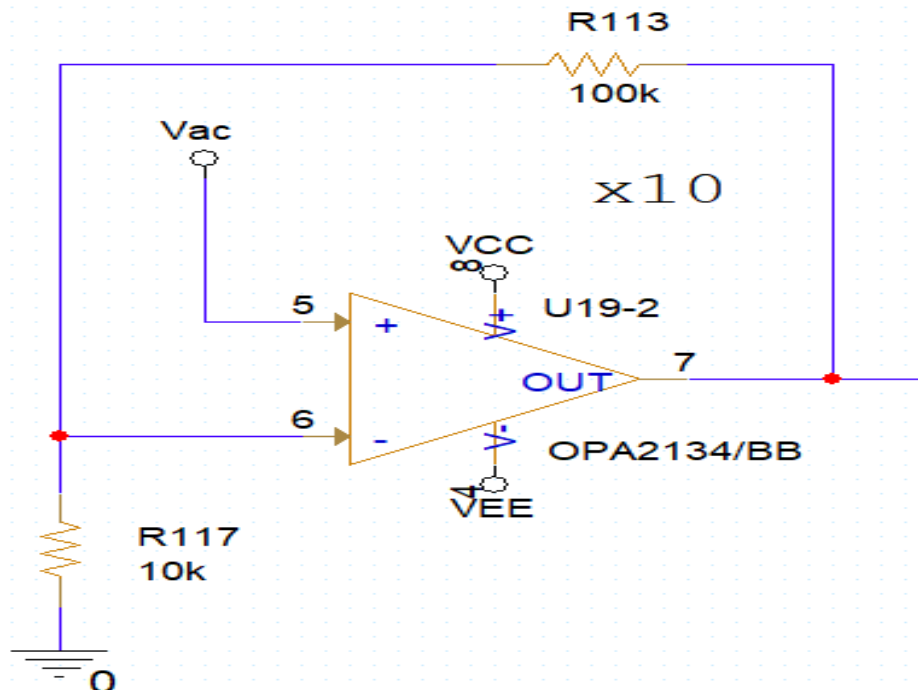
$$A_v = \frac{100k\Omega}{10k\Omega} = 10 \quad (4.2)$$

Η πραγματική ενίσχυση του σταδίου είναι περίπου $\times 10$, τιμή η οποία επιλέχθηκε ώστε να αυξηθεί το πλάτος του σήματος χωρίς να προκληθεί κορεσμός του επόμενου σταδίου.

Η χρήση του OPA2134 επιλέχθηκε λόγω:

- χαμηλού θορύβου,
- υψηλού slew rate,
- καλής συμπεριφοράς σε αναλογικές εφαρμογές ήχου και αισθητήρων,
- και σταθερής λειτουργίας σε εφαρμογές χαμηλής συχνότητας.

Το κύκλωμα του ενισχυτή παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



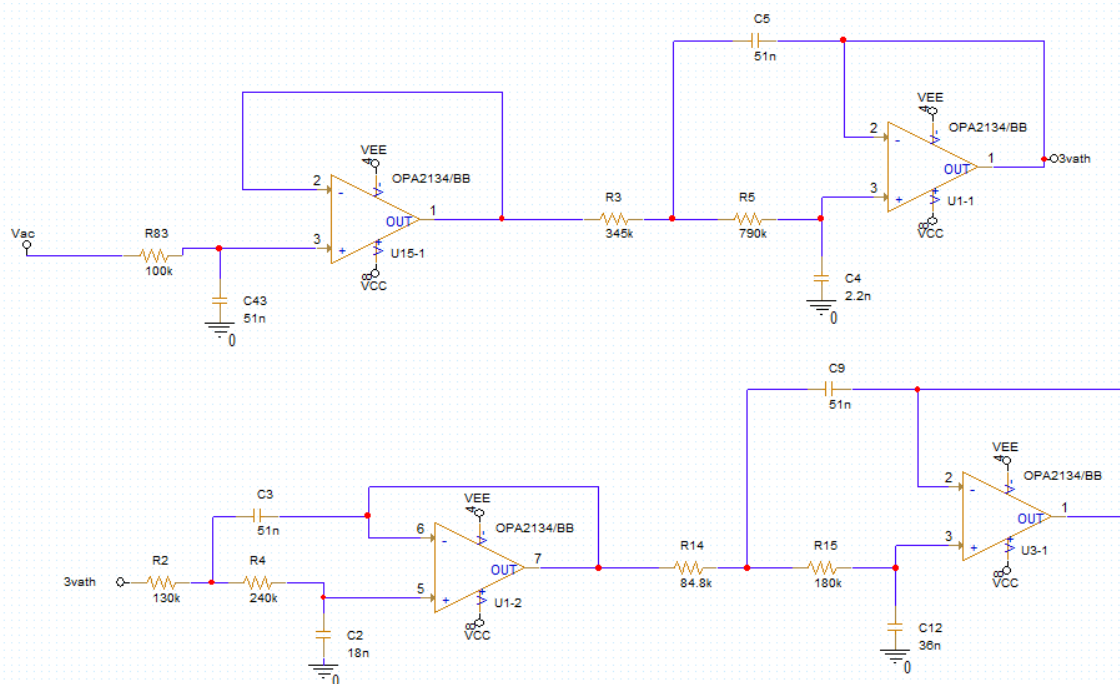
Εικόνα 4.5: Διάταξη ενίσχυσης

4.2.3 Ενεργό Χαμηλοπερατό φίλτρο (Low Pass)

Το αναλογικό φίλτρο, είναι ένα φίλτρο Butterworth 7ης τάξης, χρησιμοποιεί της αρχιτεκτονική Sallen-Key και υλοποιείται με τον OPA2134 όπως και η βαθμίδα της ενίσχυσης. Ως συχνότητα αποκοπής επιλέχθηκαν τα 30Hz. Η διάταξη σχεδιάστηκε ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική εξασθένηση ανεπιθύμητων υψηλών συχνοτήτων και βελτίωση της ποιότητας του σήματος πριν τη διαδικασία ψηφιοποίησης. Στο συγκεκριμένο φίλτρο δεν υπάρχει ενίσχυση.

Η διάταξη αποτελείται από τέσσερις βαθμίδες, τρεις βαθμίδες 2ου βαθμού και μία βαθμίδα 1ου βαθμού. Σύμφωνα πάντα με την αρχιτεκτονική Sallen-Key κάθε βαθμίδα λειτουργεί ως ακόλουθος τάσης (buffer) ώστε να απομονώνεται από τις υπόλοιπες χάρις στην υψηλή αντίσταση εξόδου του τελεστικού.

Ο θεωρητικός σχεδιασμός του φίλτρου έγινε με την χρήση του analog filter wizard της Analog Devices. Στην εικόνα 4.6 φαίνεται το φίλτρο.



Εικόνα 4.6: Ενεργό φίλτρο Butterworth 7ης τάξης

Ο υπολογισμός της συχνότητας και του Q factor δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

1η Βαθμίδα

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{83} C_{43}} = 31.2H \quad (4.3)$$

2η Βαθμίδα

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_3 R_5 C_5 C_4}} = 28.8Hz \quad (4.4)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_3 R_5 C_5 C_4}}{R_3 C_5 + R_5 C_5 + R_5 C_4} = 0.093 \quad (4.5)$$

3η Βαθμίδα

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_4 C_3 C_2}} = 29.7\text{Hz} \quad (4.6)$$

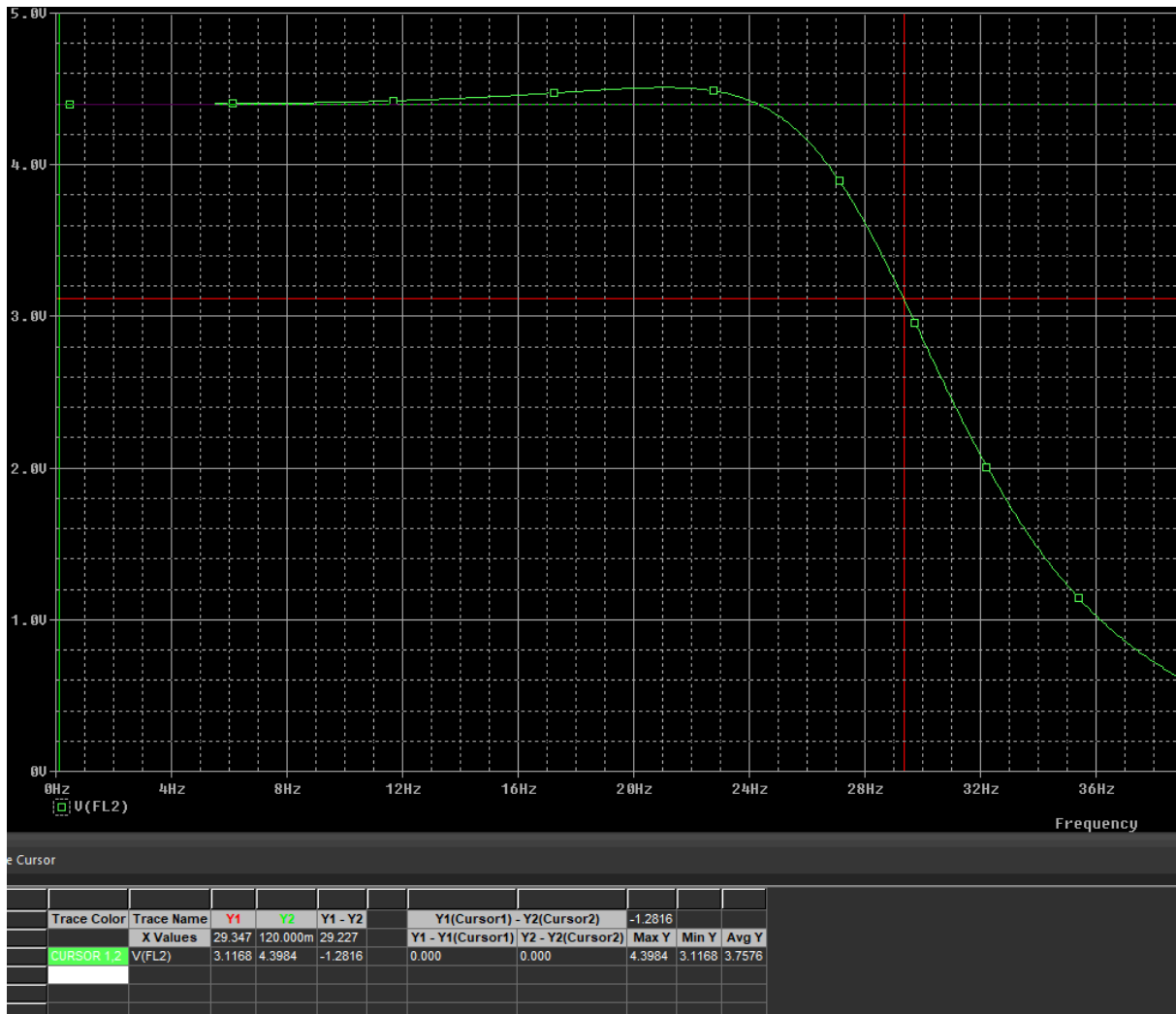
$$Q = \frac{\sqrt{R_2 R_4 C_3 C_2}}{R_2 C_3 + R_4 C_3 + R_4 C_2} = 0.231 \quad (4.7)$$

4η Βαθμίδα

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_{14} R_{15} C_9 C_{12}}} = 29.3\text{Hz} \quad (4.8)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_{14} R_{15} C_9 C_{12}}}{R_{14} C_9 + R_{15} C_9 + R_{15} C_{12}} = 0.267 \quad (4.9)$$

Σημειώνεται ότι οι πυκνωτές που χρησιμοποιήθηκαν δεν έχουν ίδια τιμή με αυτές του θεωρητικού σχεδιασμού αλλά είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά γίνεται. Επίσης οι τιμές των Q δεν είναι ίδιες με τις θεωρητικές που δίνονται από τον πίνακα Butterworth για πολλές βαθμίδες. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η απόκριση του τελικού φίλτρου με τιμές πυκνωτών όσο πιο κοντά γίνεται στις θεωρητικές και διαθέσιμους στην αγορά:



Εικόνα 4.7: Απόκριση συχνότητας πειραματικού φίλτρου

Παρατηρούμε ότι για είσοδο 4.4V το σήμα κοντά στα 30Hz (29.347Hz) πέφτει στα $4.4 \times 0.707 = 3.11\text{V}$ το οποίο σημαίνει πως η συχνότητα αποκοπής του πειράματος είναι ή επιθυμητή.

4.2.4 Αρχιτεκτονική κυκλώματος ψαλιδισμού τάσης και DC offset

Μετά το στάδιο του αναλογικού φίλτρου, το σήμα οδηγείται σε κύκλωμα ψαλιδισμού τάσης και εφαρμογής DC offset πριν την είσοδο στον ADC του Arduino Nano V3. Το στάδιο αυτό σχεδιάστηκε ώστε:

- να προστατεύει τον μικροελεγκτή από υψηλές τάσεις,
- να μετατοπίζει το σήμα σε θετικό εύρος τάσης,
- και να σταθεροποιεί την τελική κυματομορφή πριν τη δειγματοληψία.

Στάδιο περιορισμού τάσης

Κατά τις πρώτες δοκιμές του συστήματος παρατηρήθηκε ότι μετά το στάδιο ενίσχυσης το σήμα μπορούσε να ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια του ADC, ιδιαίτερα σε έντονες μηχανικές διεγέρσεις. Για τον λόγο αυτό προστέθηκε το κύκλωμα ψαλιδισμού (clipping) με διόδους Zener.

Η είσοδος του κυκλώματος προέρχεται από την έξοδο του φίλτρου και αρχικά περνά μέσω της αντίστασης R211 (10 kΩ). Η αντίσταση αυτή χρησιμοποιείται για περιορισμό του ρεύματος προς τις διόδους προστασίας και συμβάλλει στη σταθερότητα του ψαλιδισμού. Το κύκλωμα ψαλιδισμού αποτελείται από τις διόδους D36, D37 τύπου Zener με ονομαστική τάση περίπου 4.3 V.

Οι διόδοι τοποθετήθηκαν σε αντικριστή διάταξη ώστε να περιορίζουν τις κορυφές της κυματομορφής όταν η τάση ξεπερνά το επιθυμητό όριο λειτουργίας. Με την συγκεκριμένη συνδεσμολογία έχουμε ψαλιδισμό στα $4.3+0.7=5V$, τιμή που είναι ασφαλής για τη λειτουργία του ADC και του Arduino.

Κατά τις μετρήσεις με παλμογράφο οι κορυφές της κυματομορφής εμφανίζονταν επίπεδες μετά το όριο ψαλιδισμού, γεγονός που επιβεβαίωσε τη σωστή λειτουργία των Zener διόδων.

Η βαθμίδα αυτή προστατεύει τον ADC από υπερτάσεις, καθώς το επιτρεπτό εύρος λειτουργίας του είναι:

$$0V \leq V_{ADC} \leq 5V$$

Buffer απομόνωσης

Μετά το στάδιο ψαλιδισμού υπάρχει ένας buffer που χρησιμοποιεί τον OPA2134

Σκοπός του buffer είναι:

- η απομόνωση του σταδίου ψαλιδισμού από τα επόμενα στάδια,
- η σταθεροποίηση της κυματομορφής,
- και η αποφυγή φόρτωσης των διόδων Zener.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι χωρίς buffering ο ψαλιδισμός επηρεαζόταν από το επόμενο στάδιο offset, προκαλώντας μικρές αστάθειες στο σήμα. Η προσθήκη του OPA2134 βελτίωσε σημαντικά τη σταθερότητα της εξόδου. Έπειτα το σήμα περνάει την αντίστασή R212 και προστίθεται με αυτό που έρχεται από την διάταξη του offset.

Στάδιο εφαρμογής DC offset

Επειδή ο μετατροπέας A/D δέχεται μόνο θετικές τιμές (0-5V), το σήμα που φτάνει από τον ψαλιδιστή έχει και αρνητικές τιμές και για αυτό προτού μπει στον μετατροπέα πρέπει να μετακινηθεί προς θετικές τιμές και να είναι μέσα στο επιτρεπόμενο εύρος. Η τάση αναφοράς είναι 5V και προέρχεται μέσω της αντίστασης R215 (1 kΩ). Η συγκεκριμένη τάση μπορεί να παραχθεί είτε από έναν DC-DC converter (LM7805) είτε από τον μικροελεγκτή και η επιλογή αυτή γίνεται μέσω ενός διακόπτη ανάλογα την χρήση όπως θα γίνει αναφορά παρακάτω. Ο MCP602 ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε μονοπολική

τροφοδοσία χρησιμοποιείται ως buffer τάσης αναφοράς ώστε το offset να παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από μικρές μεταβολές φορτίου.

Στη συνέχεια το offset προστίθεται στο κύριο σήμα μέσω των αντιστάσεων, R212, R214 με αποτέλεσμα η τελική κυματομορφή να μετατοπίζεται προς θετικές τάσεις.

Τελικό στάδιο εισόδου

Το τελικό στάδιο του κυκλώματος υλοποιείται με τον τελεστικό ενισχυτή OPA2134, ο οποίος λειτουργεί επίσης ως buffer. Το συνολικό σήμα που μπαίνει στον τελεστικό υπολογίζεται μέσω υπέρθεσης των δύο επιμέρους σημάτων που προέρχονται από τα προηγούμενα στάδια και βρίσκεται από τον τύπο:

$$V_+ = V_{OUT(MCP602)} \times \frac{R_{212}}{R_{212} + R_{214}} + V_{OUT(OPA2134)} \times \frac{R_{214}}{R_{212} + R_{214}} \quad (4.10)$$

Έτσι πλέον το σήμα έχει ως κέντρο τα 2.5V και όχι τα 0V.

Ο ρόλος του buffer είναι:

- η σταθεροποίηση της τελικής εξόδου,
- η παροχή χαμηλής αντίστασης εξόδου προς τον ADC,
- και η αποφυγή αλληλεπιδράσεων μεταξύ offset και Arduino.

Κατά τη σύνδεση με το Arduino παρατηρήθηκε ότι το τελικό στάδιο εξόδου παρείχε αρκετά σταθερό σήμα χωρίς έντονες διακυμάνσεις ή θόρυβο, ακόμη και σε μεγαλύτερες εντάσεις δόνησης.

Συνολική λειτουργία της βαθμίδας

Η συνολική βαθμίδα ψαλιδισμού και offset αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τμήματα του συστήματος, καθώς επιτρέπει την ασφαλή διασύνδεση του αναλογικού κυκλώματος γεωφώνου με το ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων.

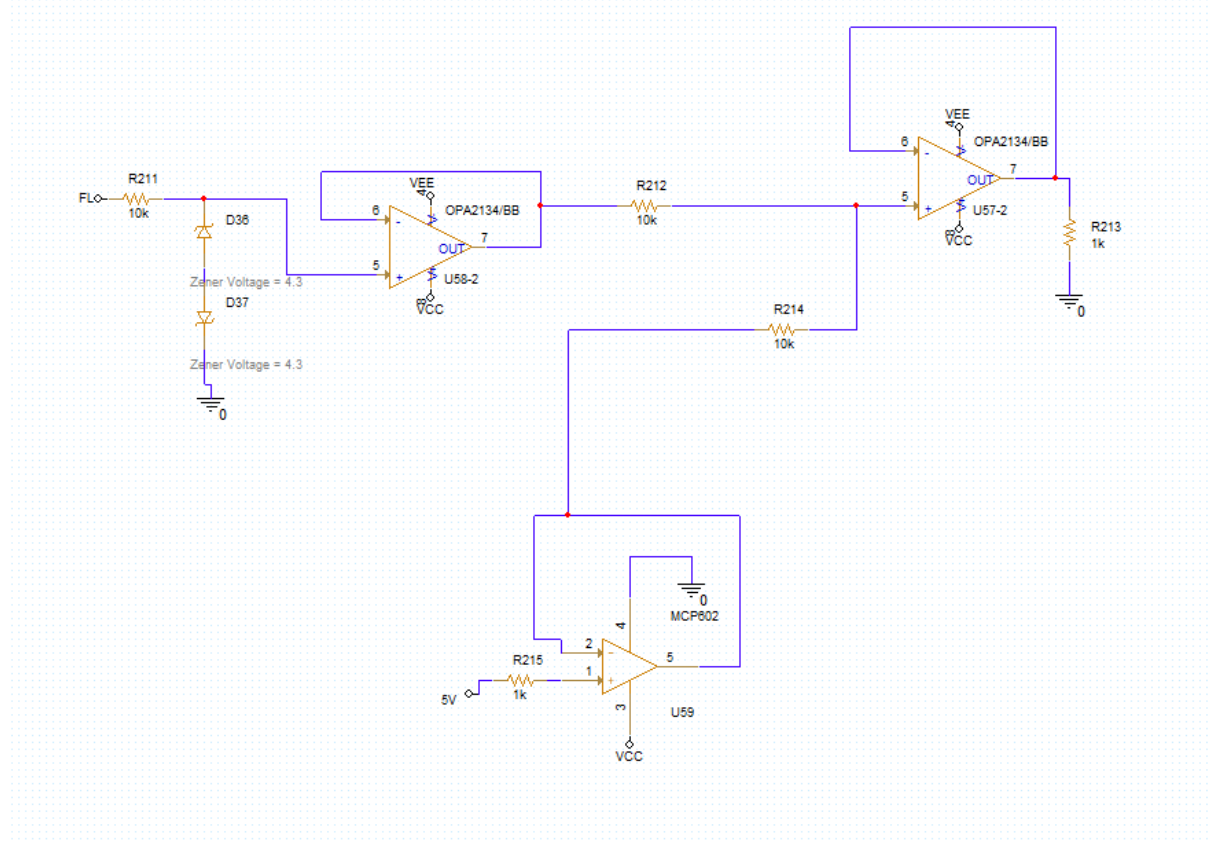
Συνολικά το κύκλωμα:

- περιορίζει επικίνδυνες κορυφές τάσης,
- μετατοπίζει την κυματομορφή σε θετικό εύρος,
- σταθεροποιεί το σήμα πριν τον ADC,
- και βελτιώνει τη συνολική αξιοπιστία των μετρήσεων.

Οι μετρήσεις με παλμογράφο έδειξαν:

- ψαλιδισμό περίπου στα 4.5 V,
- σταθερό offset περίπου 2.5 V,
- και ασφαλή λειτουργία κατά τη σύνδεση με το Arduino Nano V3.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την συγκεκριμένη βαθμίδα:



Εικόνα 4.8: Διάταξη offset και ψαλιδιστή

4.2.5 Διακόπτης επιλογής τροφοδοσίας 5V

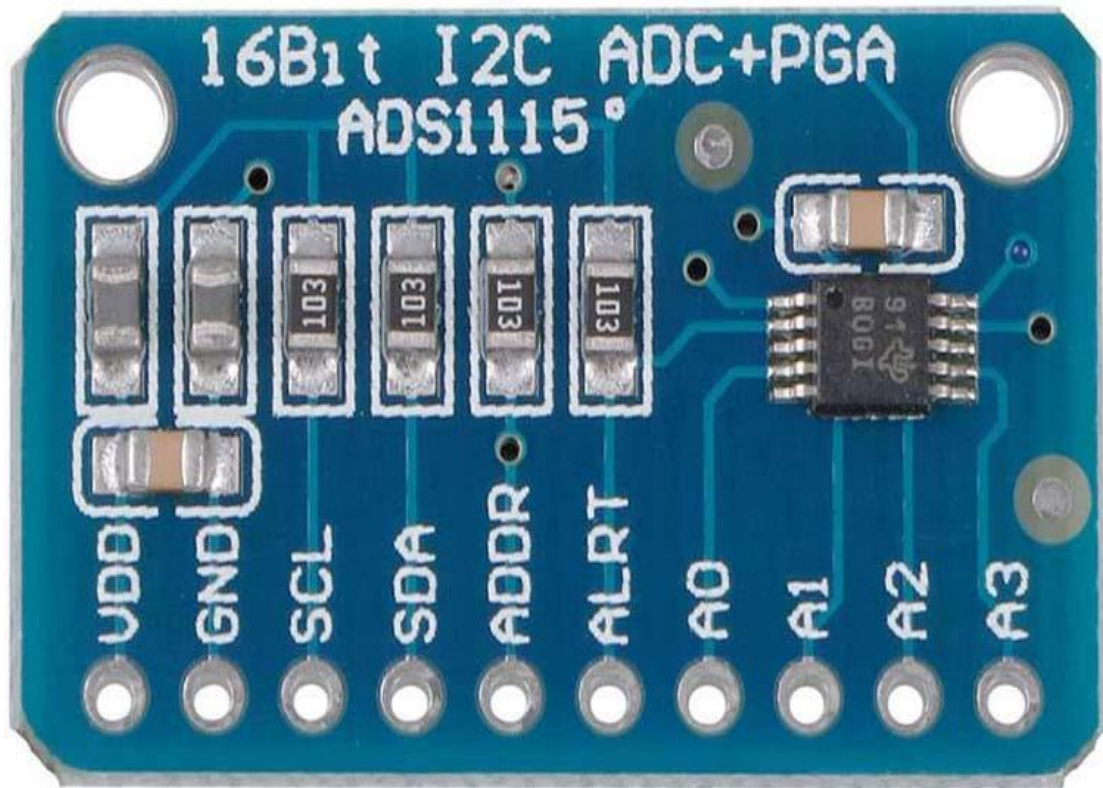
Μετά την ολοκλήρωση του αναλογικού σχεδιασμού και αναζήτησης των ψηφιακών μέσων (μετατροπέα και μικροελεγκτή) διαπιστώθηκε πως η παροχή των 5V που είναι απαραίτητα τόσο για το offset όσο και για τον μετατροπέα μπορεί να γίνει και μέσω του μικροελεγκτή πέρα από τον DC-DC Converter. Επιπλέον ο ακροδέκτης των 5V του μικροελεγκτή αν συνδέεται απευθείας με τον DC-DC Converter θα πρέπει να λειτουργεί ως είσοδος ενώ σε περίπτωση που ο μικροελεγκτής είναι συνδεδεμένος στον υπολογιστή ο ακροδέκτης λειτουργεί ως έξοδος κάτι που δημιουργεί πρόβλημα αφού σε αυτήν την περίπτωση δεν πρέπει να δέχεται 5V. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την εισαγωγή ενός διακόπτη μεταξύ της εξόδου του DC-DC Converter και του κόμβου στον οποίο συνδέονται ο ακροδέκτης των 5V του μικροελεγκτή, ο ακροδέκτης του VCC του μετατροπέα A/D και η αντίσταση που καταλήγει στην μη αναστρέφουσα είσοδο του buffer της διάταξης offset. Έτσι αν και η συγκεκριμένη εργασία προορίζεται για λειτουργία του μικροελεγκτή μέσω υπολογιστή σε μελλοντική προσπάθεια βελτίωσης για αυτόνομη λειτουργία της πλακέτας, μέσω του διακόπτη θα μπορεί να επιλέγεται ο DC-DC Converter για την παροχή των 5V.

4.3 Ψηφιακό στάδιο

4.3.1 Μετατροπέας A/D

Για την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και την επεξεργασία του από τον μικροελεγκτή απαιτείται η χρήση ενός μετατροπέα A/D. Αν και ο μικροελεγκτής του συστήματος που επιλέχθηκε και αναλύεται παρακάτω έχει ενσωματωμένο μετατροπέα προτιμήθηκε ο ADS1115 της Texas Instruments

επειδή έχει καλύτερη ανάλυση. Συγκεκριμένα έγινε η αγορά έτοιμου module το οποίο έχει επάνω του το chip και επιτρέπει εύκολα την ενσωμάτωση του στο υπόλοιπο κύκλωμα.



Εικόνα 4.9 Έτοιμο module ADS1115

Βασικά χαρακτηριστικά του ADS1115

Ο μετατροπέας ADS1115 είναι ένας Δ/Σ ADC υψηλής ακρίβειας 16-bit με δυνατότητα επικοινωνίας μέσω διαύλου I2C. Συγκεκριμένα:

- Τάση τροφοδοσίας 5V
- Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας 860 Samples/sec
- 16-bit ανάλυση
- 4 κανάλια εισόδου
- Δυνατότητα επικοινωνίας μέσω διαύλου I2C
- Εσωτερικός προγραμματιζόμενος ενισχυτής (PGA)
- Εσωτερικός πολυπλέκτης (Multiplexer) στις εισόδους
- Συγκριτής Ακρίβειας

Τα τέσσερα κανάλια μπορούν να λειτουργήσουν σε single-ended και σε differential mode.

Ο ακροδέκτης ALRT στέλνει ειδοποιήσεις και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποια λειτουργία σύγκρισης της τάσης εισόδου με μία τάση αναφοράς που επιλέγει ο χρήστης.

Μεταξύ των ακροδεκτών SCL και SDA και της VCC υπάρχουν πάνω στο module έτοιμες pull-up αντιστάσεις και έτσι δεν χρειάζεται η τοποθέτηση τους εξωτερικά στον σχεδιασμό.

Διαμόρφωση Δ/Σ

Η διαμόρφωση Δ/Σ είναι μια μέθοδος υπερδειγματοληψίας (oversampling) για την κωδικοποίηση σημάτων σε ψηφιακά σήματα χαμηλού βάθους bit με πολύ υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας, επιτρέποντας την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας ακόμη και για πολύ μικρά σήματα. Η διαμόρφωση Δ/Σ επιτυγχάνει υψηλή ποιότητα χρησιμοποιώντας έναν βρόχο αρνητικής ανάδρασης κατά τη διάρκεια της κβαντοποίησης στο χαμηλότερο βάθος bit, ο οποίος διορθώνει συνεχώς τα σφάλματα κβαντοποίησης και μεταφέρει τον θόρυβο κβαντοποίησης σε υψηλότερες συχνότητες, πολύ πάνω από τη συχνότητα Nyquist. Έπειτα εφαρμόζεται ψηφιακό χαμηλοπερατό φίλτράρισμα και υποδειγματοληψία (subsampling), ώστε να εξαχθεί το τελικό ψηφιακό σήμα υψηλής ανάλυσης.

Ανάλυση 16-bit και ακρίβεια μετατροπής

Η βασική διαφορά του ADS1115 σε σχέση με τον εσωτερικό ADC του Arduino Nano είναι η πολύ υψηλότερη ανάλυση. Η υψηλή αυτή ανάλυση προσφέρει:

- μικρότερο σφάλμα κβαντισμού,
- μεγαλύτερη ευαισθησία,
- καλύτερη ανίχνευση μικρών μεταβολών τάσης,
- και βελτιωμένο SNR.

Η ανάλυση 16-bit σημαίνει ότι το εύρος τάσης χωρίζεται σε:

$$2^{16} = 65536 \quad (4.11)$$

διακριτές στάθμες κβαντισμού.

Κάθε βήμα (LSB) αντιστοιχεί σε τάση που ορίζεται από τον τύπο:

$$LSB = \frac{FSR}{2^{16}} \quad (4.12)$$

Λόγω του εσωτερικού PGA το FSR μπορεί να αλλάξει και έτσι έχουμε μεταβλητό FSR. Συγκεκριμένα ο κατασκευαστής δίνει αυτές τις τιμές:

Πίνακας 4.2: LSB με βάση το FSR

FSR	LSB
±6.144V	187.5μV
±4.096V	125μV
±2.048V	62.5μV
±1.024V	31.25μV
±0.512V	15.625μV
±0.256V	7.8125μV

Για τον υπολογισμό του LSB ο υπολογισμός γίνεται με το διπλάσιο της τιμής του FSR που του αντιστοιχεί, έτσι δηλαδή τα 125μV προέκυψαν από την σχέση:

$$LSB = \frac{FSR}{2^{16}} = 125\mu V = \frac{2 \times 4.096}{2^{16}} \quad (4.13)$$

Επικοινωνία μέσω διαύλου I2C

Η διασύνδεση του ADS1115 με το Arduino Nano V3 πραγματοποιείται μέσω του σειριακού διαύλου I2C χρησιμοποιώντας:

- τη γραμμή SDA (Serial Data),
- και τη γραμμή SCL (Serial Clock).

Στην αρχιτεκτονική αυτή:

- το ADS1115 λειτουργεί ως slave συσκευή,
- ενώ το Arduino Nano λειτουργεί ως master.

Προγραμματισμός του ADC

Η συχνότητα αποκοπής του αναλογικού σταδίου είναι $f_0=30\text{Hz}$. Αυτό σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist ή ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι:

$$f_{nyquist} = 2 \times f_0 = 60\text{Hz} \quad (4.14)$$

Η σχέση που συνδέει το SPS (samples per second) και την συχνότητα είναι :

$$N = \frac{SPS}{f} \quad (4.15)$$

Όπου N τα δείγματα ανά περίοδο.

Μετά από δοκιμές με διαφορετικά SPS από αυτά που υποστηρίζει ο ADC επιλέχθηκαν τα 475 SPS τα οποία για συχνότητα ίση με την φυσική συχνότητα του γεωφώνου αντιστοιχούν περίπου με $N=105$ τα οποία είναι υπεραρκετά για τις ανάγκες της εργασίας.

Ως FSR επιλέχθηκε $FSR=\pm 4.096\text{V}$ το οποίο αντιστοιχεί σε $LSB=125\mu\text{V}$

4.3.2 Arduino Nano V3

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη εργασία είναι το Arduino Nano V3 καθώς είναι ιδανικό για κόλληση σε πλακέτα και πολύ φθηνό.

Το Arduino Nano αναλαμβάνει:

- την επικοινωνία με τον ADC μέσω I2C,
- τη λήψη των ψηφιακών μετρήσεων,
- την επεξεργασία των δεδομένων,
- καθώς και την αποστολή ή αποθήκευση των αποτελεσμάτων.

Η χρήση του μικροελεγκτή στο τελικό στάδιο της αρχιτεκτονικής επιτρέπει την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου ενσωματωμένου συστήματος μέτρησης χαμηλού κόστους και υψηλής αξιοπιστίας.



Εικόνα 4.10 Arduino Nano

Βασικά χαρακτηριστικά Arduino Nano V3

Το Arduino Nano βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328P της Microchip Technology και διαθέτει ενσωματωμένες δυνατότητες επεξεργασίας και σειριακής επικοινωνίας.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά Arduino Nano

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μικροελεγκτής	ATmega328P
Συχνότητα λειτουργίας	16 MHz
Τάση λειτουργίας	5 V
Flash memory	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Ψηφιακά I/O	22
Επικοινωνία	UART, SPI, I2C
Clock Speed	16 MHz

Επικοινωνία με το ADS1115

Η επικοινωνία μεταξύ Arduino Nano και ADS1115 πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου I2C.

Το Arduino λειτουργεί ως master συσκευή και:

- αποστέλλει εντολές ρύθμισης στον ADC,
- επιλέγει κανάλια μέτρησης,
- και διαβάζει τις ψηφιακές τιμές μετατροπής.

Η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω:

- της γραμμής SDA,
- και της γραμμής SCL.

Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει:

- αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων,
- χαμηλή πολυπλοκότητα συνδέσεων,
- και δυνατότητα επέκτασης με επιπλέον I2C συσκευές.

Ψηφιακή επεξεργασία δεδομένων

Μετά τη λήψη των δεδομένων από το ADS1115, το Arduino εκτελεί λειτουργίες ψηφιακής επεξεργασίας όπως:

- averaging,
- moving average filtering,
- threshold detection,
- peak detection,
- και έλεγχο συνθηκών λειτουργίας.

Η επεξεργασία πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο χάρη στη συχνότητα λειτουργίας των 16 MHz του ATmega328P.

Η δυνατότητα προγραμματισμού μέσω του Arduino IDE επιτρέπει εύκολη ανάπτυξη και τροποποίηση των αλγορίθμων επεξεργασίας.

Ρόλος του Arduino στην αρχιτεκτονική

Σε αντίθεση με μια τυπική εφαρμογή όπου ο μικροελεγκτής χρησιμοποιεί τον εσωτερικό του ADC, στην παρούσα αρχιτεκτονική το Arduino Nano χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως:

- μονάδα ελέγχου,
- επεξεργαστής δεδομένων,
- και διεπαφή επικοινωνίας.

Η μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου από τον εξωτερικό ADC ADS1115, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά:

- την ακρίβεια,
- την ανάλυση,
- και τη σταθερότητα των μετρήσεων.

Έτσι το Arduino επεξεργάζεται ήδη ψηφιοποιημένα δεδομένα υψηλής ποιότητας.

Συμπέρασμα

Το Arduino Nano V3 αποτελεί το τελικό στάδιο επεξεργασίας και διαχείρισης δεδομένων της αρχιτεκτονικής του συστήματος.

Μετά:

- το στάδιο προστασίας,
- το αναλογικό filtering,
- και τη μετατροπή μέσω ADS1115,

αναλαμβάνει:

- τη λήψη των ψηφιακών δεδομένων,
- την επεξεργασία τους,
- και την αποστολή τους προς εξωτερικά συστήματα.

Η συνεργασία:

- signal conditioning,
- anti-aliasing φίλτρου,
- ADS1115,
- και Arduino Nano

δημιουργεί μία ολοκληρωμένη και αξιόπιστη αλυσίδα acquisition και επεξεργασίας αναλογικών σημάτων υψηλής ακρίβειας.

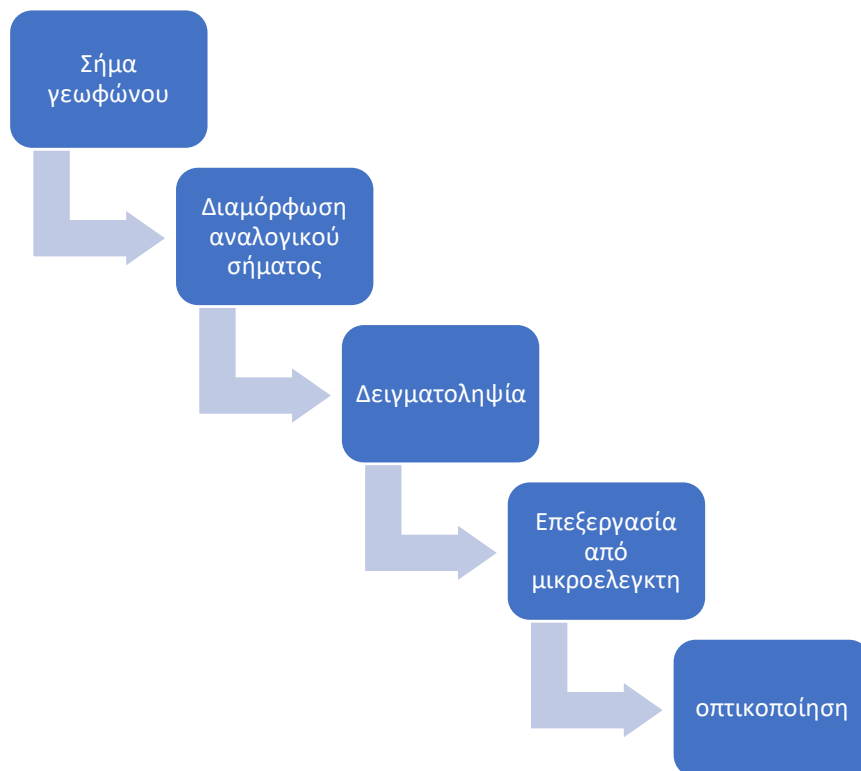
4.4 Τροφοδοσία συστήματος

Η τροφοδοσία των αναλογικών στοιχείων (τελεστικοί ενισχυτές και DC-DC converter) γίνεται αποκλειστικά μέσω μπαταριών των 9V με εξαίρεση την διάταξη του offset. Επιλέχθηκαν δύο μπαταρίες ώστε να δημιουργούν διπολική τροφοδοσία για τους τελεστικούς. Ο LM7805 τροφοδοτείται από μονοπολική τροφοδοσία. Η τροφοδοσία των ψηφιακών τμημάτων (ADC και Arduino) αλλά και του offset γίνεται μέσω της διάταξης με τον διακόπτη όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.5.

4.5 Διάγραμμα Ροής

Το λογισμικό του συστήματος υλοποιήθηκε στο περιβάλλον Arduino IDE και είναι υπεύθυνο για τη συλλογή, ψηφιοποίηση και αποστολή των δεδομένων που προέρχονται από το γεώφωνο. Η βασική λειτουργία του προγράμματος είναι η συνεχής δειγματοληψία του αναλογικού σήματος και η μεταφορά των δεδομένων στον υπολογιστή για παρακολούθηση και ανάλυση.

Η συνολική ροή λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Ροής

Οπτικοποίηση και ανάλυση δεδομένων

- Τα δεδομένα που συλλέγονται από το Arduino μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:
- παρακολούθηση κυματομορφών,
- υπολογισμό peak amplitude,
- RMS ανάλυση,
- και βασική συχνοτική ανάλυση.

Η οπτικοποίηση των δεδομένων επέτρεψε την αξιολόγηση της λειτουργίας των επιμέρους βαθμίδων του κυκλώματος, όπως:

- του φίλτρου χαμηλής διέλευσης,
- του ψαλιδιστή,
- και του DC offset.

Κατά τις πειραματικές μετρήσεις παρατηρήθηκε σταθερή λειτουργία του συστήματος και ομαλή απόκριση του σήματος κατά την εφαρμογή διαφορετικών μηχανικών διεγέρσεων.

Συνολική λειτουργία λογισμικού

Το λογισμικό του συστήματος λειτουργεί ως διεπαφή μεταξύ του αναλογικού κυκλώματος και του υπολογιστή, επιτρέποντας:

- αξιόπιστη συλλογή δεδομένων,
- real-time παρακολούθηση,
- και βασική ανάλυση μηχανικών δονήσεων.

Η συνολική λειτουργία του λογισμικού κρίθηκε ικανοποιητική για την πειραματική καταγραφή και επεξεργασία σημάτων χαμηλής συχνότητας από το γεώφωνο.

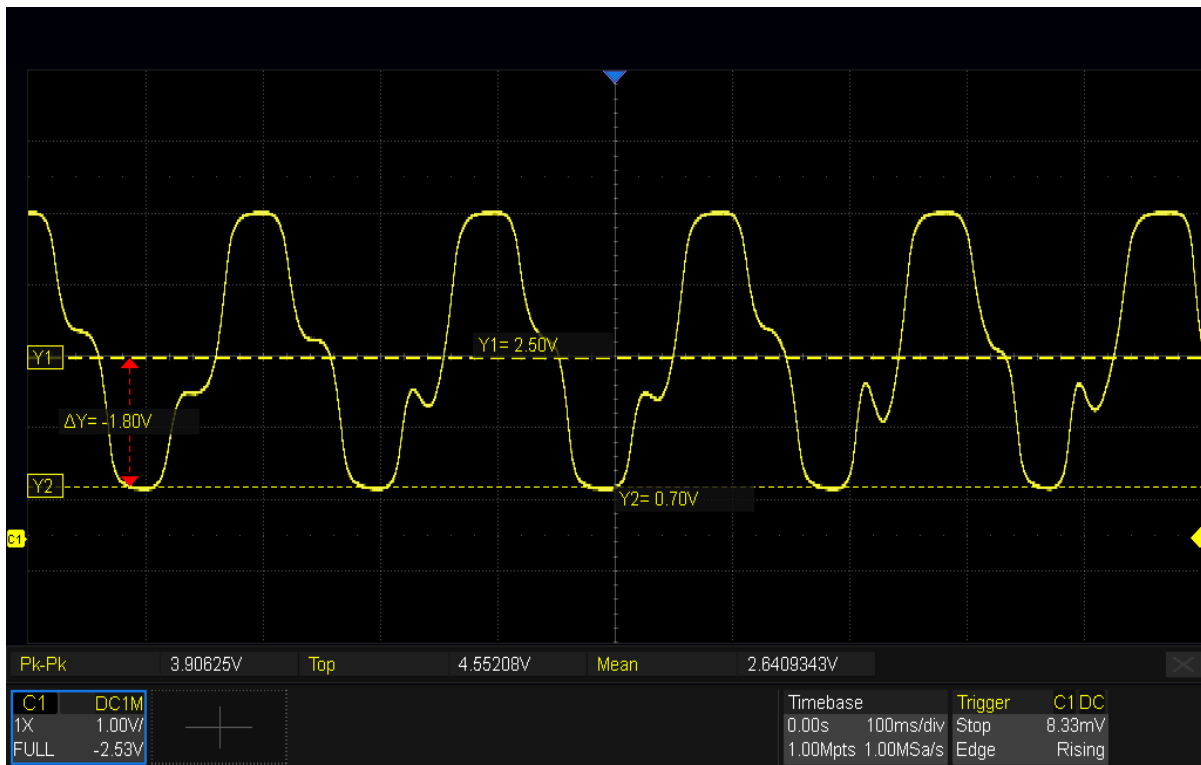
4.6 Συνολική αξιολόγηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης και των πειραματικών δοκιμών, η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος κρίθηκε λειτουργική και κατάλληλη για καταγραφή και επεξεργασία μηχανικών δονήσεων χαμηλής συχνότητας.

Οι μετρήσεις μέσω παλμογράφου επιβεβαίωσαν τη σωστή λειτουργία των επιμέρους βαθμίδων του αναλογικού τμήματος. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε:

- σταθερό DC offset περίπου 2.5 V,
- ψαλιδισμός κοντά στα 4.5 V,
- και ομαλή κυματομορφή εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας του ADC.

Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται μέσω του παλμογράφου η τάση της εξόδου του αναλογικού τμήματος που παράγεται με βίαιη κίνηση του γεωφώνου:



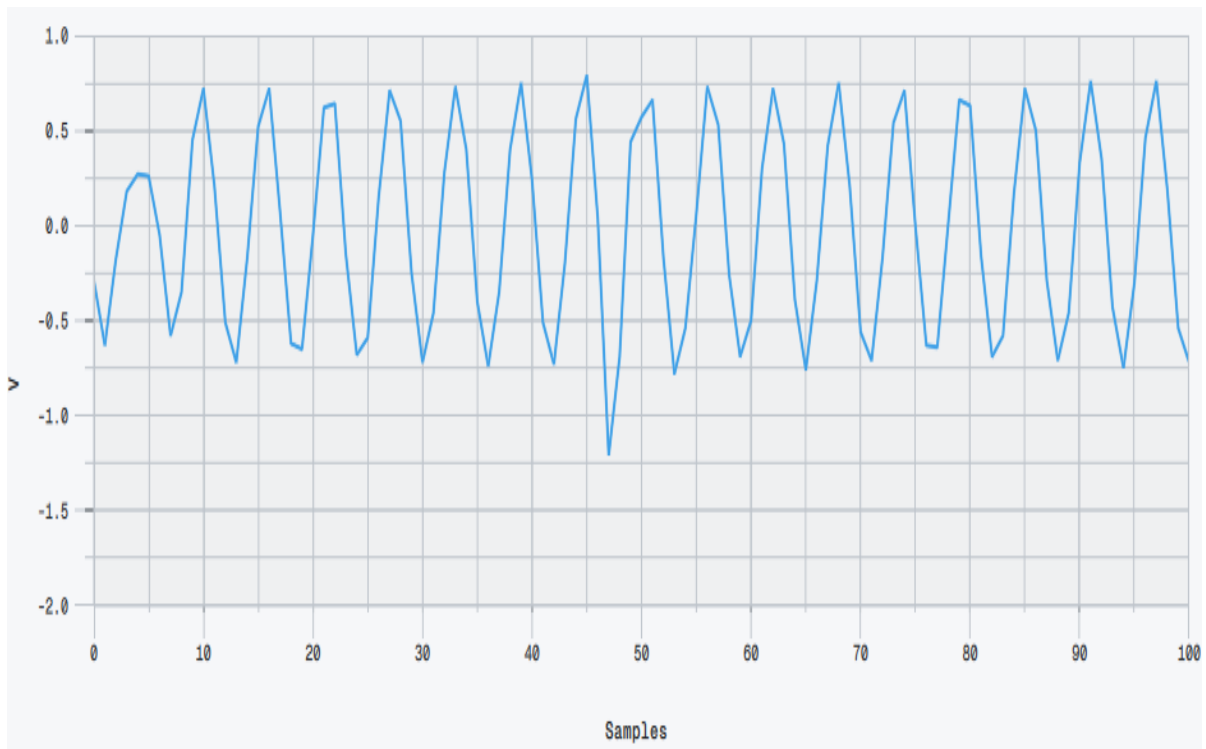
Εικόνα 4.11: Έξοδος αναλογικού τμήματος για βίαιη κίνηση του γεωφώνου

Η έξοδος του συστήματος παρέμεινε εντός του εύρους:

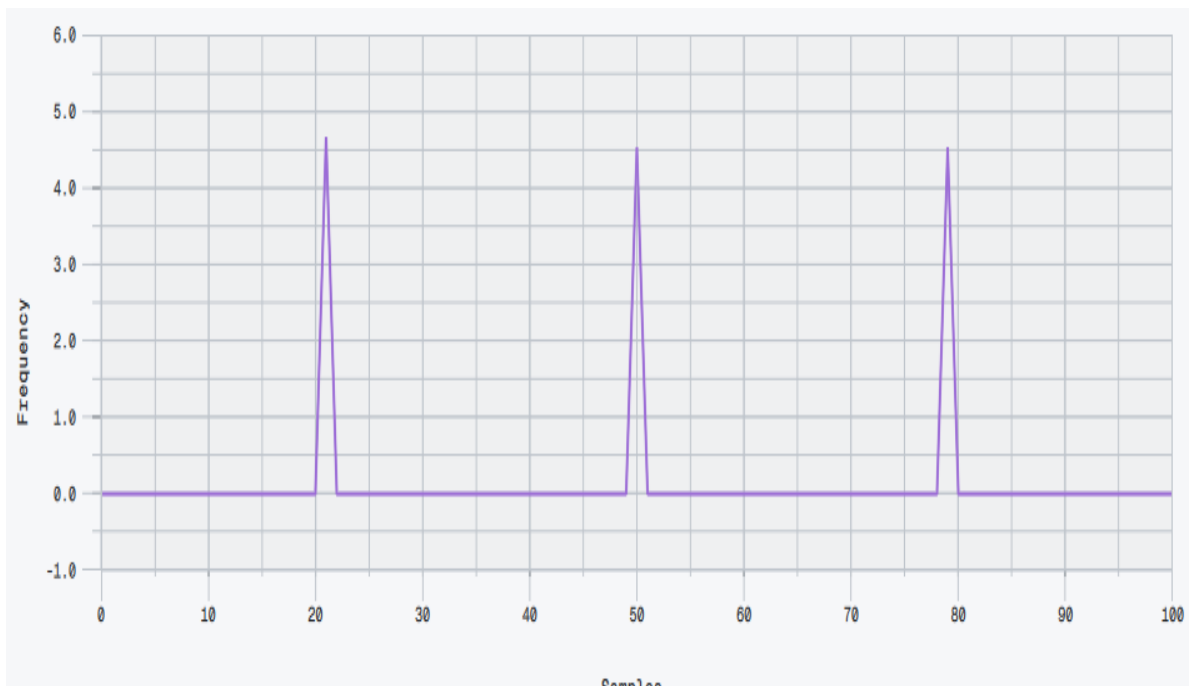
$$0V \leq V_{ADC} \leq 5V$$

γεγονός που εξασφάλισε ασφαλή σύνδεση με το Arduino Nano V3 χωρίς προβλήματα υπερτάσεων ή αστάθειας.

Η απεικόνιση του ψηφιοποιημένου σήματος που λαμβάνει το Arduino γίνεται με την χρήση του Serial Studio Pro. Για δοκιμή της απόκρισης συχνότητας του, το γεωφωνο τοποθετήθηκε επάνω σε ηχείο το οποίο συνδέθηκε σε γεννήτρια κυματομορφών με πλάτος $V=20V_{p-p}$ και συχνότητα $f=4.5Hz$. Ταυτόχρονα η έξοδος του αναλογικού τμήματος συνδέθηκε στον παλμογράφο ώστε να είναι δυνατό να γίνει σύγκριση της κυματομορφής που εμφάνιζε το πρόγραμμα. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν πως η συχνότητα που εμφάνιζε το πρόγραμμα ήταν ίδια με αυτήν της γεννήτριας ενώ η κυματομορφή, το πλάτος και η μορφή της, ήταν σχεδόν ίδια με αυτά στον παλμογράφο. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η απεικόνιση της κυματομορφής και η συχνότητα του σήματος αντίστοιχα που εμφάνισε το πρόγραμμα

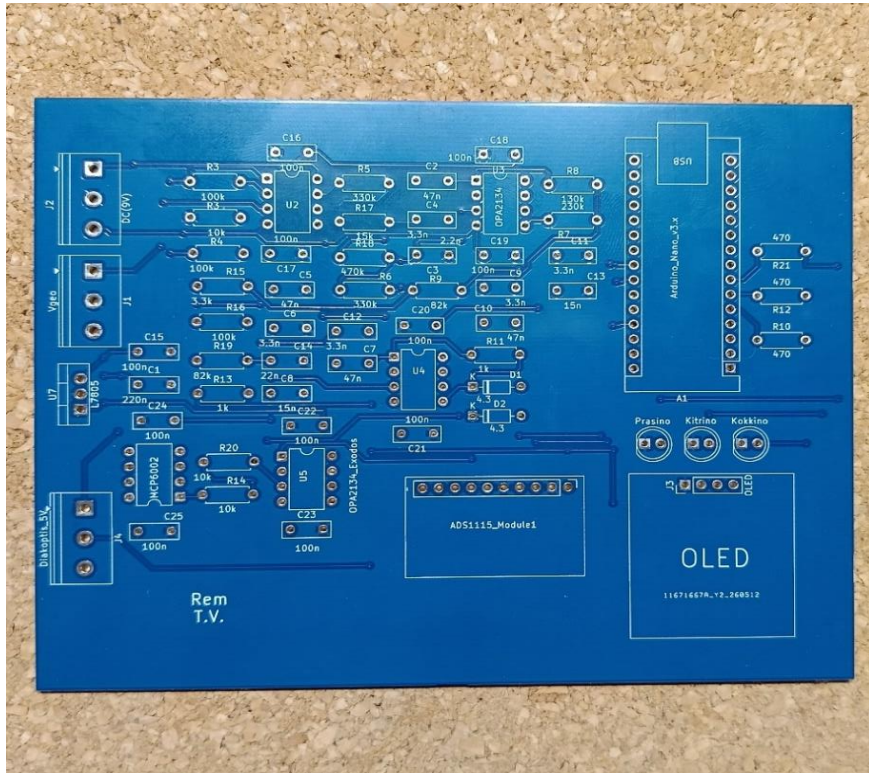


Εικόνα 4.12: Κυματομορφή σήματος

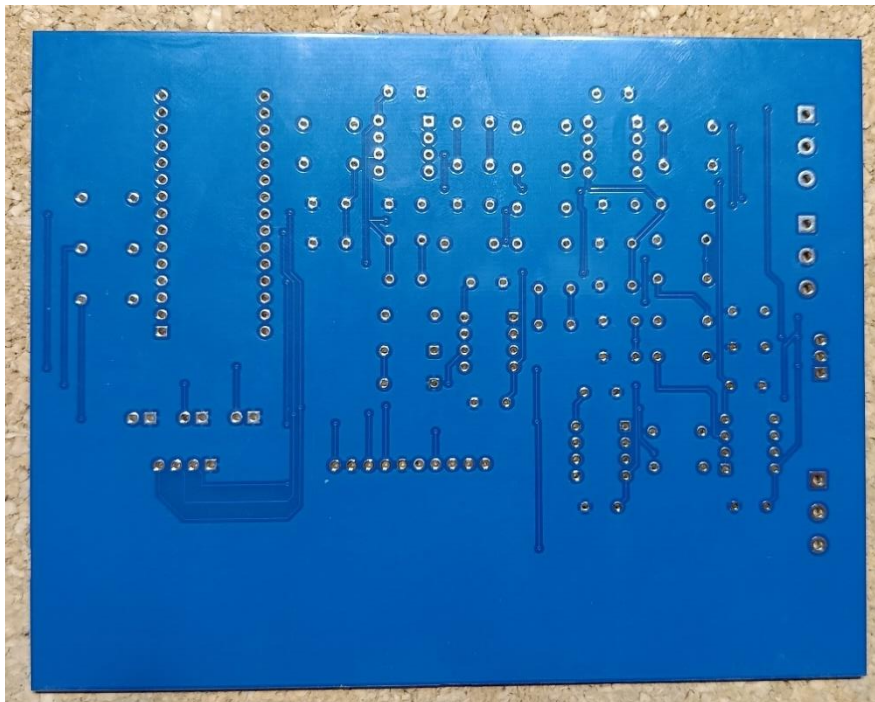


Εικόνα 4.13: Συχνότητα σήματος

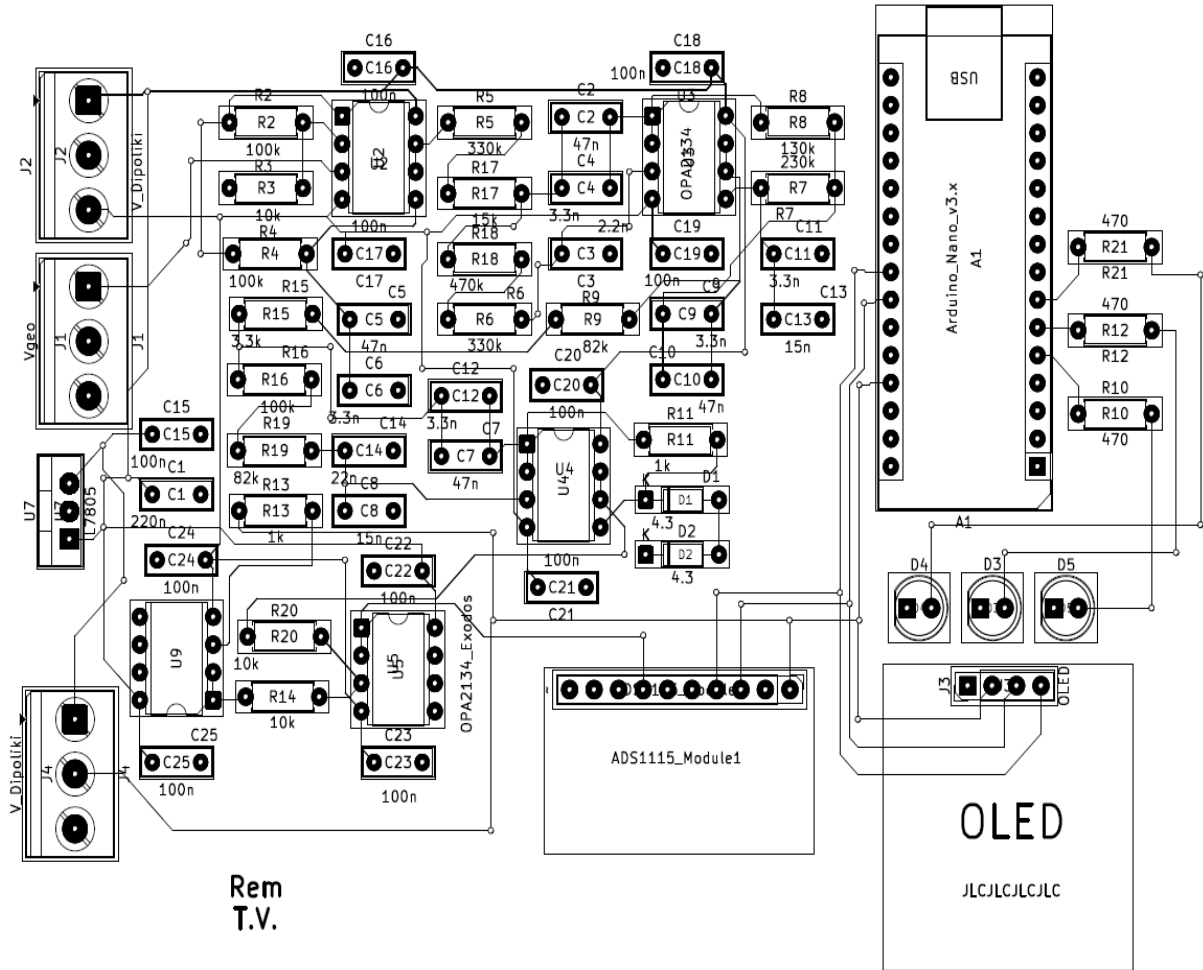
Μετά τις επιτυχημένες δοκιμές έγινε η σχεδίαση της πλακέτα μέσω της εφαρμογής KiCad. Παρακάτω φαίνονται οι δύο όψεις της πλακέτας και ο σχεδιασμός της στο KiCad:



Εικόνα 4.14: Μπροστινή όψη πλακέτας



Εικόνα 4.15.: Πίσω όψη πλακέτας



Εικόνα 4.16.: Σχεδιασμός πλακέτας στο KiCad

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Αποτελέσματα και Ανάλυση Μετρήσεων

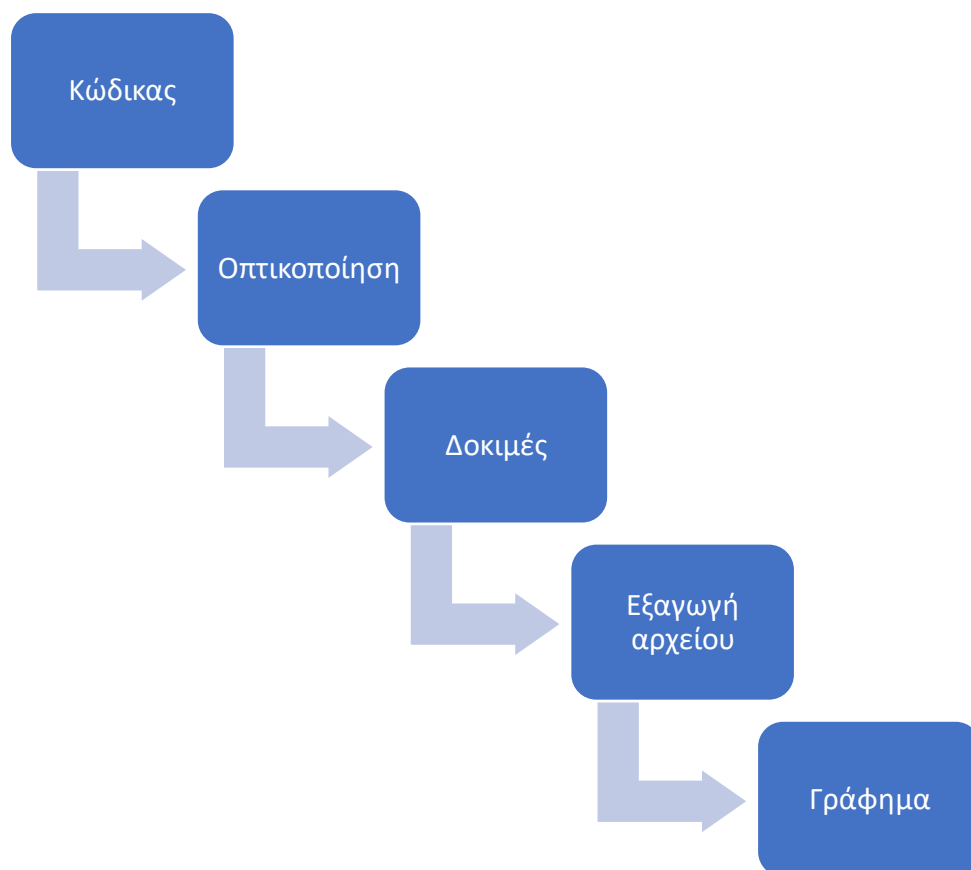
5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη λειτουργία του συστήματος καταγραφής δονήσεων που αναπτύχθηκε στην πτυχιακή εργασία.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν από την ψηφιοποίηση του σήματος και έπειτα είναι τα εξής:

- Δημιουργία κατάλληλου κώδικα για την ανάλυση του σήματος και εύρεση συχνότητας και άλλων μεγεθών χρήσιμα για σεισμολογικές παρατηρήσεις.
- Οπτικοποίηση των μεγεθών που βρέθηκαν στον υπολογιστή μέσω της δωρεάν έκδοσης του προγράμματος Serial Studio Pro
- Δοκιμαστικές δονήσεις διαφορετικών μεγεθών, καταγραφή τους μέσω του προγράμματος και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε αρχείο μορφής csv (comma separated values)
- Εισαγωγή αρχείου csv σε αρχείο excel και τροποποίηση των δεδομένων ώστε το excel να τα αντιλαμβάνεται ως δεκαδικούς αριθμούς και όχι ως κείμενο
- Δημιουργία γραφήματος (X-Y) με τον άξονα x τον χρόνο και τον άξονα y το πλάτος της τάσης.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα:



Σχήμα 5.1 Ακολουθία βημάτων

Για κάθε πειραματική δοκιμή παρουσιάζονται:

- η κυματομορφή της τάσης εξόδου ως προς τον χρόνο,
- πίνακας με την τάση και την συχνότητα
- Η μετατόπιση του εδάφους

Επιπλέον, πραγματοποιείται ενδεικτική εκτίμηση σεισμικού μεγέθους μέσω θεωρητικών – προσεγγιστικών σεισμολογικών σχέσεων. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται σε προσεγγιστικούς υπολογισμούς του τοπικού μεγέθους M_L και δεν αντιστοιχεί σε επίσημη σεισμολογική μέτρηση, καθώς το σύστημα της παρούσας εργασίας αποτελεί πειραματική διάταξη και όχι βαθμονομημένο σεισμολογικό σταθμό. Παρόλα αυτά, η διαδικασία επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση της έντασης των καταγραφόμενων δονήσεων και τη μελέτη της λειτουργίας ενός συστήματος σεισμικής καταγραφής.

5.2 Θεωρητικό υπόβαθρο υπολογισμών – Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μαθηματικοί τύποι χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των μεγεθών και η λογική του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως η συνολική ευαισθησία του γεωφώνου μετά και την ενίσχυση του αναλογικού σταδίου προκύπτει ως:

$$G_{total} = 10 \times 28.8 = 288 V/m/s \quad (5.1)$$

5.2.1 Υπολογισμός περιόδου

Για την περίοδο χρησιμοποιήθηκε μια μεταβλητή τύπου float. Με αρχική τιμή 0, η μεταβλητή αυτή έπαιρνε τιμή μετά από κάθε πέρασμα από αρνητικές σε θετικές τιμές. Σε κάθε πέρασμα, με την βοήθεια δύο μεταβλητών και της μεταβλητής millis(), υπολογίζονταν η διαφορά της τρέχουσας χρονικής στιγμής και της χρονικής στιγμής του προηγούμενου περάσματος από θετικές σε αρνητικές τιμές του πλάτους. Η διαφορά αυτή ήταν και η τιμή της περιόδου. Η μεταβλητή millis() είναι ενσωματωμένη στο Arduino και είναι ένας μετρητής ο οποίος μετράει από την στιγμή που έχει ξεκινήσει η λειτουργία του μικροελεγκτή ή μετά από κάθε reset.

5.2.2 Υπολογισμός συχνότητας

Η συχνότητα υπολογίστηκε με τον γνωστό τύπο της αντιστροφής της περιόδου. Όπως θα γίνει αντιληπτό παρακάτω στα αποτελέσματα πολλές καταγεγραμμένες τάσεις η οποίες βρίσκονται η μία δίπλα στην άλλη έχουν την ίδια συχνότητα. Αυτό όμως δεν επηρεάζει την εύρεση της συχνότητας για κάθε πλάτος κορυφής η οποία και χρειάζεται για τους υπολογισμούς των υπόλοιπων τιμών. Επιπλέον μέσω ελέγχου συνθήκης, με βάση τα αναλογικά φίλτρα που έχουν επιλεγεί και των δυνατοτήτων του γεωφώνου, συχνότητες μικρότερες από 1Hz ή μεγαλύτερες από 30Hz απορρίπτονται και η μεταβλητή της συχνότητας παίρνει την τιμή 0.

5.2.3 Υπολογισμός ταχύτητας εδάφους

Η ταχύτητα της κίνησης του εδάφους σε m/s, για κάθε μία περίοδο, υπολογίζεται ως:

$$U_{ground} = \frac{V_{out}}{G_{total}} \quad (5.2)$$

5.2.3 Υπολογισμός μετατόπισης

Η μετατόπιση του εδάφους σε μm , για κάθε μία περίοδο, για ημιτονοειδές σήμα υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα της ταχύτητας δηλαδή:

$$A = \frac{U_{ground}}{2 \times \pi \times f} \quad (5.3)$$

5.2.4 Υπολογισμός τοπικού μεγέθους M_L

Για την εύρεση της προσεγγιστικής τιμής M_L είναι απαραίτητος ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 5.1: Τιμές του $-\log A_0$ για διάφορα Δ [32]

Δ (km)	$-\log A_0$	Δ (km)	$-\log A_0$	Δ (km)	$-\log A_0$
0	1,40	80	2,8	210	3,6
5	1,58	85	2,86	220	3,65
10	1,72	90	2,91	230	3,7
15	1,86	95	2,96	240	3,7
20	1,98	100	3,00	250	3,8
25	2,08	110	3,10	260	3,8
30	2,18	120	3,10	270	3,9
35	2,26	130	3,20	280	3,9
40	2,34	140	3,20	290	4,0
45	2,40	150	3,3	300	4,0
50	2,47	160	3,3	310	4,1
55	2,53	170	3,4	320	4,1
60	2,60	180	3,4	330	4,2
65	2,65	190	3,5	340	4,2
70	2,70	200	3,5	350	4,3

Ο υπολογισμός της τιμής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$M_L = \log A - \log A_0 \quad (5.4)$$

5.2.5 Προσεγγιστική μετατροπή σε επιφανειακό μέγεθος (M_s)

Για την εκτίμηση του επιφανειακού μεγέθους χρησιμοποιήθηκε εμπειρική σχέση μετατροπής μεταξύ τοπικού μεγέθους M_L και επιφανειακού μεγέθους M_s , η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για σεισμολογικά δεδομένα του ελληνικού χώρου.

$$M_s = 0.95M_L + 0.72 \quad (5.5)$$

Η σχέση εφαρμόστηκε προσεγγιστικά στα πειραματικά δεδομένα του συστήματος καταγραφής, με στόχο τη συγκριτική εκτίμηση του σεισμικού μεγέθους.

5.2 Πίνακες μετρήσεων

Για κάθε πειραματική καταγραφή δημιουργήθηκαν πίνακες δεδομένων που περιλαμβάνουν:

- τάση εξόδου,
- χρόνος,
- συχνότητα,
- μετατόπιση

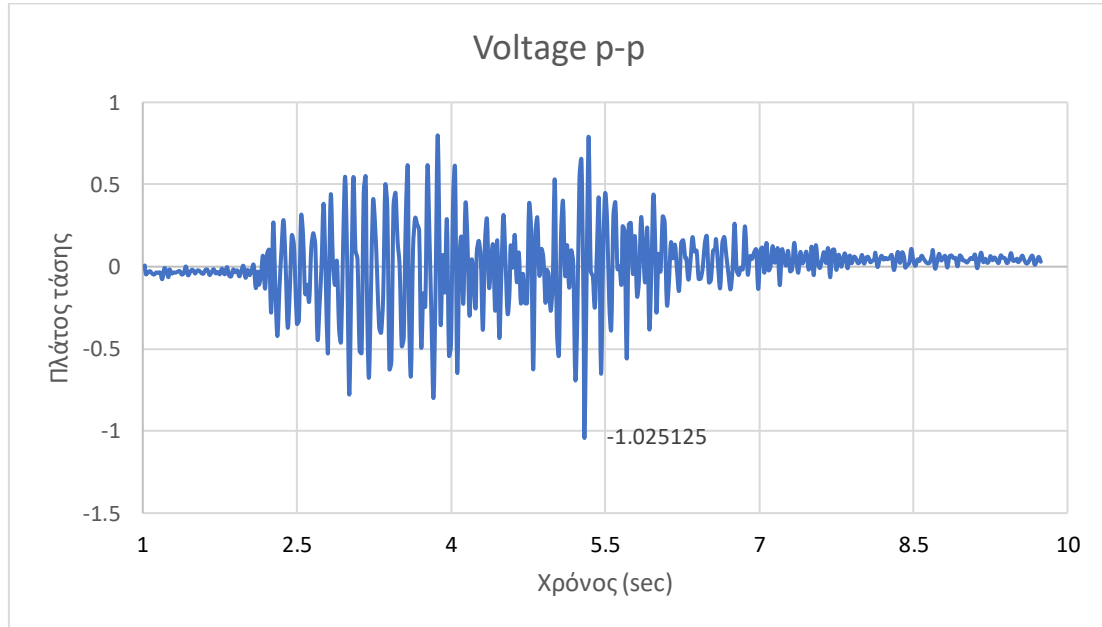
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές πειραματικές καταγραφές δονήσεων. Για κάθε δοκιμή δίνονται:

- το γράφημα της τάσης εξόδου,
- το πλάτος της τάσης
- η συχνότητα ταλάντωσης,
- Υπολογισμός του σεισμικού μεγέθους μέσω των παραπάνω σχέσεων.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες μηχανικής διέγερσης του γεωφώνου, με στόχο τη μελέτη της απόκρισης του συστήματος και της συμπεριφοράς της αλυσίδας επεξεργασίας σήματος. Οι τιμές του πλάτους και της συχνότητας που δίνονται στους πίνακες αφορούν την μέγιστη τάση καταγραφής.

Δοκιμαστική σεισμική δόνηση 1



Εικόνα 5.1: Σειсмоγράφημα 1

Πίνακας 5.2: Ενδεικτικές τιμές τάσης και συχνότητας σειсмоγραφήματος 1

Τάση	Συχνότητα
-0.686125	23.81
-0.2785	23.81
0.534375	14.71
0.644125	14.71
-0.274	14.71
-1.025125	15
0.475125	11.76
0.789125	11.76
-0.025375	11.76

Η μέγιστη τάση εξόδου είναι:

$$V_{out_{max}} = -1.025V$$

Στην τάση αυτή η ταχύτητα του εδάφους είναι:

$$U_{ground} = \frac{|V_{out_{max}}|}{G} = 3.56 \times 10^{-3} m/sec$$

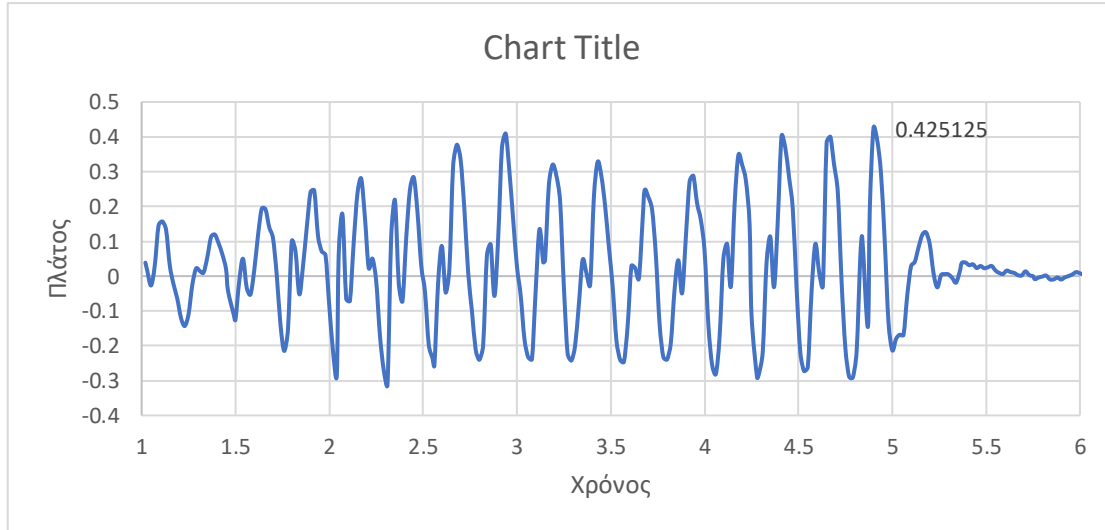
Για να βρούμε την μετατόπιση του εδάφους ολοκληρώνουμε την ταχύτητα. Για ημιτονοειδές σήμα και συχνότητα $f=15Hz$ έχουμε:

$$A = \frac{U_{ground}}{2\pi f} = 37.8\mu m$$

Το προσεγγιστικό μέγεθος υπολογίζεται ως:

$$M_L = \log A - \log A_0 = 2.98 \text{ Richter}$$

Δοκιμαστική σεισμική δόνηση 2



Εικόνα 5.2 Σεισμογράφημα 2

Πίνακας 5.3: Ενδεικτικές τιμές τάσης και συχνότητας σεισμογραφήματος 2

Τάση	Συχνότητα
0.111375	5.43
-0.145875	5.43
0.184875	16.13
0.425125	16.13
0.389375	16.13
0.294625	16.13

Η μέγιστη τάση εξόδου είναι:

$$V_{out_{max}} = 0.425V$$

Στην τάση αυτή η ταχύτητα του εδάφους είναι:

$$U_{ground} = \frac{|V_{out_{max}}|}{G} = 1.476 \times 10^{-3} m/sec$$

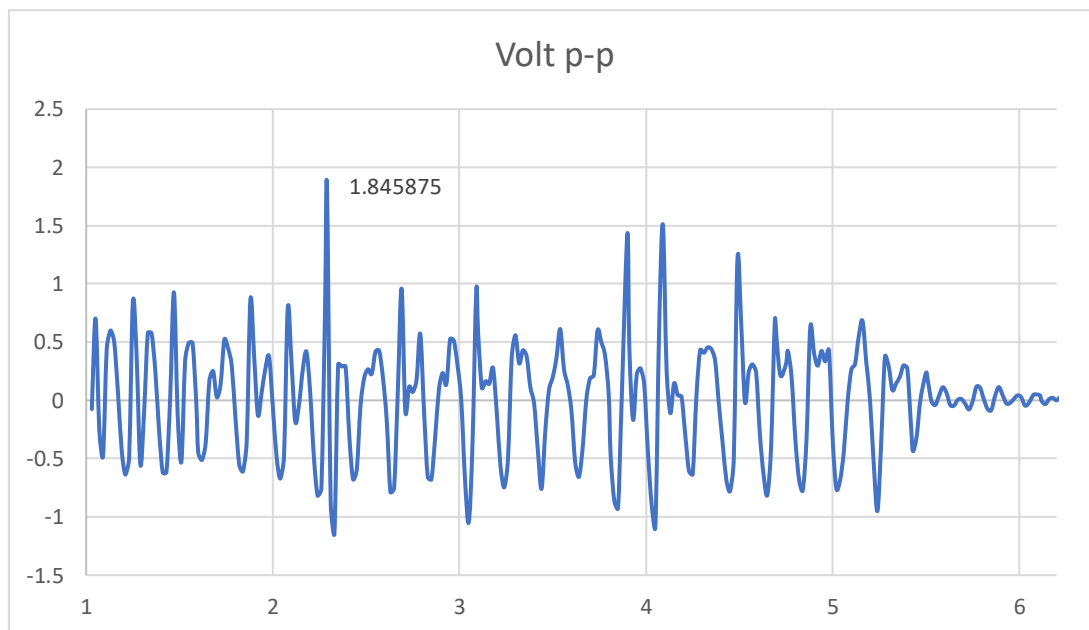
Για να βρούμε την μετατόπιση του εδάφους ολοκληρώνουμε την ταχύτητα. Για ημιτονοειδές σήμα και συχνότητα $f=16.13\text{Hz}$ έχουμε:

$$A = \frac{U_{ground}}{2\pi f} = 14.56\mu m$$

Το προσεγγιστικό μέγεθος υπολογίζεται ως:

$$M_L = \log A - \log A_0 = 2.56 \text{ Richter}$$

Δοκιμαστική σεισμική δόνηση 3



Εικόνα 5.3 Σειсмоγράφημα 3

Πίνακας 5.4: Ενδεικτικές τιμές τάσης και συχνότητας σειсмоγραφήματος 3

Τάση	Συχνότητα
-0.75725	13.33
0.799125	7.81
1.845875	7.81
-0.869	7.81
-1.147	7.81
0.30925	12.66
0.29075	12.66
0.29	12.66
-0.312875	12.66

Η μέγιστη τάση εξόδου είναι:

$$V_{out_{max}} = 1.845V$$

Στην τάση αυτή η ταχύτητα του εδάφους είναι:

$$U_{ground} = \frac{|V_{out_{max}}|}{G} = 6.406 \times 10^{-3} m/sec$$

Για να βρούμε την μετατόπιση του εδάφους ολοκληρώνουμε την ταχύτητα. Για ημιτονοειδές σήμα και συχνότητα $f=7.81Hz$ έχουμε:

$$A = \frac{U_{ground}}{2\pi f} = 130.54 \mu m$$

Το προσεγγιστικό μέγεθος υπολογίζεται ως:

$$M_L = \log A - \log A_0 = 3.51 Richter$$

5.4 Συμπεράσματα

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του συστήματος πραγματοποιήθηκαν πολλές πειραματικές μετρήσεις με καταγραφές δονήσεων. Αυτές οι καταγραφές επεξεργάστηκαν με σκοπό την εξαγωγή των βασικών χαρακτηριστικών του σήματος, όπως το μέγιστο πλάτος τάσης, η συχνότητα και η εκτιμώμενη μετατόπιση του εδάφους. Μέσω των μεγεθών αυτών πραγματοποιήθηκε θεωρητική προσέγγιση του τοπικού μεγέθους σεισμού (ML), αξιοποιώντας τις σχέσεις της σεισμολογίας και τους πίνακες διόρθωσης απόστασης που προτείνονται στη βιβλιογραφία.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πειραματική διάταξη είναι ικανή να ανιχνεύει και να καταγράφει μηχανικές δονήσεις, παράγοντας σήματα με επαρκή ποιότητα για περαιτέρω ανάλυση.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι υπολογισμοί του σεισμικού μεγέθους που παρουσιάστηκαν έχουν ενδεικτικό χαρακτήρα, και γίνονται προσεγγιστικά καθώς το σύστημα δεν έχει βαθμονομηθεί με βάση επαγγελματικά σεισμολογικά όργανα. Ωστόσο, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε επιτρέπει την κατανόηση των βασικών αρχών καταγραφής και επεξεργασίας σεισμικών σημάτων, καθώς και της διαδικασίας εκτίμησης σεισμικών μεγεθών από πειραματικά δεδομένα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη λειτουργικότητα της προτεινόμενης διάταξης.

Κεφάλαιο 6: Ανασκόπηση, συμπεράσματα και βελτιώσεις

6.1 Διαδικασία της έρευνας που ακολουθήθηκε

Το πρώτο βήμα που ακολουθήθηκε μετά την ανάληψη της εργασίας ήταν η μελέτη της θεωρίας των σεισμών και των χαρακτηριστικών τους. Μεγάλη προσπάθεια δόθηκε στην κατανόηση του τρόπου μέτρησης και βαθμονόμησης τους ώστε να γίνει αντιληπτό τι είναι αυτό που ενδιαφέρει τους ειδικούς της σεισμομετρίας και να γίνει μία πρώτη προσέγγιση στα μεγέθη τα οποία θα έπρεπε το σύστημα μας να καταγράφει. Φυσικά σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα για την καταγραφή των σεισμικών κυμάτων. Η πρώτη επιλογή ήταν η αγορά ενός επιταχυνσιόμετρου καθώς η τιμή του ήταν πολύ μικρή. Έπειτα όμως η αποτελεσματικότητα του για τους σκοπούς αυτής της έρευνας δεν ήταν επαρκής. Έτσι θεωρήθηκε σωστό μετά από επιπλέον έρευνα προτιμήθηκε η χρήση του γεωφώνου ως αισθητήρα του συστήματος.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε προσπάθεια δημιουργίας ενός γεωφώνου από το μηδέν. Για την ανάγκη αυτή έγινε μελέτη διαφόρων κλάδων της φυσικής όπως θεωρία ταλαντώσεων, θεωρία ηλεκτρομαγνητισμού και θεωρία κυματικής. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των ελατηρίων και ειδικότερα:

- Στην σκληρότητα τους
- Στην σύνδεση τους με την συχνότητα
- Στην θεωρία της απλής αρμονικής του κίνησης

Επίσης έμφαση δόθηκε στις ιδιότητες των μαγνητών και των πηνίων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά την αλληλεπίδραση τους.

Ωστόσο μετά από κάποιο διάστημα και έπειτα από πολλές προσπάθειες πρακτικής υλοποίησης ενός τέτοιου αισθητήρα διαπιστώθηκε πως η πραγματοποίηση αυτού του εγχειρήματος ήταν υπερβολικά δύσκολη. Μεγάλο πρόβλημα αποτέλεσε η εύρεση του κατάλληλου ελατηρίου με το οποίο θα μπορούσε να επιτευχθεί η δημιουργία γεωφώνου με ιδιοσυχνότητα έστω κοντά σε αυτήν ενός του εμπορείου (4.5Hz).

Παρόλα αυτά οι γνώσεις που αποκτήθηκαν σε όλη αυτήν την προσπάθεια βοήθησαν στην θεωρητική κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του γεωφώνου.

Μετά την αγορά του αισθητήρα έγινε η σύνδεση του με παλμογράφο. Το σήμα που έδινε οπτικά σήμαινε πως θα μπορούσε να σταθεί από μόνος του χωρίς περεταίρω αναλογική επεξεργασία. Τα προβλήματα που εμφάνιζε ήταν τα εξής:

- Χαμηλό πλάτος σήματος για αμυδρές κινήσεις του εδάφους
- Θόρυβος λόγω υψηλών συχνοτήτων οι οποίες δεν είναι χρήσιμες για σεισμομετρικούς σκοπούς
- Υψηλές τάσεις σε μεγάλους κραδασμούς οι οποίες ήταν εκτός επιτρεπτών ορίων για τις δυνατότητες του μετατροπέα A/D
- Εμφάνιση αρνητικών τάσεων κατά την μισή περίοδο οι οποίες δεν είναι αποδεκτές από τον μετατροπέα A/D

Τα παραπάνω προβλήματα έχριζαν απαραίτητη την δημιουργία κυκλωματικών διατάξεων για την αναλογική επεξεργασία του σήματος πριν την ψηφιακή.

Για τα βήματα που θα έπρεπε να ακολουθηθούν έγινε μελέτη διάφορων ερευνών και άρθρων και επιλέχθηκε η λογική που προτεινόταν σε άρθρο της analog devices [33]. Το άρθρο αυτό έδωσε την

αφορμή για αναζήτηση τρόπων μετατόπισης της συχνότητας αποκοπής του γεωφώνου σε χαμηλότερες συχνότητες κάτι το οποίο θα επέτρεπε την ανάλυση μεγαλύτερου φάσματος σεισμολογικών δραστηριοτήτων. Το κομμάτι αυτό περιγράφεται ως period extender στο άρθρο. Έτσι έγινε μελέτη αρκετών άρθρων σχετικά με τέτοιους είδους τεχνικές κάποια από τα οποία παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2 και στην ενότητα 2.7.

Βήμα 1

Αρχικά έγινε η προσπάθεια εύρεσης και δημιουργίας του κυκλωματικού μοντέλου του γεωφώνου με γνώμονα την συνάρτηση μεταφοράς του. Έπειτα από αρκετές αποτυχημένες προσπάθειες και διάφορες τροποποιήσεις βρέθηκε το κατάλληλο κύκλωμα το οποίο λειτουργούσε σωστά στην προσομοίωση. Ένα βασικό πρόβλημα που εντοπίστηκε καθ' όλη την διάρκεια αυτή ήταν ο τρόπος σύνδεσης της πηγής στο ηλεκτρικό μοντέλο και το είδος της (πηγή τάσης ή πηγή ρεύματος) καθώς αυτό δεν γινότανε ξεκάθαρος σε καμία από τις έρευνες αυτές.

Βήμα 2

Στην συνέχεια έγινε προσπάθεια εύρεσης του κατάλληλου κυκλώματος για την μετατόπιση της ιδιοσυχνότητας του γεωφώνου. Δοκιμάστηκαν όλα τα κυκλώματα τα οποία προτείνονταν στις έρευνες χωρίς όμως κάποια επιτυχία στην προσομοίωση. Αυτό οδήγησε τελικά στην δημιουργία αναλογικού κυκλώματος το οποίο θα επεξεργαζότανε κανονικά το σήμα του αισθητήρα χωρίς τροποποίηση της ιδιοσυχνότητας του.

Βήμα 3

Σημαντικό κομμάτι της εργασίας αποτέλεσε και ο σχεδιασμός της πλακέτας του συστήματος. Αν και αρχικά η χρήση της πλακέτας προορίζοντας για χρήση του υπολογιστή αποφασίστηκε η βελτίωση της για αυτόνομη λειτουργία με την προσθήκη διακόπτη επιλογής της παροχής τροφοδοσίας για τα ψηφιακά μέρη του κυκλώματος.

6.2: Μελλοντικές βελτιώσεις

Το συνολικό σύστημα που υλοποιήθηκε στην εργασία μπορεί να βελτιωθεί τόσο σε υλικό όσο και σε λογισμικό επίπεδο.

Αρχικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί γεωφώνο μεγαλύτερης ευαισθησίας ή επαγγελματικό σεισμόμετρο, ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των καταγραφών και η δυνατότητα ανίχνευσης ασθενέστερων σεισμικών δονήσεων. Επιπλέον ο θόρυβος θα μπορούσε να μειωθεί ακόμα περισσότερο με την χρήση ενισχυτών υψηλότερων τάξεων αλλά και άλλες μορφοποιήσεις στο κύκλωμα όπως η αντικατάσταση των αντιστάσεων με αντιστάσεις σε συνδεσμολογία T [34][35].

Στον κομμάτι της ψηφιακής επεξεργασίας θα μπορούσαν να εφαρμοστούν πιο προηγμένες τεχνικές ανάλυσης, όπως ψηφιακά φίλτρα, μετασχηματισμός Fourier (FFT), η φασματική ανάλυση και η αυτόματη ανίχνευση χαρακτηριστικών συχνοτήτων του σήματος. Με τον τρόπο αυτό θα ήταν δυνατός ο ακριβέστερος προσδιορισμός της κυρίαρχης συχνότητας και η βελτίωση των υπολογισμών μετατόπισης.

Μία ακόμη σημαντική βελτίωση θα ήταν η καταγραφή των δεδομένων σε κάρτα SD ή η αποστολή τους μέσω δικτύου σε απομακρυσμένο υπολογιστή ή διακομιστή. Η προσθήκη διακόπτη στην πλακέτα όπως προαναφέρθηκε, επιτρέπει την λειτουργία της και μακριά από υπολογιστική συσκευή.

Επιπλέον, η βαθμονόμηση της διάταξης με τη χρήση πρότυπου σεισμολογικού εξοπλισμού θα επέτρεπε την ποσοτική αξιολόγηση της ακρίβειας των μετρήσεων και την εξαγωγή πιο αξιόπιστων σεισμολογικών παραμέτρων.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η ανάπτυξη ενός δικτύου πολλαπλών αισθητήρων σε διαφορετικές θέσεις, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της κατεύθυνσης διάδοσης των κυμάτων και η προσέγγιση της θέσης μιας πηγής δόνησης. Ιδανικό θα ήταν το σύστημα να έχει και γεώφωνο οριζόντιας κίνησης το οποίο θα συνεργαζόταν με το ήδη υπάρχον κάθετης κίνησης, ανιχνεύοντας καλύτερα εδαφικές κινήσεις οποιασδήποτε κατεύθυνσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://www.itv.com/news/2025-12-04/how-common-are-earthquakes-in-the-uk-and-could-climate-change-trigger-more>
- [2] British Geological Survey (BGS), “Earthquakes”, [Online]. Available: <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/earth-hazards/earthquakes>
- [3] USGS, “A Normal (Dip-Slip) Fault”, [Online] Available: <https://www.usgs.gov/media/images/normal-dip-slip-fault>
- [4] Guideline Geo, “What are seismic waves”, 2022, [Online] Available: <https://guidelinegeo.com/guides/what-are-seismic-waves/>
- [5] KGS, “Seismology and Its Applications in Kansas”, [Online] Available: <https://www.kgs.ku.edu/Publications/PIC/pic37.html>
- [6] Βασίλη Κ. Παπαζάχου. Αθήνα, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1997.
- [7] J. Dewey and P. Byerly “The early history of seismometry (to 1900)” Bulletin of the Seismological Society of America, 1969
- [8] GFZ, “GEOFON real-time earthquake monitoring - how does it work?”, [Online] Available: <https://geofon.gfz.de/eqinfo/howitworks/>
- [9] USGS, “How are earthquakes recorded? How are earthquakes measured? How is the magnitude of an earthquake determined?”, [Online] Available: <https://www.usgs.gov/faqs/how-are-earthquakes-recorded-how-are-earthquakes-measured-how-magnitude-earthquake-determined>
- [10] USGS, “Moment magnitude, Richter scale - what are the different magnitude scales, and why are there so many?” [Online] Available: <https://www.usgs.gov/faqs/moment-magnitude-richter-scale-what-are-different-magnitude-scales-and-why-are-there-so-many>
- [11] <https://www.britannica.com/biography/Zhang-Heng>
- [12] Geodynamic Institute of Athens, “Σεισμικά Όργανα”, [Online] Available: www.gein.noa.gr/HTML/WEB-EDU/instruments.htm#seismometra
- [13] Britanica, “Michael Faraday”, [Online] Available: <https://www.britannica.com/biography/Michael-Faraday>
- [14] Encyclopedia.com, “John Milne”, [Online] Available: <https://www.encyclopedia.com/people/science-and-technology/geology-and-oceanography-biographies/john-milne>
- [15] Grokipedia, “Boris Borisovich Golitsyn” [Online] Available: <https://grokipedia.com/page/boris-borisovich-golitsyn>

- [16] The Nobel prize, “Jean Baptiste Perrin“, [Online] Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1926/perrin/biographical/>
- [17] ETHW, “Ludger Benedikt Mintrop“, [Online] Available: https://ethw.org/Ludger_Benedikt_Mintrop
- [18] ESS EARTH SCIENCES, “The Geophone – How We Listen To The Earth”, [Online] Available: <https://www.esearth.com/the-geophone-how-we-listen-to-the-earth/>
- [19] HS MAGNET, “Geophone Magnet Principle: Types, Frequency Response, and Magnet Selection”, [Online] Available: <https://hsmagnet.com/2023/02/08/the-principle-geophone-magnet>
- [20] M.Iskander, “Chapter 3 - Geotechnical Underground Sensing and Monitoring”, Underground Sensing, pp. 141-202, 2018.
- [21] Deng, Z., Lian, Z., Ye, J., Qin, K., Wang, Y., Li, F., and Meng, X., "Design of Low-Frequency Extended Signal Conditioning Circuit for Coal Mine Geophone", Sensors, vol. 25, no. 19, p. 5946, 2025.
- [22] Difan Yang, Ting Yang, Yizhi Wang, Dan Liu, "Development of improved short-period geophone: Implementation of low-frequency compensation "
- [23] Kai Ma, JieWu, Yubo Ma, Boyi Xu, Shengyu Qian and Xiaochang Jiang, "An Effective Method for Improving Low-Frequency Response of Geophone"
- [24] Navid Hakimitoroghi, Rabin Raut, Mehrdad Mirshafiei, Ashutosh Bagchi "An Analog Circuit Technique to Improve a Geophone Frequency Response for Application as Vibration Sensors"
- [25] Analog Devices, “Filter Basics: Anti-Aliasing”, [Online] Available: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/guide-to-antialiasing-filter-basics.html>
- [26] NI, “Anti-Aliasing Filters and Their Usage Explained” [Online] Available: <https://www.digikey.gr/en/articles/the-basics-of-anti-aliasing-low-pass-filters>
- [27] SEIS TECH “Basic Information of Geophone”, [Online] Available: <https://www.seis-tech.com/faq/basic-information-of-geophone/>
- [28] Goseeko “What is the Aliasing effect?”, [Online] Available: <https://www.goseeko.com/blog/what-is-the-aliasing-effect/>
- [29] <https://www.electronics-tutorials.ws/combo/combo-analogue-to-digital-converter.html>
- [30] <https://docs.arduino.cc/resources/pinouts/A000005-full-pinout.pdf>
- [31] <https://www.egl-geo.com/productview/geophone-element-sensor/21050710eHODj.html>
- [32] Τσελέντης Άκης, Σύγχρονη Σεισμολογία, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου 1997
- [33] Jesse Santos, Angelo Nikko Catapang, Erbe D. Reyta, “Understanding the Fundamentals of Earthquake Signal Sensing Networks“, Vol 53, No3, 2019

[34] Liu, P.; Mo, D.; Hong, F. The Application of T-type Feedback Resistor Network in Weak Signal Amplification Circuits. *Electr. Meas. Instrum.* **1999**, 12, 31–32+6

[35] Motchenbacher, C.D.; Connelly, J.A. *Low-Noise Electronic System Design*; John Wiley & Sons: New York, NY , USA, 1993.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΑΣ

Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>

Adafruit_ADS1115 ads;

const float offset = 2.25;
unsigned long perasma = 0;
float lastvolt = 0;
int downsample = 0;
float syxn = 0; //syxnotita;
float per=0;
unsigned long trexon = 0;
const int BUFFER_SIZE = 200;
float prev1 = 0;
float prev2 = 0;
float Amax=0;

float buffer[BUFFER_SIZE];

int indexBuffer = 0;

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  if (!ads.begin()) // Elegxos siskevis
  {
    Serial.println("Den vretike o ADS. Exodos");
    while (3);
  }

  ads.setGain(GAIN_ONE); // 0-4.096V --> 1 LSB = 4.096/2^16= 6.25uV
  ads.setDataRate(RATE_ADS1115_475SPS); // Exoume fo ≅ 36.5Hz -->(Nyquist) fn=2xfo=73Hz -->
  Tn=1/fn=136.9ms --> SPS=1/Tn=73samples/sec --> 250SPS
```

```

//Serial.println("Gain=1x --> 0-4.096V --> 1 LSB = 4.096/2^16= 6.25uV");
delay(1000);
//Serial.println("");

}

void loop() {
  int16_t a0;
  float volt0;

  float eusth = 28.8*10; //Evaisthisia tou geophonou (28 v/m/s) polaplasiasmeni me tin enisxysi tou
  analogikou tmimatos
  float vground = 0;
  float A; //metatopisi edafous

  a0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
  volt0 = ads.computeVolts(a0);
  volt0 = volt0 - offset;
  float volt0_1 = (volt0 + prev1 + prev2) / 3.0;

  prev2 = prev1;
  prev1 = volt0;

  // Store sample
  buffer[indexBuffer] = volt0;

  indexBuffer++;

  if (indexBuffer >= BUFFER_SIZE)
  {
    indexBuffer = 0;
  }

  // ----- RMS -----

  float sumSquares = 0;

  float vmax = -1000;

```

```

float vmin = 1000;

for (int i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++)
{
    sumSquares += buffer[i] * buffer[i];

    if (buffer[i] > vmax)
        vmax = buffer[i];

    if (buffer[i] < vmin)
        vmin = buffer[i];
}

float rms = sqrt(sumSquares / BUFFER_SIZE);

float vpp = vmax - vmin;

/* Syxnotita */

trexon = millis();
if (volt0 > 0 && lastvolt < 0)
{
    if (perasma != 0)
    {
        per = (trexon - perasma) / 1000.0; //kanoume dia 1000 gia na to metatrepsume se deytevolepta
        syxn = 1.0 / per;
    }
    perasma = trexon;
}
lastvolt = volt0;

/* Taxytita edafous */

vground = volt0 / eusth;

/* metatopisi */

```

```

if (syxn <= 30 && syxn >= 1)
{
    A = vground / (2.0 * PI * syxn); //oloklirosi gia metatropi se metatopisi (typos gia imitonoeides sima)
}

else
{
    A = 0;
    syxn=0;
}

if (isnan(A) || isinf(A))
{
    A = 0;
}

if (abs(A) > 0.01)
{
    A = 0;
}

if(abs(A) > Amax)
{
    Amax=abs(A);
}

downsample++;

if (downsample >= 5)
{
    Serial.print(volt0,6);
    Serial.print(","); // vazoume tab anamesa stis times epeidi to serial studio diavazei csv
    Serial.print(A * 1000000.0, 3);
    Serial.print(",");
    Serial.print(syxn,2);
    Serial.print(",");
}

```

```
Serial.print(trexon/1000.0);  
Serial.print(",");  
Serial.println(Amax * 1000000.0, 3);  
/*Serial.print(syxn,2);  
  Serial.print("\t");  
  Serial.println(rms,6);*/  
downsample = 0;  
}  
}
```