

**ΜΕΛΕΤΗ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ  
ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ – ΜΑΖΑΣ, ΜΕ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΚΛΕΙΣΤΟ ΕΛΕΓΧΟ, ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ  
ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Σ. ΔΗΜΗΤΡΑΚΑΚΗΣ**

**Δρ. ΦΥΣΙΚΟΣ**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γ. ΣΟΥΛΙΩΤΗΣ**

**ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2022**



## Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή **Γεώργιου Δημητρακάκη** που έκανε την εκπόνηση. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής του διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πτυχιακή εργασία που κρατάτε στα χέρια σας ή διαβάζετε στον υπολογιστή σας αυτή τη στιγμή αποτελεί το κλείσιμο (έτσι πιστεύω) ενός μεγάλου κεφαλαίου που άνοιξε πριν 30 χρόνια και είχε τίτλο «σπουδές». Βασικός τίτλος, διδακτορική διατριβή και τώρα δεύτερο πτυχίο. Η τελευταία τετραετία μάλιστα υπήρξε μια ιδιαίτερη περίοδος, καθώς εκλήθην να αλλάζω ρόλους αρκετές φορές την ημέρα, κάνοντας, στον ίδιο χώρο, πότε το μαθητή και πότε το δάσκαλο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία Geobit για τη μεταφορά τεχνογνωσίας, της οποίας έγινα αποδέκτης κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης εκεί, αλλά και για την παροχή των βασικών υλικών για την υλοποίηση της κατασκευής που έγινε στα πλαίσια της εργασίας. Μεγάλο τμήμα της πτυχιακής εργασίας αποτελεί αποτύπωση της εμπειρίας που απέκτησα εργαζόμενος στην εταιρία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συντελεστές του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων, Συστημάτων και Εφαρμογών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου Γιώργο Σουλιώτη και Ανδρέα Κατσαΐτη, για τη φιλοξενία στο χώρο του εργαστηρίου και την παροχή πρόσβασης σε υλικά και όργανα κατά την υλοποίηση της διάταξης.

Ομοίως, πρέπει να ευχαριστήσω τον καθηγητή Τατάκη Μανώλη, διευθυντή του Εργαστηρίου Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών, για την άδειά του να αρπάξω από τον πύργο του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος ό,τι υλικά μου έλειπαν.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω τον τετράχρονο γιο μου Αναστάση για τη –μερική– κατανόηση που έδειξε για τις αμέτρητες ώρες αυτά τα τελευταία χρόνια, που χρειάστηκε να λείπω από το σπίτι (χωρίς να πληρώνομαι) προκειμένου να μπορέσω να γίνω μηχανικός.

Και η ζωή συνεχίζεται... δύσκολη μεν, όμορφη δε...



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων, Συστημάτων και Εφαρμογών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Η εργασία πραγματεύεται, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο, σειρά ζητημάτων που σχετίζονται με τη λειτουργία των σεισμολογικών οργάνων και ειδικότερα των επιταχυνσιόμετρων για σεισμολογικές εφαρμογές, ενώ της τεχνικής παρουσίασης προηγείται μια εισαγωγή σε θέματα της φυσικής των τεκτονικών πλακών και της μελέτης των σεισμών.

Το παρόν κείμενο απαρτίζεται από την Εισαγωγή, τρία (3) κεφάλαια, τα Συμπεράσματα, τη Βιβλιογραφία και τα Παραρτήματα.

Στην **Εισαγωγή** περιγράφεται το γενικότερο πλαίσιο εντός του οποίου έγινε η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος και διευκρινίζονται οι στόχοι της εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του φαινομένου των σεισμών και των βασικών μεγεθών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή τους.

Το **Κεφάλαιο 2** αναφέρεται στα σεισμολογικά όργανα, στα είδη και στις εφαρμογές τους, καθώς και στα βασικά χαρακτηριστικά τους μεγέθη, ενώ γίνεται και μια εισαγωγική περιγραφή της αρχής force-balance, επί της οποίας λειτουργούν τα σύγχρονα σεισμολογικά όργανα τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες.

Στο **Κεφάλαιο 3**, μετά τη γενική παρουσίαση των βασικών τοπολογιών ελέγχου force-balance αξελερόμετρων και σεισμόμετρων, γίνεται αναλυτική περιγραφή της τοπολογίας που θα υλοποιηθεί, εξαγωγή και μελέτη της συνάρτησης μεταφοράς και προσομοίωση του συνολικού μηχανισμού στο LTspice. Τέλος, γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν στη φάση της κατασκευής και παρουσιάζονται αποτελέσματα και ενδεικτικές κυματομορφές από το εν λειτουργία αξελερόμετρο.

Στα **Συμπεράσματα** γίνεται ανακεφαλαίωση της εργασίας και διατύπωση των βασικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από την πτυχιακή εργασία ως τεχνικό αντικείμενο, αλλά και ως συνολική σπουδαστική εμπειρία.

Η **Βιβλιογραφία**, που ακολουθεί το βασικό μέρος της εργασίας, αποτελεί εντελώς απαραίτητο εργαλείο για τον αναγνώστη που θα θελήσει να διερευνήσει σε μεγαλύτερο βάθος τα ζητήματα που πραγματεύεται η εργασία και παρότι δεν είναι (ασφαλώς!) μια λίστα

που να καλύπτει πλήρως το αντικείμενο, σίγουρα αποτελεί ένα καλό σημείο έναρξης για περαιτέρω αναζήτηση πληροφοριών.

Στα **Παραρτήματα**, που βρίσκονται στο τέλος της εργασίας, έχουν αναπτυχθεί εν συντομία κάποια ζητήματα που σχετίζονται άμεσα με το αντικείμενο αυτής, αλλά δεν εντάσσονται στην ύλη κάποιου εκ των κεφαλαίων αυτής.



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	<b>1</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>5</b>
<b><i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</i></b>	
<b>ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΟΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ</b>	<b>7</b>
1.1. Γενικά	7
1.2. Σεισμοί	9
1.2.1. Τι είναι οι σεισμοί	9
1.2.2. Σεισμικά κύματα	10
1.2.3. Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός σεισμού	12
1.2.3.1. Ένταση	12
1.2.3.2. Φασματική ένταση	15
1.2.3.3. Μέγεθος	16
1.2.3.4. Μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, συχνότητα	18
1.3. Σεισμικός θόρυβος	22
<b><i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</i></b>	
<b>ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ</b>	<b>25</b>
2.1. Σεισμολογικοί σταθμοί	25
2.2. Αξιολόγηση σεισμολογικών δεδομένων	28
2.2.1. Γενικά	28
2.2.2. Γεωφυσικές έρευνες	28
2.2.3. Χαρτογράφηση - χαρακτηρισμός ρηγμάτων και άλλες εφαρμογές	30
2.3. Σεισμόμετρα και επιταχυνσιόμετρα	35
2.3.1. Γενικά	35
2.3.2. Επιταχυνσιόμετρα	35
2.3.3. Γεώφωνα	37
2.3.4. Σεισμόμετρα	38
2.3.5. Τελικά τι ακριβώς χρειαζόμαστε;	38
2.3.6. Micro-electromechanical sensors (MEMS)	39

2.4. Θόρυβος και άλλα χαρακτηριστικά των σεισμολογικών οργάνων	41
2.4.1. Γενικά για το θόρυβο στα σεισμολογικά όργανα	41
2.4.2. Θόρυβος Brown	42
2.4.3. Ηλεκτρονικός θόρυβος	43
2.4.4. Χαρακτηρισμός οργάνων με βάση τις επιδόσεις τους	47
2.4.4.1. Κλάση οργάνου (class)	47
2.4.4.2. Clip level	47
2.4.4.3. Ευαισθησία (sensitivity)	47
2.4.4.4. Dynamic range	48
2.4.4.5. Διαγράμματα φασματικής κατανομής ισχύος θορύβου	49
2.4.4.6. Συνάρτηση μεταφοράς – IRIS Consortium files	55
2.4.5. Άλλα κριτήρια και προδιαγραφές	57
2.5. Η παγκόσμια αγορά σεισμολογικών οργάνων	59
2.6. Η αρχή λειτουργίας force-balance των αδρανειακών σεισμολογικών οργάνων	60

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

<b>ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ FORCE-BALANCE ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ</b>	<b>63</b>
3.1. Βασικές τοπολογίες κυκλωμάτων ελέγχου σεισμολογικών οργάνων force - balance	63
3.1.1. Εισαγωγή	63
3.1.2. Force – balance αζελερόμετρο	64
3.1.3. Force – balance σεισμόμετρο: τοπολογία Α	66
3.1.4. Force – balance σεισμόμετρο: τοπολογία Β	66
3.1.5. Force – balance σεισμόμετρο: τοπολογία Γ	70
3.2. Περιγραφή και θεωρητική ανάλυση της τοπολογίας που θα υλοποιηθεί	70
3.2.1. Εισαγωγή	70
3.2.2. Περιγραφή των επιμέρους τμημάτων μηχανικού και ηλεκτρονικού μέρους	72
3.2.2.1. Γενική περιγραφή της τοπολογίας	72
3.2.2.2. Ο μηχανισμός σεισμικής μάζας – ελατηρίου	74
3.2.2.3. Γεννήτρια υψηλής συχνότητας	77
3.2.2.4. Αισθητήρας μετατόπισης της σεισμικής μάζας	77

3.2.2.5. Ηλεκτρονικό κύκλωμα του αισθητήρα μετατόπισης	80
3.2.2.6. Αποδιαμορφωτής και προενισχυτής σήματος	82
3.2.2.7. Κλάδος ανάδρασης	83
3.2.3. Συνάρτηση μεταφοράς	84
3.2.3.1. Γενικά	84
3.2.3.2. Ανοιχτός βρόχος	85
3.2.3.3. Κλειστός βρόχος	86
3.2.4. Προσομοίωση του συνολικού μηχανισμού με το LTspice	91
3.2.4.1. Γενικά για τη χρήση Η/Υ στη σχεδίαση σεισμολογικών οργάνων	91
3.2.4.2. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν	94
3.2.4.3. Ενδεικτικά αποτελέσματα των εξομοιώσεων	96
3.3. Κατασκευή force-balance αξελερόμετρου στο εργαστήριο	98
3.3.1. Επιλογή υλικών ηλεκτρονικού κυκλώματος	98
3.3.1.1. Εισαγωγή	98
3.3.1.2. Τελεστικοί ενισχυτές	99
3.3.1.3. Αποδιαμορφωτής	100
3.3.1.4. Άλλα στοιχεία	104
3.3.2. Υλοποίηση της διάταξης	104
3.3.2.1. Η αρχή είναι το ήμισυ του παντός	104
3.3.2.2. Ταλαντωτής	105
3.3.2.3. Μετασχηματιστής και χωρητικός αισθητήρας μετατόπισης	109
3.3.2.4. Audio preamplifier υψηλής εμπέδησης εισόδου	109
3.3.2.5. Φίλτρο και έξοδος	111
3.3.2.6. Κλάδος ανάδρασης	111
3.3.3. Δοκιμές λειτουργίας, αποτελέσματα – κυματομορφές	112
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>121</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>123</b>

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>127</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι:</b> IRIS .resp files	127
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ:</b> Σύστημα μάζας – ελατηρίου	135
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ:</b> Προσομοίωση διαμόρφωσης – αποδιαμόρφωσης σήματος στο Matlab (κώδικας)	139
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>141</b>

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## Εισαγωγή

Το αντικείμενο το ηλεκτρολόγου μηχανικού πλέον καλύπτει μία μεγάλη γκάμα θεμάτων, πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι πριν κάποιες δεκαετίες. Η ποικιλία των θεμάτων αποτυπώνεται γλαφυρά στο πρόγραμμα σπουδών των διαφόρων τμημάτων ΑΕΙ και σε εκείνο των πρώην ΤΕΙ. Ενέργεια, αυτοματισμοί, υπολογιστές, ηλεκτρονικά, με διάφορους εξειδικευμένους τίτλους κάθε φορά, είναι οι τομείς που συνήθως απαρτίζουν ένα τέτοιο τμήμα. Ως υποψήφιος διδάκτορας και ως εκπαιδευτικός είχα μια μακρόχρονη πορεία στο χώρο της ενέργειας και έτσι σκεφτόμουν από νωρίς να αναλάβω μία πτυχιακή σε αυτή την κατεύθυνση, καθώς θα μου ήταν πιο εύκολη υπόθεση η ολοκλήρωσή της.

Στην πορεία όμως προέκυψε η πρακτική άσκηση, η οποία συνέβη να είναι στο χώρο των ηλεκτρονικών και δη των αναλογικών ηλεκτρονικών με ολίγον τι από αυτόματο έλεγχο. Αυτά εντός του εξαμήνου της πρακτικής. Τυχόν παραμονή στο ίδιο χώρο εξασφαλίζει την ενασχόληση και με τα ψηφιακά ηλεκτρονικά, αλλά και τους υπολογιστές σε επίπεδο πολύ βαθύτερο από εκείνο ενός απλού χρήστη υπολογιστή. Όμως, μήνες ήδη πριν την αιφνίδια έναρξη της πρακτικής άσκησης σε εταιρία κατασκευής σεισμολογικών οργάνων (αλλού έφαχνα εργοδότη, αλλού βρέθηκε) είχα κάνει την επιλογή μου ώστε (τελικά) με την ευκαιρία της πτυχιακής εργασίας μου να απαγκιστρωθώ από τον ενεργειακό τομέα και να μεταπηδήσω στην ηλεκτρονική. Με υπόδειξη του επιβλέποντα καθηγητή είχε επιλεγεί και το θέμα των charge pumps, το οποίο στο πολύ μακρινό βάθος συγγενεύει με τους γνώριμους μου μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Ο χρόνος που αφιερώθηκε όμως στη μελέτη των σεισμολογικών οργάνων στα πλαίσια της πρακτικής άσκησης, κατέστησε την αλλαγή του θέματος της πτυχιακής μονόδρομο. Το τελικό αποτέλεσμα κρύβει αρκετή διάθεση και προσπάθεια για μάθηση, αναζήτηση πληροφοριών και μεταφορά αυτών προς τον αναγνώστη με τρόπο κατανοητό και περιεκτικό, μεράκι και αγάπη για αυτό που έγινε και πολλές, μα πάρα πολλές ώρες εργασίας.

## Στόχοι της εργασίας

Πρέπει να τονιστεί ευθύς εξαρχής πως στόχος της παρούσας εργασίας ΔΕΝ είναι η παραγωγή πρωτότυπης γνώσης. Αυτό είναι κάτι που έχει γίνει στις εργασίες [58] και [59] με τη συμμετοχή του γράφοντα, οι οποίες και αποτελούν τη βάση για κάποια από αυτά που υπάρχουν γραμμένα εδώ. Η παρούσα εργασία πρωτίστως στοχεύει στην εμπάθυνση της

γνώσης του ιδίου του συντάκτη της επί του αντικειμένου των σεισμολογικών οργάνων και δευτερευόντως στην μεταλαμπάδευση αυτής της γνώσης στον ενδιαφερόμενο αναγνώστη.

Σε αυτό το πλαίσιο, εκτός από το αυστηρά ηλεκτρολογικού – ηλεκτρονικού ενδιαφέροντος μέρος της εργασίας με τη μελέτη και υλοποίηση ενός αξελερόμετρου, που αποτυπώνεται στο 3ο κεφάλαιο, υπάρχουν και τα δύο πρώτα κεφάλαια με πιο γενικές πληροφορίες για τη φυσική των σεισμών, τη διάρθρωση της επιστημονικής προσέγγισης επί του θέματος των γεωφυσικών και σεισμολογικών ερευνών και τη γενική περιγραφή των κυριότερων τύπων σεισμολογικών οργάνων και των χαρακτηριστικών τους μεγεθών. Παρότι ο τίτλος της εργασίας βαίνει κυρίως προς το περιεχόμενο του τρίτου κεφαλαίου, τα κεφάλαια 1 και 2 αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της παρουσίασης και είναι οπωσδήποτε απαραίτητα για να βοηθήσουν τον μη ειδικό να καταλάβει τι ακριβώς είναι αυτό που περιγράφουμε ότι προσπαθούμε να φτιάξουμε στο 3ο κεφάλαιο και σε τι χρησιμεύει.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

# **ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΔΟΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ**

### **1.1. Γενικά**

Η Γη κινείται και μάλιστα εκτελεί πολλές κινήσεις. Ως ουράνιο σώμα, μαζί με το γαλαξία μας, ταξιδεύει στο σύμπαν, μαζί με το ηλιακό μας σύστημα ταξιδεύει περί το κέντρο του γαλαξία, περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο και η ίδια περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της, ο οποίος εκτελεί περιοδικές ταλαντώσεις (κλόνηση και μετάπτωση). Μελετώντας τη από λίγο πιο κοντά βλέπουμε σε αυτήν πως κινούνται διαρκώς οι αέριες μάζες της ατμόσφαιράς της, όπως και οι μάζες νερού των θαλασσών, των λιμνών, των ποταμών αλλά και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, σε έναν αέναο κύκλο που στηρίζεται στην απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Σε αυτή τους την κίνηση συμπαρασύρουν οργανική και ανόργανη ύλη, διαβρώνουν εδάφη και πετρώματα και δημιουργούν ιζήματα και επικαθήσεις.

Όμως η γη δε δέχεται μόνο την επίδραση της ηλιακής προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Εκτός από τον στερεό εξωτερικό της φλοιό, το εσωτερικό της αποτελείται από υλικά σε ρευστή ή ημίρρευστη κατάσταση τα οποία βρίσκονται σε θερμοκρασίες από αρκετές εκατοντάδες ως κάποιες χιλιάδες βαθμούς κελσίου. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μια σειρά πραγμάτων, όπως είναι η γεωθερμική θερμοβαθμίδα στο φλοιό (αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος εντός του εδάφους κατά περίπου  $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), η ύπαρξη μαγνητικού πεδίου (λόγω της περιστροφικής κίνησης του υγρού μεταλλικού πυρήνα), καθώς και η κίνηση των τεκτονικών (ή λιθοσφαιρικών) πλακών. Η τελευταία οφείλεται στην κίνηση του μάγματος κάτω από το φλοιό της γης και αποτέλεσμά της είναι, μεταξύ άλλων, η ηφαιστειακή και σεισμική δραστηριότητα που παρατηρείται σε όλα τα μήκη και πλάτη της γης, αλλά κυρίως εντοπίζεται στα σημεία σύγκλισης ή απόκλισης των τεκτονικών πλακών.

Η Ελλάδα συμβαίνει να βρίσκεται στη ζώνη σύγκλισης δύο τεκτονικών πλακών (της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής), με την Αφρικανική να βυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική, την Αιγαιακή μικροπλάκα και την πλάκα της Ανατολίας κατά μήκος του Διναροταυρικού τόξου (Ιόνιο, Ν. Κρήτη, ΝΑ Αιγαίο), ενώ και το ρήγμα της Βόρειας

Ανατολίας εκτείνεται από την Β. Τουρκία ως το Β. Αιγαίο και τις Σποράδες (Σχ. 1.1). Αποτέλεσμα της κίνησης των τεκτονικών πλακών είναι η υψηλή σεισμικότητα, αλλά και διάφορα άλλα φαινόμενα γεωλογικού ενδιαφέροντος (γεωθερμία, ηφαιστεια κλπ).



Σχ. 1.1 Τεκτονικές πλάκες και ρήγματα στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο [1].

Η ιστορική καταγραφή έχει να επιδείξει πληθώρα μεγάλων, καταστροφικών συμβάντων, ενώ οι σεισμοί έχουν τη δυναμική να προξενούν ολοένα και μεγαλύτερες απώλειες σε ανθρώπινες ζωές, περιουσίες και υποδομές όσο ο ανθρώπινος πληθυσμός αυξάνεται και συγκεντρώνεται σε περιορισμένα αστικά περιβάλλοντα και όσο η παλαιότητα των κτηρίων μεγαλώνει χωρίς να έχουν προηγηθεί ισχυροί σεισμοί. Η μακρά εμπειρία στον ελλαδικό χώρο οδήγησε το 1959 στη σύνταξη του πρώτου αντισεισμικού κανονισμού κτηρίων με ισχύ σε όλη τη χώρα (προϋπήρχε ήδη από το 1928 κανονισμός με τοπική ισχύ σε διάφορες περιοχές), ενώ ο Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ) που θεσπίστηκε το έτος 2000, με διάφορες τροποποιήσεις/βελτιώσεις ισχύει μέχρι και σήμερα (κατά περίπτωση εφαρμόζεται ο ΕΑΚ 2000 ή ο Ευρωκώδικας EC8) [2]. Για μεγάλα έργα υποδομής ισχύουν αντίστοιχες εξειδικευμένες διατάξεις, ενώ οι αντισεισμικές προδιαγραφές ενός τέτοιου έργου, καθώς και η εκ του νόμου υποχρέωση για την πραγματοποίηση γεωλογικής μελέτης [3], είθισται να περιλαμβάνονται στους όρους παραχώρησης. Όμως, μεγάλο μέρος των κτηρίων, ιδίως στα κέντρα των πόλεων και στα χωριά, έχει δομηθεί νωρίτερα, σε μια εποχή που δεν υπήρχαν ουσιαστικοί έλεγχοι για την τήρηση του ΕΑΚ και η ηλικία τους ξεπερνάει το μισό αιώνα. Για το λόγο αυτό η παρακολούθηση της δραστηριότητας των ρηγμάτων για την κατανόηση της έκτασης και της δυναμικής τους να προκαλέσουν καταστροφές έχει



μεγάλη σημασία στα πλαίσια της προετοιμασίας για έναν ενδεχόμενο ισχυρό σεισμό. Στα πλαίσια αυτής της παρακολούθησης γίνεται, για παράδειγμα, η χαρτογράφηση ενός ρήγματος με την καταγραφή των πολυάριθμων μετασεισμών που ακολουθούν έναν ισχυρό σεισμό, καθώς οι εστίες τους εντοπίζονται σε γειτονικά σημεία του ίδιου ρήγματος που έδωσε τον αρχικό σεισμό ή σε άλλα γειτονικά ρήγματα [13].

Τα εργαστήρια σεισμολογίας των ελληνικών δημόσιων πανεπιστημίων, αλλά και το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών [4] θεωρούνται ως δομές εκ των κορυφαίων παγκοσμίως, με προσωπικό υψηλού επιπέδου κατάρτισης και εξοπλισμό υψηλής ποιότητας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, κορυφαίοι οργανισμοί για τη μελέτη των φαινομένων που σχετίζονται με τους σεισμούς θεωρούνται οι USGS (United States Geological Survey) και η JMA (Japan Meteorological Agency). Επίσης, η χώρα μας και ειδικότερα η πόλη της Πάτρας, φιλοξενεί μία μικρή, νεοφυή εταιρία κατασκευής σεισμολογικών οργάνων [5], από τις πολύ λίγες παγκοσμίως, η οποία δραστηριοποιείται σε ένα χώρο με μεγάλο ανταγωνισμό, όπου οι γίγαντες του κλάδου έχουν εμπειρία πλέον του μισού αιώνα και ετήσιους τζίρους που φτάνουν τις δεκάδες εκατομμύρια ευρώ.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη και υλοποίηση ενός επιταχυνσιόμετρου κατάλληλου για την καταγραφή σεισμικών κυμάτων. Οπότε, στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου γίνεται μια συνοπτική περιγραφή διαφόρων θεμάτων που άπτονται του αντικειμένου, όπως είναι τα διάφορα είδη σεισμικών κυμάτων, η αναγκαιότητα καταγραφής τους, αλλά και ο τρόπος αξιοποίησης αυτής της πληροφορίας μετέπειτα για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

## **1.2. Σεισμοί**

### **1.2.1. Τι είναι οι σεισμοί**

Όπως προαναφέρθηκε κύρια αιτία των σεισμών είναι η κίνηση των τεκτονικών πλακών. Η ελαστική/δυναμική ενέργεια που συσσωρεύεται σε κάποια περιοχή σύγκλισης των πλακών απελευθερώνεται με θραύση των πετρωμάτων και μετακίνηση ολόκληρων τμημάτων της τεκτονικής πλάκας, η οποία παρατηρείται κατά μήκος μιας ασυνέχειας του φλοιού που ονομάζεται ρήγμα. Από τον παραπάνω μηχανισμό προκαλούνται οι ισχυρότεροι σεισμοί, όμως δεν είναι ο μόνος. Μάγμα που ανέρχεται και συμπιέζεται στο μαγματικό θάλαμο ενός ηφαιστείου επίσης προκαλεί σεισμούς, ιδίως κατά την τελευταία φάση προ μιας

ηφαιστειακής έκρηξης. Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις σε βυθό με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις προκαλούν μικρότερους σεισμούς. Το ίδιο συμβαίνει με την κατάρρευση υπόγειων κοιλοτήτων, φαινόμενο που εντείνεται όταν π.χ. για διάφορους φυσικούς ή ανθρωπογενείς λόγους υποχωρεί η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

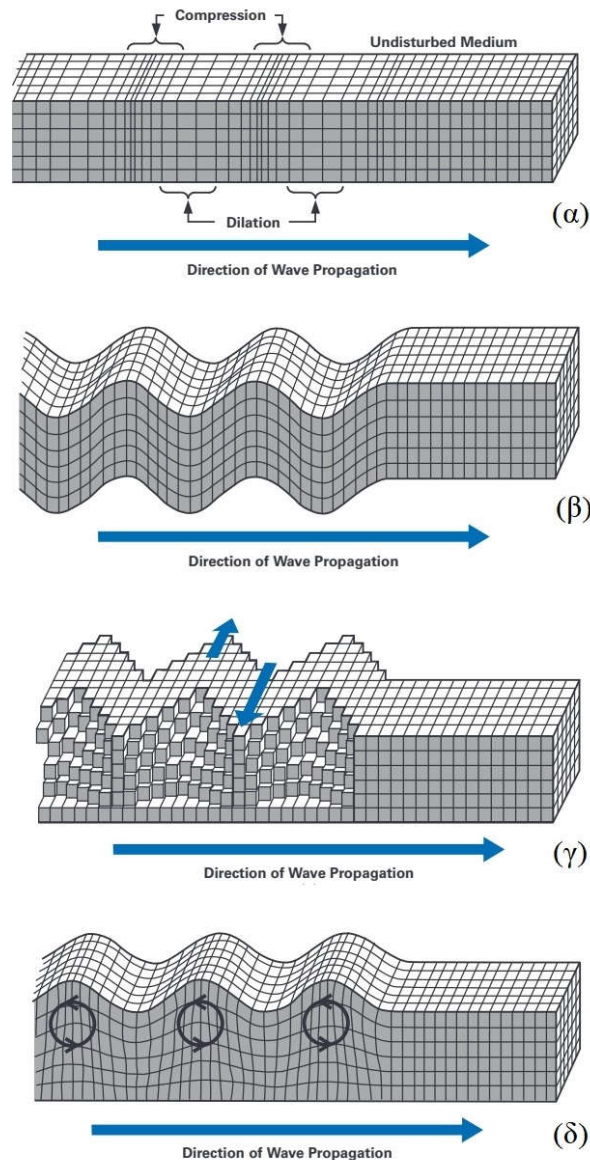
Εκτός όμως από τους φυσικούς σεισμούς υπάρχουν και εκείνοι που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό των πυρηνικών δοκιμών. Άλλες περιπτώσεις ανθρωπογενών σεισμών είναι αυτοί που οφείλονται στην εξόρυξη υδρογονανθράκων. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη συζήτηση για το επιβεβαιωμένο πλέον φαινόμενο της γέννησης σεισμών, όχι ασήμαντου μεγέθους (έως και 4R), σε περιοχές όπου η εξόρυξη πετρελαίου γίνεται με τη μέθοδο της θραύσης των πετρωμάτων με νερό υψηλής πίεσης (υδραυλική ρωγμάτωση) [6], αλλά και ακόμα ισχυρότεροι (ως 6R) κοντά σε τεχνητές λίμνες. Μικρότερης έντασης συμβάντα, τοπικής εμβέλειας, που αποφεύγεται να αποκαλούνται σεισμοί και είναι αποτελέσματα τεχνητών εκρήξεων, μπορεί να σχετίζονται με τη διάνοιξη σπηραγγών και ορυχείων, τη θεμελίωση μεγάλων γεφυρών κλπ, ενώ δονήσεις που μπορεί να επηρεάσουν κτήρια και μνημεία προκαλούνται από βιομηχανικές δραστηριότητες, συρμούς του μετρό κλπ.

Η ενέργεια που εκλύεται από τους σεισμούς διαδίδεται μέσα στη γη, αλλά και επί της επιφάνειάς της, ως σεισμικά κύματα. Αυτά τα κύματα αναπτύσσονται σε διάφορες διευθύνσεις που, όπως θα δούμε, δεν είναι απαραίτητο να συμπίπτουν με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

### **1.2.2. Σεισμικά κύματα**

Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τα κύματα χώρου και τα επιφανειακά. Υπάρχουν δύο είδη κυμάτων χώρου: τα πρωτεύοντα (P, από το αγγλικό primary) και τα δευτερεύοντα (S, secondary), τα οποία στην ελληνική ορολογία αναφέρονται ως επιμήκη και εγκάρσια αντίστοιχα. Τα P αναπτύσσονται κατά τη διεύθυνση διάδοσης ως συμπτκνώσεις και αραιώσεις της ύλης (Σχ. 1.2(α)) και επεκτείνονται στο χώρο σφαιρικά από την εστία του σεισμού (κατά προσέγγιση, στο βαθμό που το τμήμα του φλοιού που περιβάλλει την εστία είναι ομοιόμορφο, χωρίς ασυνέχειες). Παρότι παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόσβεση με την απόσταση σχετικά με τα άλλα είδη κυμάτων, είναι τα γρηγορότερα, με ταχύτητα από 5 έως 8 km/s. Η υψηλή τους απόσβεση τα καθιστά και ως τα λιγότερο επικίνδυνα. Υπενθυμίζεται πως εστία ονομάζεται το σημείο εκδήλωσης του σεισμού μέσα στη γη, ενώ επίκεντρο η κατακόρυφη προβολή του στην επιφάνεια της γης.

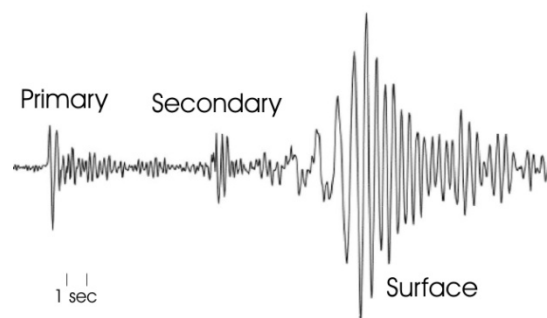
Τα S κύματα (λέγονται και διατμητικά) χαρακτηρίζονται από ταλάντωση των πετρωμάτων σε –κάποια– διεύθυνση κάθετη προς εκείνη της διάδοσης του κύματος (Σχ. 1.2(β)) και ταξιδεύουν με ταχύτητα 60% ως 70% εκείνης των P. Αποσβέννουνται πολύ ασθενέστερα από τα P και ευθύνονται για τις μεγάλες καταστροφές.



Σχ. 1.2 Είδη σεισμικών κυμάτων. Κύματα χώρου: διαμήκη (α), εγκάρσια (β) Επιφανειακά κύματα: Love (γ), Rayleigh (δ) [7].

Όταν η σεισμική ενέργεια, διά των P και S κυμάτων, φτάσει στην επιφάνεια της γης ή σε κάποια άλλη επιφανειακή ασυνέχεια (ρήγμα, μεταβολή τύπου πετρώματος, κοιλότητα με περιεχόμενο νερό ή υδρογονάνθρακες) εν μέρει θα ανακλαστεί, εν μέρει θα κινηθεί επί της επιφάνειας και εν μέρει θα διέλθει διαμέσου αυτής. Αν μιλάμε για την εξωτερική επιφάνεια του φλοιού, προφανώς δεν έχει νόημα η διέλευση.

Φτάνοντας η διαταραχή στην επιφάνεια της γης θα συνεχίσει να διαδίδεται επιφανειακά σε ολόένα μεγαλύτερες αποστάσεις από το επίκεντρο του σεισμού υπό τη μορφή επιφανειακών κυμάτων τα οποία επίσης διακρίνονται σε δύο τύπους, τα L (Love) και τα R (Rayleigh) (Σχ. 1.2(γ) και Σχ. 1.2(δ) αντίστοιχα). Τα επιφανειακά κύματα είναι κατά περίπου 10% πιο αργά από τα κύματα χώρου και είναι αυτά που τελικά δονούν έντονα τις ανθρώπινες κατασκευές και προξενούν καταστροφές. Η ακριβής τους ταχύτητα εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους και μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με αυτόν. Στο Σχ. 1.3 βρίσκεται η καταγραφή μιας οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας εδάφους ενός σεισμού. Διακρίνονται καθαρά τα διαμήκη, τα εγκάρσια και τέλος τα ισχυρότερα επιφανειακά κύματα.



**Σχ. 1.3.** Καταγραφή ταχύτητας εδάφους σεισμικού κύματος (5R, Jan Mayen Island, 15 Ιουνίου 1995).

### 1.2.3. Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός σεισμού

Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη ενός σεισμού είναι το μέγεθος, η ένταση και η φασματική ένταση, με τα δύο πρώτα συχνά να συγχέονται μεταξύ των μη ειδικών.

#### 1.2.3.1. Ένταση

Η ένταση περιγράφει την επίδραση του σεισμού σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία και χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιηθούν ο τρόπος που έγινε η δόνηση του εδάφους και η έκταση των ζημιών που προκλήθηκαν. Εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο του εδάφους της περιοχής και δε μπορεί να έχει μια απολύτως καθορισμένη τιμή. Η ευρύτερα πλέον χρησιμοποιούμενη κλίμακα μέτρησής της παγκοσμίως είναι η τροποποιημένη κλίμακα Mercalli (Modified Mercalli Intensity Scale, *MMI*). Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να προσδιοριστεί η ένταση *MMI* ενός σεισμού, οι οποίες απαιτούν να είναι γνωστά κάποια δεδομένα όπως ο τύπος και η σύσταση εδάφους και υπεδάφους, καθώς και οι μέγιστες τιμές για τη μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση του εδάφους, με το σημαντικότερο

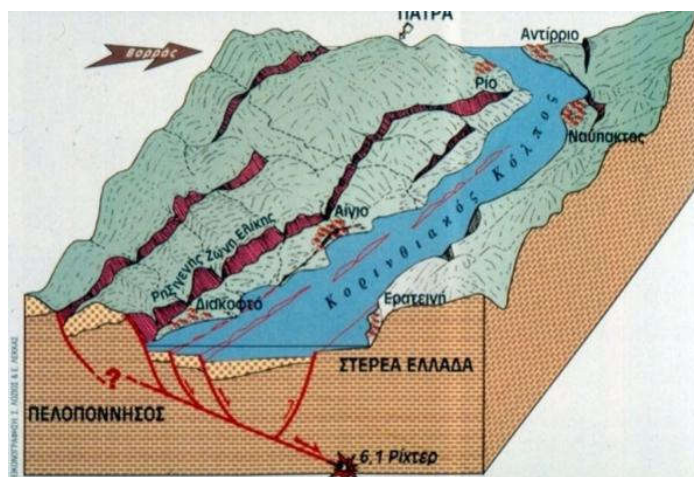
στοιχείο να φαίνεται πως είναι η επιτάχυνση. Παρότι τα διάφορα μοντέλα υπολογισμού της έντασης δίνουν παρεμφερή αλλά όχι ταυτόσημα αποτελέσματα, σε όλα τηρείται προσεγγιστικά ο γενικός κανόνας που θέλει την  $MMI$  να είναι λογαριθμική συνάρτηση της μέγιστης παρατηρούμενης επιτάχυνσης, απαιτείται δηλαδή εκθετική αύξηση της μέγιστης επιτάχυνσης για να αυξηθεί κατά 1 η τιμή της έντασης. Μία ευρέως αποδεκτή έκφραση για την  $MMI$  [7] είναι η

$$MMI = 2.2 \log(PGA_{max}) + 1 \quad (1.1)$$

στην οποία  $PGA_{max}$  [ $\text{cm/s}^2$ ] είναι η μέγιστη τιμή επιτάχυνσης που μετρείται σε ένα σεισμό (PGA: Peak Ground Acceleration). Αντίστοιχες εκφράσεις μπορεί να βρει κανείς διάφορες στη βιβλιογραφία, αν και μόλις δυο – τρεις από αυτές συγκεντρώνουν την ευρύτερη αποδοχή μεταξύ των επιστημόνων.

Γίνεται σχεδόν προφανές από τα παραπάνω πως η ένταση ενός σεισμού δεν είναι μονότονη συνάρτηση της απόστασης από το επίκεντρο. Ας θυμηθούμε το σεισμό της Ανδραβίδας το 2008, κατά τον οποίο οι περισσότερες καταστροφές εντοπίστηκαν στο Δήμο Δυτικής Αχαΐας, αρκετά χιλιόμετρα βορειότερα από το επίκεντρο. Αν και γενικά υπάρχει μια φθίνουσα εξάρτηση με την απόσταση υπάρχουν λόγοι για τους οποίους σε μια πιο απομακρυσμένη τοποθεσία μπορεί η ένταση να είναι μεγαλύτερη απ' ότι σε μια άλλη πλησιέστερη προς το επίκεντρο. Για παράδειγμα, περιοχές με σαθρά εδάφη ή επιχωματώσεις (όπως π.χ. το κέντρο της Πάτρας) αναμένεται να δεχτούν μεγαλύτερο πλήγμα απ' ότι περιοχές με βραχώδες υπόβαθρο, παρότι αυτό δεν είναι γενικός κανόνας. Δεν είναι τυχαίο ότι ο βράχος της Ακρόπολης φιλοξενεί όρθιο τον Παρθενώνα επί 2500 χρόνια με την περιοχή να έχει πληγεί πολλάκις από ισχυρότατους σεισμούς και τους οικισμούς τριγύρω να έχουν ισοπεδωθεί και να έχουν ξαναχτιστεί αμέτρητες φορές στον ρου των αιώνων [8]. Όταν βέβαια δεν αναφερόμαστε απλά σε βραχώδες υπόβαθρο, αλλά σε μια βραχώδη απότομη έξαρση του εδάφους, ο όλος σχηματισμός επηρεάζεται από ένα σεισμό ωσάν να επρόκειτο για μια τεχνητή δομή και συνεπώς μπορεί να αποδειχθεί πως επηρεάζεται περισσότερο (και μαζί και οι όποιες ανθρώπινες κατασκευές μπορεί να βρίσκονται πάνω του, π.χ. ναοί, φρούρια, σπίτια κλπ). Μεγάλο πλήγμα επίσης δέχονται περιοχές στις οποίες καταλήγουν ρήγματα, είτε αυτά εμφανίζονται στην επιφάνεια είτε όχι, καθώς, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τέτοιες ασυνέχειες δρουν ουσιαστικά ως κανάλια που συλλέγουν την σεισμική ενέργεια από το εσωτερικό της γης και τη διοχετεύουν προς την επιφάνεια. Στο Σχ. 1.4 βλέπουμε μια τρισδιάστατη τομή του ανώτερου φλοιού στην περιοχή του Κορινθιακού

κόλπου, όπου φαίνονται κάποια ρήγματα και τα ίχνη τους στην επιφάνεια. Στο σύνδεσμο [9] μπορεί κανείς να βρει κάποια χαρακτηριστικά animations για την εκτόνωση της σεισμικής ενέργειας κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, πλησίον της πόλης του San Francisco, με την πάροδο των δευτερολέπτων, στην περίπτωση ενός σεισμού με εστία κάπου μακρύτερα επί του ρήγματος. Το μεγάλο εστιακό βάθος ενός σεισμού (δεκάδες χιλιόμετρα), αν μάλιστα συνδυαστεί και με τον προαναφερθέντα παράγοντα, είναι επίσης ένας καλός λόγος ώστε ένας σεισμός να γίνει πιο αισθητός μακριά από το επίκεντρο απ' ό,τι στο ίδιο το επίκεντρο.



**Σχ. 1.4** Τομή του Κορινθιακού Κόλπου στην οποία φαίνονται διάφορα ρήγματα. Η κίνηση της Στερεάς Ελλάδας προς βορρά προκαλεί την καταβύθιση του πυθμένα του Κορινθιακού Κόλπου.

Τέλος, δεν πρέπει να αποκλείσουμε και το ενδεχόμενο, ανάλογα με τυχόν ανακλάσεις στο εσωτερικό του φλοιού και το χρονισμό με τον οποίο θα φτάσουν στην επιφάνεια τα σεισμικά κύματα, να έχουμε κάτι σαν τα στάσιμα κύματα, η αλλιώς ζώνες με μικρές μετατοπίσεις/επιταχύνσεις και άλλες με μεγαλύτερες. Η προσωπική εμπειρία του γράφοντος από το σεισμό του 1999 στην Πάρνηθα είναι χαρακτηριστική: Στην περιοχή νοτίως της Πάρνηθας, η οποία υπέστη μεγάλες καταστροφές, τα κτήρια που κατέρρευσαν ή είχαν πολύ μεγάλες ζημιές κατανέμονταν (χονδρικά) σε γραμμές με κατεύθυνση βορρά – νότο, χωρίς η σύσταση του εδάφους, πλησίον της επιφάνειας τουλάχιστο όπου είναι σχεδόν ομοιόμορφη, να δικαιολογεί ένα τέτοιο φαινόμενο. Στις ενδιάμεσες ζώνες μεταξύ αυτών των γραμμών η επιπτώσεις ήταν ελάχιστες. Αναφορά σε αυτό το φαινόμενο εντοπίστηκε στην [47].

### 1.2.3.2. Φασματική Ένταση

Ενώ η ένταση ενός σεισμού εξαρτάται από την επίδρασή του και από το πώς έγινε αυτός αισθητός σε μια τοποθεσία, η φασματική ένταση (Spectral Intensity,  $SI$ ) είναι μέτρο του μεγέθους του ποσοστού εκείνου της ενέργειας του σεισμού που δύναται να προκαλέσει καταστροφές σε ανθρώπινες κατασκευές. Η τιμή της  $SI$  υπολογίζεται από την φασματική κατανομή ταχύτητας  $S_v$  του σεισμού μέσα από την ακόλουθη έκφραση:

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{T=0.1}^{T=2.5} S_v dT \quad (1.2)$$

Οι περισσότερες από τις ανθρώπινες σταθερές κατασκευές (π.χ. κτήρια, γέφυρες) έχουν την πρώτη τους φυσική περίοδο σε κάποια τιμή μεταξύ 0.1s και 2.5s, ενώ οι πιο στιβαρές από αυτές έχουν φυσική συχνότητα μεταξύ 1.5s και 2.5s [10] – [11]. Καθώς ο υπολογισμός της  $SI$  βασίζεται στην ανάλυση του φάσματος ταχύτητας, άλλες πηγές δονήσεων αποκλείονται, καθώς βρίσκονται εκτός της προαναφερθείσας ζώνης (π.χ. οι δονήσεις από το συρμό του μετρό). Συνεπώς η  $SI$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στάνταρ για τη μελέτη της επίδρασης ενός σεισμού στη δομική κατάσταση ενός κτηρίου και ιδίως για τη σύγκριση στις επιδράσεις επί ενός κτηρίου μεταξύ διαφορετικών σεισμών (σεισμών με διαφορετική φασματική υπογραφή).

Να διευκρινιστεί σε αυτό το σημείο πως κάθε στερεό σώμα έχει πολλές ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης. Για κάθε ιδιοσυχνότητα η ταλάντωση αναπτύσσεται με διαφορετικό τρόπο. Μπορεί να έχουμε κίνηση γραμμική, περιστροφική, ακτινική, κυματοειδή κλπ. Αν μιλάμε για μεγάλες κατασκευές, συνήθως η πρώτη ή ίσως και η δεύτερη ιδιοσυχνότητα βρίσκονται εντός του φάσματος όπου περικλείεται το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας των σεισμικών κυμάτων και συνεπώς μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια και να εκτελέσουν ταλάντωση μέγιστου πλάτους. Ένας καλός τρόπος να μελετήσει κανείς τις ιδιοσυχνότητες μιας κατασκευής από το γραφείο του, είναι η χρήση κάποιου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, όπως είναι για παράδειγμα το Solidworks της Dassault [12]. Επιτόπιες μετρήσεις περιλαμβάνουν την τοποθέτηση αισθητήρων (αξελερόμετρα) σε διάφορα σημεία της κατασκευής και μελέτη της απόκρισής του στη διέγερση από σεισμούς γνωστής φασματικής κατανομής την οποία εξάγουμε από τις μετρήσεις με αισθητήρες τοποθετημένους ακριβώς επί του εδάφους.

### 1.2.3.3. Μέγεθος

Το μέγεθος εκφράζει το ποσό της ενέργειας που εκλύθηκε στην εστία ενός σεισμού. Η τιμή του προφανώς δεν εξαρτάται από την τοποθεσία όπου έγινε η μέτρηση και είναι ένας αριθμός στην κλίμακα Ρίχτερ. Ρήγματα με μεγαλύτερο μήκος μπορούν να δώσουν ισχυρότερους σεισμούς. Ο ισχυρότερος σεισμός που έχει καταγραφεί ποτέ είναι αυτός που χτύπησε τη Χιλή το 1960 με μέγεθος 9.5R και συνέβη σε ένα ρήγμα με μήκος περίπου 1000km. Συγκριτικά, το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια έχει μήκος 1200km, ενώ το ρήγμα της Πάρνηθας, που έδωσε τον σεισμό των 5.9R το 1999, μόλις 15km περίπου (Σχ. 1.5).



Σχ. 1.5 Ρήγματα στον ευρύτερο Αττικό χώρο.

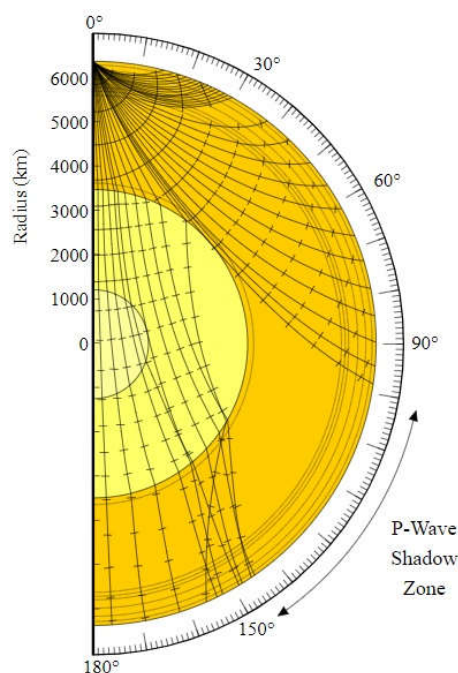
Ο συσχετισμός μεταξύ του μεγέθους και την έντασης δεν είναι αυστηρά καθορισμένος και εξαρτάται από παράγοντες όπως το εστιακό βάθος και η σύσταση του εδάφους ανάμεσα στο επίκεντρο και στο σταθμό μέτρησης. Αυτό σημαίνει ότι η καταγραφή της ταχύτητας και της επιτάχυνσης σε κάποιο σημείο του χάρτη δεν επαρκεί για να προσδιοριστεί με ακρίβεια το μέγεθος ενός σεισμού. Ενώ η κλίμακα Ρίχτερ επινοήθηκε αρχικά (1934) για να προσδιορίζεται το μέγεθος ενός σεισμού από τις μετρήσεις ενός μόνο σειсмоγράφου, σε μια περιοχή με περίπου γνωστή σύσταση των πετρωμάτων και άρα με δεδομένο μοντέλο περιγραφής του φλοιού, στα νέα ακριβέστερα μοντέλα απαιτείται για τον προσδιορισμό του η καταγραφή του συμβάντος από περισσότερους σταθμούς, κυρίως κοντινούς προς το επίκεντρο, αλλά και απομακρυσμένους, καθώς και η ύπαρξη αξιόπιστων μοντέλων για τη σύσταση του φλοιού κατά μήκος των νοητών γραμμών που ενώνουν τους σταθμούς με το επίκεντρο και την εστία [14]. Η έκφραση που συνδέει το μέγεθος  $M$  ενός σεισμού με την εκλυθείσα ενέργεια  $E$  είναι



$$\log E = 11.8 + 1.5M \quad (1.3)$$

από την οποία προκύπτει πως αύξηση του μεγέθους κατά 1 εκφράζει αύξηση της ενέργειας κατά 32 φορές.

Οι οδοί πάντως μέσω των οποίων φτάνει η σεισμική ενέργεια σε κάποιο σταθμό δεν είναι μόνο οι δύο προαναφερθέντες, καθώς ανακλάσεις στις διάφορες ασυνέχειες του φλοιού και του μανδύα διαχέουν την ενέργεια προς διάφορες κατευθύνσεις, ενώ οι διάφοροι τύποι κυμάτων εντός των διάφορων τύπων πετρωμάτων ή μάγματος έχουν διαφορετικές ταχύτητες. Με απλά λόγια, μετά την εκδήλωση ενός ισχυρού σεισμού ο πλανήτης ολόκληρος κουνουρίζει για αρκετή ώρα κι έτσι ένα συμβάν που στο επίκεντρό του μπορεί να διήρκεσε π.χ. ένα λεπτό μπορεί σε μια πολύ απομακρυσμένη τοποθεσία να καταγράφεται ως ασθενείς μετακινήσεις του εδάφους, ιδίως πολύ χαμηλής συχνότητας, για αρκετά λεπτά. Χονδρικά, ένας σεισμός με μέγεθος πάνω από 4.5R μπορεί να ανιχνευθεί από ευαίσθητα σεισμόμετρα σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη, εφόσον η τοποθεσία του οργάνου δεν βρίσκεται στη σκιά που δημιουργεί ο ρευστός πυρήνας της γης (Σχ. 1.6).



**Σχ. 1.6** Απεικόνιση της προσεγγιστικής πορείας που ακολουθούν τα P κύματα εντός της γης μετά την εκδήλωση ενός ισχυρού σεισμού [15]. Οι χρωματικές ζώνες αντιστοιχούν στον εσώτερο πυρήνα, τον εξώτερο πυρήνα και το μανδύα. Μεταξύ άλλων σε αυτή την απεικόνιση, παρατηρούμε τη ζώνη σκιάς (χονδρικά από τις 100 ως τις 145 μοίρες) στην οποία ο σεισμός δε θα καταγραφεί από τα σεισμόμετρα.

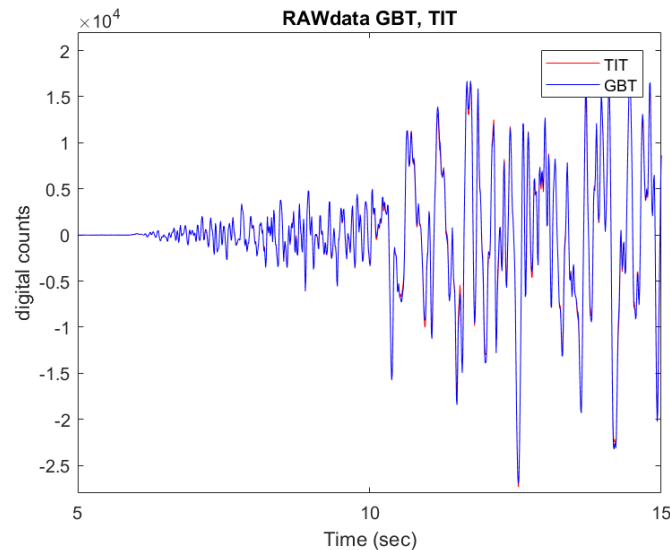
Με δεδομένη την παραπάνω ανάλυση δεν πρέπει να προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι το μέγεθος ενός σεισμού εκτιμάται συχνά διαφορετικά από διαφορετικούς οργανισμούς/εργαστήρια, ή ότι μπορεί να εκτιμηθεί διαφορετικά από το ίδιο εργαστήριο, όταν συμπεριληφθούν δεδομένα από περισσότερους σταθμούς. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί η εκτίμηση από το γεωδυναμικό ινστιτούτο μιας μακρινής χώρας να είναι ακριβέστερη από την αντίστοιχη τοπικών οργανισμών, λόγω καλύτερου εξοπλισμού και ακριβέστερων υιοθετημένων μοντέλων για την ενδιάμεση σύσταση της γης. Αντίστοιχη δυσκολία παρατηρείται και στην εκτίμηση του εστιακού βάθους, ενώ ο προσδιορισμός του επίκεντρου γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην Ελλάδα αυτή τη στιγμή λειτουργεί το αυτόματο σύστημα επίλυσης σεισμών (προσδιορισμός του μεγέθους και της εστίας) από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών [4], ενώ και τα διάφορα εργαστήρια σεισμολογίας ανακοινώνουν το εκτιμώμενο μέγεθος συνήθως λίγα λεπτά μετά την εκδήλωση ενός ισχυρού σεισμού. Λίγη ώρα αργότερα ανακοινώνονται οι διορθωμένες/αναθεωρημένες τιμές.

#### ***1.2.3.4. Μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, συχνότητα***

Ένας σεισμός λοιπόν γίνεται αισθητός στην επιφάνεια της γης ως δονήσεις του εδάφους, δεν είναι σπάνιο μάλιστα στο τέλος της δραστηριότητας να έχει προκύψει και κάποια μόνιμη μετατόπιση του εδάφους ή του θαλάσσιου πυθμένα, μικρής ή μεγαλύτερης κλίμακας, είτε επί του οριζώντιου επιπέδου, είτε στην κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτές οι μόνιμες μετατοπίσεις, για τον προσδιορισμό των οποίων παλιότερα απαιτείτο η ύπαρξη προ-εγκατεστημένων σταθμών συμβολομετρίας λείζερ, πλέον, για τις επιφάνειες ξηράς, μετρούνται με ακρίβεια χιλιοστών του μέτρου με τηλεπισκόπηση από δορυφόρους [16].

Η κίνηση του εδάφους κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι εν ολίγοις ακανόνιστη, αλλά στις περισσότερες των περιπτώσεων μπορεί να περιγραφεί ως η υπέρθεση τριών γραμμικών κινήσεων σε τρεις ορθογώνιους άξονες  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , με τις διευθύνσεις  $X$  και  $Y$  να ορίζουν το οριζόντιο επίπεδο. Για τους  $X$  και  $Y$  άξονες δεν επιλέγουμε τυχαίες διευθύνσεις κι έτσι τελικά στην ορολογία της σεισμολογίας αναφερόμαστε στις συνιστώσες  $E$  (East),  $N$  (North) και  $Z$ . Τυχόν περιστροφικές κινήσεις περί κάποιον οριζόντιο άξονα ή περί την κατακόρυφο είναι υπαρκτές, αλλά γενικά μικρότερης σημασίας, δεν καταγράφονται από τα συνήθη σεισμολογικά όργανα και αντιμετωπίζονται ως ανεπιθύμητος θόρυβος στην καταγραφή των τριών γραμμικών κινήσεων [17]. Για το λόγο αυτό τα καρτεσιανά όργανα περιέχουν τρεις ανεξάρτητους αισθητήρες που καταγράφουν την κίνηση σε κάθε έναν από τους τρεις άξονες ξεχωριστά. Υπάρχει πάντως και η σχεδιαστική προσέγγιση κατά την οποία οι τρεις

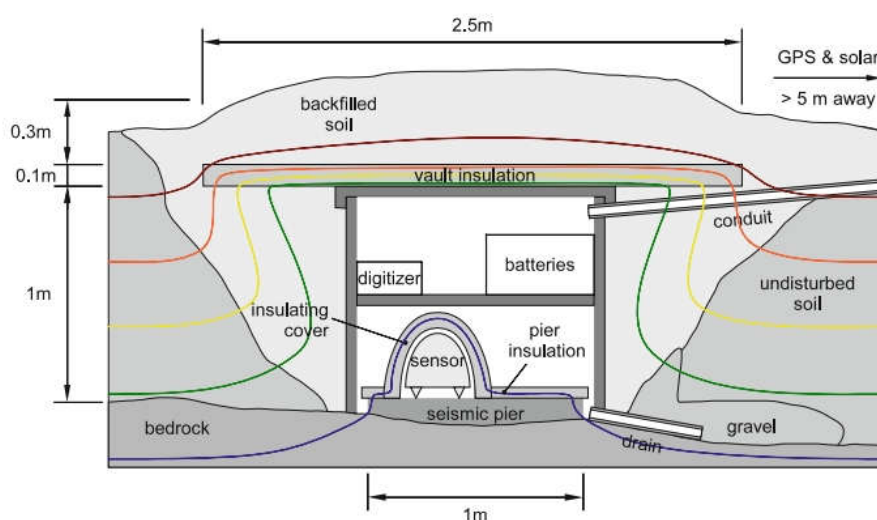
αισθητήρες τοποθετούνται συμμετρικά επί της περιφέρειας κύκλου, με βήμα  $120^\circ$ , και με άξονες ταλάντωσης U, V, W σε κλίση  $35^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο, οπότε ουσιαστικά ο κάθε αισθητήρας επηρεάζεται από την κίνηση σε οποιαδήποτε από τις τρεις καρτεσιανές διευθύνσεις και οι κινήσεις στους άξονες E, N, W προκύπτουν έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία (εφαρμόζονται κατάλληλοι συντελεστές – πίνακες) [20].



**Σχ. 1.7** Καταγραφή επιτάχυνσης εδάφους σεισμικού κύματος από δύο όργανα (μπλε και κόκκινη γραμμή). Οι δύο καταγραφές σχεδόν συμπίπτουν [59].

Στο Σχ. 1.7 αποτυπώνεται η καταγραφή ενός σεισμού (στην κατακόρυφη διεύθυνση) από δύο επιταχυνσιόμετρα (αναφέρονται συνήθως ως αξελερόμετρα), σε μια προσπάθεια να συγκριθούν οι επιδόσεις τους [59]. Όπως και στην καταγραφή του σχήματος Σχ. 1.3, παρατηρούμε πως δεν πρόκειται για κάποια περιοδική κυματομορφή. Μελετώντας τα δεδομένα ενός μόνο σταθμού θα μπορούσε κανείς να μπερδέψει μια ανθρωπογενή δόνηση με ένα σεισμό. Δεν υπάρχει κάτι που άμεσα να επιβεβαιώνει πως η δεδομένη καταγραφή είναι σεισμός και όχι ένα μεγάλο κλιματιστικό σε απόσταση 30m που ξεκινάει τη λειτουργία του ή ένα φορτηγό που κινείται σε κοντινό δρόμο. Για το λόγο αυτό οι σεισμολογικοί σταθμοί είθισται να βρίσκονται μακριά από τον αστικό ιστό και όσο πιο μακριά γίνεται από πηγές μηχανικού θορύβου, ανθρώπινες (σιδηροτροχιές, αυτοκινητόδρομοι, λατομεία) ή φυσικές (χειμάρροι, παραλίες). Καθώς τα σεισμολογικά όργανα είναι πολύ ευαίσθητα επηρεάζονται από μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης, της θερμοκρασίας και του μαγνητικού πεδίου και καταγράφουν ακόμα και ασθενείς ήχους. Έτσι, φροντίζεται ώστε, αν είναι τοποθετημένα επιφανειακά, να βρίσκονται προστατευμένα μέσα σε ειδικά κιβώτια, οριακά θαμμένα στο έδαφος (Σχ. 1.8), ενώ σε άλλες περιπτώσεις τοποθετούνται μέσα σε οπές (boreholes) που

ανοίγονται στο έδαφος, σε βάθος 1-2 μέτρα ή βαθύτερα [21]. Ενδεικτικά αναφέρεται πως ένα broadband σεισμόμετρο (§2.3.4) ικανό να διακρίνει σεισμικά κύματα από τον ελάχιστο θόρυβο γης (NLNM, βλ. §1.3) στα 100s, οφείλει να έχει κατακόρυφη ευαισθησία σε πιέσεις μικρότερη από  $a_G=0.04$  (nm/s<sup>2</sup>)/Pa, οριζόντια ευαισθησία σε πιέσεις μικρότερη από  $a_T=0.7$  (nm/s<sup>2</sup>)/Pa και ευαισθησία σε μεταβολές του μαγνητικού πεδίου μικρότερη από  $a_M=0.7$  (nm/s<sup>2</sup>)/T [21].



Σχ. 1.8 Κιβώτιο εγκατάστασης σεισμολογικών οργάνων [21].

Φυσικά, υπάρχουν τρόποι να διακρίνει κανείς ένα σεισμό από άλλες πηγές θορύβου. Όσον αφορά στην καταγραφή αυτή καθεαυτή, αν πρόκειται για σεισμό, η δόνηση έχει συνήθως διάρκεια μεγαλύτερη (λόγου χάρι) από εκείνη μιας πόρτας που κλείνει, αλλά η σπουδαιότερη «υπογραφή» ενός σεισμού είναι η ασθενής υψίσυχη ταλάντωση που προκαλούν τα P κύματα πριν την εμφάνιση των S και των επιφανειακών (Σχ. 1.3). Ένας σεισμός που μπορεί να μας φανεί ότι διήρκεσε λίγα δευτερόλεπτα, συνήθως αποτελεί μια καταγραφή πολλών δεκάδων δευτερολέπτων ή λίγων λεπτών. Επειδή όμως ακόμα κι έτσι πάντα υπάρχει η περίπτωση λάθους, η μόνη πραγματική επιβεβαίωση έρχεται από την καταγραφή του ίδιου συμβάντος από περισσότερους του ενός σταθμούς.

Στην [22] μπορούμε να δούμε τις μέγιστες **επιταχύνσεις** (PGA) που καταγράφηκαν σε κάποιους σεισμούς. Παρατηρούμε πως, αν και δεν είναι σύνηθες, μπορεί να έχουμε τιμές ως και πάνω από 4g ( $g=9.81\text{m/s}^2$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας), ενώ στο σεισμό της Αθήνας το 1999 μετρήθηκαν ή υπολογίστηκαν έως 0.6-0.7g οριζόντια και έως 1g κατακόρυφα [47]. Αντίστοιχες πληροφορίες μπορούμε να βρούμε για τις μέγιστες **ταχύτητες** εδάφους που

αναπτύσσονται στους σεισμούς (peak ground velocity – PGV) με τις πλέον υψηλές τιμές να είναι λίγα m/s.

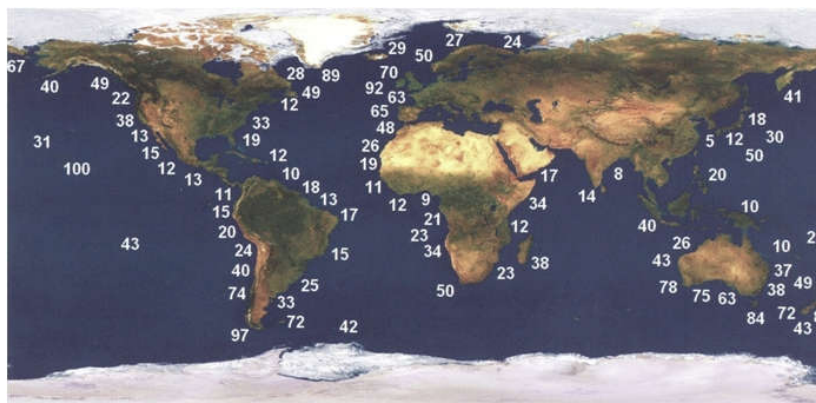
Όσον αφορά στη **συχνότητα**, οι περισσότεροι σεισμοί, στο βαθμό που γίνονται αισθητοί από τον άνθρωπο, περιέχουν συχνότητες μέσα στη ζώνη 0.1Hz – 10Hz. Μπορεί να έχουν συνιστώσες και εκτός της προαναφερθείσας μπάντας, αλλά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους περικλείεται σε αυτή. Πάντως, για να μπορούμε να πούμε πως καταγράφουμε σχεδόν το σύνολο της σεισμικής κίνησης σε ένα σταθμό, επιδιώκουμε να έχουμε ένα εύρος ζώνης που ξεκινάει από τα 120s ή 150s και να φτάνει ως τα 200Hz. Ας παρατηρήσουμε σε αυτό το σημείο πως για το κάτω όριο συχνότητας αποφεύγεται η χρήση της συχνότητας και χρησιμοποιείται η περίοδος. Δε θα πούμε, για παράδειγμα, πως ένα όργανο έχει προδιαγραφές 8.33mHz – 60Hz, αλλά θα πούμε πως είναι 120s – 60Hz. Όπως προαναφέρθηκε, περίοδο πολλών δευτερολέπτων ή κάποιων λεπτών έχουν τα σεισμικά κύματα τα προερχόμενα από πολύ απομακρυσμένες τοποθεσίες (πολλές εκατοντάδες ή κάποιες χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά), ενώ οι μετατοπίσεις για τέτοια κύματα είναι της τάξης των ολίγων nm. Επίσης, συμβαίνουν παραμορφώσεις του φλοιού με ακόμα μεγαλύτερη περίοδο, πολλών ωρών, που οφείλονται στις δυνάμεις παλίρροιας μεταξύ γης – ήλιου – σελήνης της τάξης επίσης του nm, οι οποίες όμως είναι πέραν των δυνατοτήτων των συνηθέστερων τύπων σεισμομέτρων.

Η παλινδρομική **μετατόπιση** του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός σεισμού έχει συνήθως μέγιστο πλάτος κάποιων εκατοστών ή κάποιων δεκάδων εκατοστών, αν και έχουν μετρηθεί και μετατοπίσεις της τάξης του μέτρου και ακόμα μεγαλύτερες. Όσον αφορά στην καταγραφή του σεισμού η μετατόπιση δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας. Δεν καταγράφεται η ίδια με κάποιον τρόπο, αλλά προκύπτει από την ταχύτητα μέσω ολοκλήρωσης, ενώ και η ταχύτητα μπορεί να μην καταγράφεται και να προκύπτει μέσω ολοκλήρωσης από την επιτάχυνση (τα ζητήματα αυτά θα τα δούμε με περισσότερη λεπτομέρεια στην §3.1). Όμως η μέγιστη τιμή της μετατόπισης μπορεί να είναι κρίσιμης σημασίας σε μεγάλα έργα υποδομής, τα οποία έχουν προδιαγραφές αντοχής σε σεισμικές μετατοπίσεις μέχρι κάποιου ορίου. Τέτοια έργα είναι π.χ. μεγάλες γέφυρες, σήραγγες, στάδια, αγωγοί πετρελαίου ή φυσικού αερίου, φράγματα και πυρηνικά εργοστάσια [23], αλλά και πιο ειδικές εφαρμογές, όπως μεγάλοι επιταχυντές σωματιδίων και ανιχνευτές βαρυτικών κυμάτων [24].

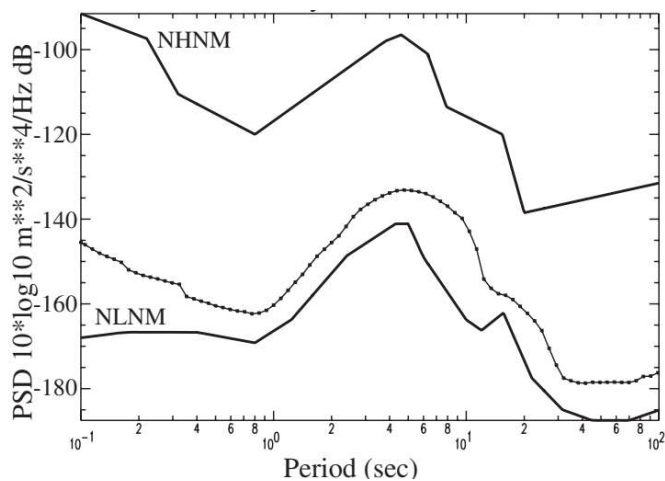
### 1.3. Σεισμικός θόρυβος

Εκτός από τους σεισμούς υπάρχει μία σειρά άλλων λόγων ώστε το έδαφος να δονείται. Ο πλέον προφανής (και συνήθως ο πιο σημαντικός) είναι οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Σε περιοχές μακριά από ανθρώπινες δραστηριότητες το έδαφος εξακολουθεί να δονείται από άλλα, φυσικά αίτια. Πρακτικά, οτιδήποτε κινείται στην επιφάνεια της γης ή στον αέριο ή υδάτινο όγκο πάνω από αυτή δύναται να προκαλέσει δονήσεις του εδάφους στην ξηρά, αλλά και του θαλάσσιου πυθμένα. Ο άνεμος, η βροχή, η κίνηση των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων, τα θαλάσσια ρεύματα, οι κινήσεις των δέντρων και των φυτών από τον άνεμο, οι διάφοροι ήχοι, οι κεραυνοί, ο βηματισμός των ζώων, οι συστολές – διαστολές των πετρωμάτων με τις αλλαγές της θερμοκρασίας είναι μερικές από τις αιτίες δόνησης του εδάφους. Οι δονήσεις αυτές υπάρχουν διάχυτες παντού, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό και αλλάζουν ανάλογα με παραμέτρους όπως είναι η ύπαρξη ή όχι ζωής (έρημος – δάσος/νερά), οι καιρικές συνθήκες, οι εποχές και οι ώρες της ημέρας. Οι μετρήσεις όμως σε μεγάλο βάθος (π.χ. στα θεμέλια ενός μεγάλου φράγματος ή βαθιά μέσα σε ένα ορυχείο [25]) δείχνουν πως οι περισσότερες από αυτές τις δονήσεις που προέρχονται από την άμεση επιφάνεια αποσβέννυνται σημαντικά και απομένει ένας θόρυβος υπόβαθρου. Ο θόρυβος αυτός προέρχεται από τα θαλάσσια κύματα που συλλέγουν ενέργεια από τον άνεμο σε μήκος διαδρομής χιλιάδων χιλιομέτρων και την εκτονώνουν στις ακτές, με τις πλέον ισχυρές πηγές τέτοιου θορύβου να είναι οι ακτές στους ωκεανούς. Ο θόρυβος αυτός ταξιδεύει με τη σειρά του αρκετές χιλιάδες χιλιόμετρα εντός του εδάφους, ώστε πρακτικά καμία γωνιά της γης να μη μπορεί να θεωρηθεί απαλλαγμένη από αυτόν. Στο Σχ. 1.9 βλέπουμε έναν παγκόσμιο χάρτη της ισχύος των κυμάτων ο οποίος φτιάχτηκε σε αναζήτηση των περιοχών με υψηλό ενεργειακό δυναμικό για την εκμετάλλευσή του από τον άνθρωπο. Τα νούμερα είναι τέτοια που δεν πρέπει να μας προξενεί εντύπωση το φαινόμενο του σεισμικού θορύβου λόγω των κυμάτων.

Το φαινόμενο του σεισμικού θορύβου έχει μελετηθεί διεξοδικά. Το μοντέλο που είναι πλέον γενικά αποδεκτό για την περιγραφή του αποτυπώνεται στην εργασία του J. Peterson (1993) [26]. Το γράφημα του Σχ. 1.10 δείχνει, συναρτήσει της περιόδου, τα άνω και κάτω όρια του σεισμικού θορύβου (σε μονάδες  $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz dB}$ ) σε οποιοδήποτε σημείο της γης (με κουκίδες είναι η μέση τιμή τους) με βάση αυτό το μοντέλο. Οι δύο αυτές οριακές γραμμές αναφέρονται αντίστοιχα ως New High Noise Model (NHNM) και New Low Noise Model (NLNM) και θα τις συναντήσουμε στο χαρακτηρισμό των σεισμολογικών οργάνων.



Σχ. 1.9 Παγκόσμιος χάρτης δυναμικού κυμάτων κατά μήκος των ακτών, μέσες ετήσιες τιμές σε kW/m. Παρατηρούμε πως η Μεσόγειος δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από απόψεως ισχύος κυμάτων.



Σχ. 1.10 New High Noise Model και New Low Noise Model [27].





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

# **ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ**

### **2.1. Σεισμολογικοί σταθμοί**

Όπως θα δούμε και με περισσότερη λεπτομέρεια στην §2.3.5, ένας σεισμολογικός σταθμός περιλαμβάνει ένα αξελερόμετρο και ένα σεισμόμετρο ως ανεξάρτητες μονάδες, μέσα στο ίδιο κιβώτιο (θάλαμος - vault). Βρίσκεται συνήθως σε τοποθεσίες μακριά από τους αστικούς θορύβους. Το κάθε ένα αισθητήριο όργανο συνδέεται με ψηφιακό καταγραφέα (digitizer) ο οποίος διαθέτει κεραία GPS και το απαραίτητο hardware – software για την επικοινωνία του μέσω κινητής ή σταθερής τηλεφωνίας με το κέντρο λήψης δεδομένων (βλ. και Σχ. 1.8). Προκειμένου να μη δημιουργείται μηχανικός θόρυβος από τυχόν κινήσεις της κεραίας του GPS και των Φ/Β πάνελ (αν υπάρχουν) από τον άνεμο, σωστό είναι αυτά να εγκαθίστανται κάποια μέτρα μακριά από το κιβώτιο.

Το κιβώτιο φροντίζεται ώστε να είναι κατά το δυνατόν στεγανό και θερμικά μονωμένο από το περιβάλλον του. Τα όργανα βρίσκονται το καθένα εντός στεγανού κελύφους, αλλά αυτή η προστασία δεν είναι ποτέ επαρκής από μόνη της, οπότε το κιβώτιο οφείλει να προστατεύει τα όργανα από τα στοιχεία της φύσης και από ζωντανούς εισβολείς. Η θερμική μόνωση του κιβωτίου εξασφαλίζει πως απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δε θα καταγράφονται ως σεισμικά συμβάντα από τη συστολή – διαστολή των μηχανικών μερών των αισθητήρων, ενώ κάποιοι κατασκευαστές [28] προσφέρουν ως αξεσουάρ ειδικά θερμομονωτικά καλύμματα για τα όργανα που λανσάρουν. Η στεγανότητα του κιβωτίου, αλλά και του ίδιου του οργάνου εντός του κελύφους του, αποκλείει τη δημιουργία ρευμάτων αέρα όταν αλλάζει η εξωτερική πίεση και δημιουργείται διαφορικό πίεσεως με το εσωτερικό της συσκευής, ρεύματα τα οποία επίσης μπορούν να διεγείρουν τα αισθητήρια. Το διαφορικό πίεσεως μεταξύ του εξωτερικού χώρου (δηλαδή το εσωτερικό του κιβωτίου) και του εσωτερικού χώρου εντός του κελύφους του οργάνου μπορούν επίσης να δημιουργήσουν δυνάμεις παραμόρφωσης του κελύφους και να οδηγήσουν σε εσφαλμένες καταγραφές. Η πολύμηνη ή πολυετής λειτουργία ενός σταθμού τον καθιστά ευάλωτο στην εισχώρηση υγρασίας ή εντόμων, ακόμα και αν λαμβάνονται όλα τα προληπτικά μέτρα

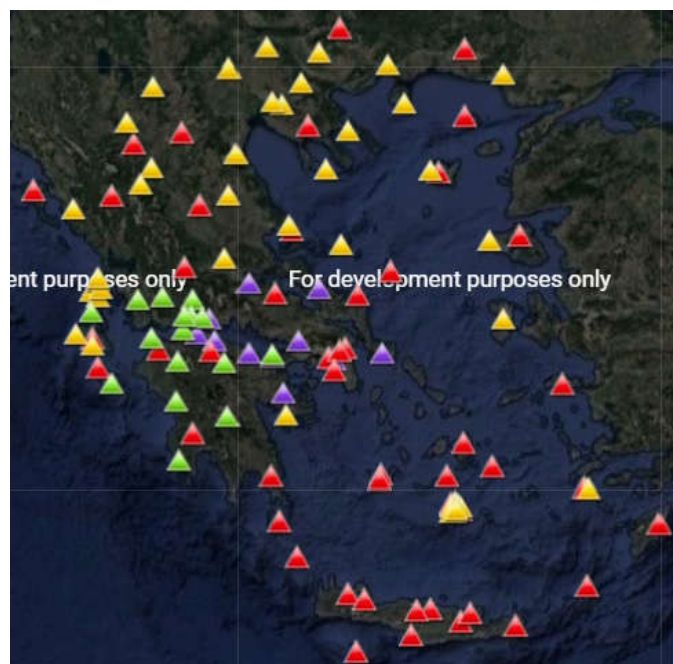
(φλάντζες, τσιμούχες, σιλικόνη κλπ) και γι' αυτό δεν πρέπει να αφήνεται στην τύχη του, αλλά να επιθεωρείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Βέβαια, η καθημερινή παρακολούθηση των δεδομένων που αποστέλλει ένας σταθμός αποτελεί ένα δείκτη της υγείας και της καλής λειτουργίας του, αλλά η εμπειρία έχει δείξει πως η επιτόπια επιθεώρηση κάθε λίγους μήνες μπορεί να προλάβει διάφορα απρόοπτα.

Προκειμένου να εξασφαλίζεται η συνεχής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία του σταθμού, εξυπηρετεί αν αυτοί τοποθετούνται σε ξωκλήσια, εγκαταλελειμμένα σχολεία, ιδιωτικές αγροικίες κλπ. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό, δημιουργείται υποδομή για τη παροχή ενέργειας από Φ/Β πάνελ με την υποστήριξη μπαταρίας, η οποία συνήθως μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ισχύ για αρκετές μέρες, ακόμα και αν διακοπεί η παροχή από το πάνελ (π.χ. λόγω βλάβης ή παρατεταμένης νεφοκάλυψης). Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο μια σημαντική παράμετρος στη λειτουργία ενός σεισμολογικού οργάνου (σένσορας + digitizer + περιφερειακά, π.χ. σύστημα GPS με εξωτερική κεραία) είναι και η κατανάλωση ισχύος, η οποία για ένα τυπικό εμπορικό προϊόν είναι της τάξης του 1Watt ή και μικρότερη. Είναι σχεδόν αυτονόητο πως αποφεύγεται η τοποθέτηση σταθμών σε αφύλακτα σημεία με ελεύθερη πρόσβαση, για την αποφυγή κλοπών και βανδαλισμών, ενώ, κατά περίπτωση, ο εξοπλισμός μπορεί να είναι ασφαλισμένος έναντι κλοπής ή φυσικής καταστροφής, καθώς η αξία του μπορεί να ανέρχεται σε δεκάδες χιλιάδες ευρώ. Η ασφάλιση του εξοπλισμού έναντι φθορών συχνά ισχύει ακόμα και για τη μεταφορά του, όταν αυτή δε γίνεται με την ευθύνη του συνεργείου εγκατάστασης ή του ιδιοκτήτη, αλλά μέσω π.χ. κάποιας μεταφορικής εταιρίας.

Παλαιότερα, μέχρι πριν είκοσι πέντε χρόνια, η μεταφορά δεδομένων από τους σταθμούς γινόταν χειροκίνητα: κάποιος έπρεπε να πηγαίνει περιοδικά στους σταθμούς και να συλλέγει τα δεδομένα, π.χ. παίρνοντας το γεμάτο σκληρό δίσκο από το καταγραφικό και τοποθετώντας έναν άδειο, γι' αυτό και ο ακριβής προσδιορισμός του μεγέθους ενός σεισμού ίσως έπαιρνε μέρες. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν οι τηλεφωνικές γραμμές, αλλά και δορυφορική σύνδεση του σταθμού απευθείας με το εκάστοτε εργαστήριο. Πλέον, το μόνο που απαιτείται για την αυτόματη παρακολούθηση ενός σταθμού είναι η ύπαρξη σε αυτόν σήματος κινητής τηλεφωνίας. Στο ενδεχόμενο διακοπής του σήματος για κάποιο χρονικό διάστημα υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της πληροφορίας και αποστολής της μόλις αποκατασταθεί η σύνδεση, όπως επίσης και η δυνατότητα για μεταφορά της μέσω USB θύρας σε φορητό αποθηκευτικό μέσο από κάποιον που θα επισκεφθεί το σταθμό.

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως οι σταθμοί που προορίζονται για τοποθέτηση στον πυθμένα της θάλασσας είναι ειδικές περιπτώσεις και πληρούν διαφορετικές, ειδικές προδιαγραφές. Στην [5] υπάρχει ένα τέτοιο παράδειγμα αισθητήρα.

Κάθε οργανισμός – εργαστήριο διαθέτει ένα δίκτυο σεισμολογικών σταθμών το οποίο είναι πυκνότερο στην περιοχή εγγύτερα στην έδρα του, Για παράδειγμα, το Εργαστήριο Σεισμολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Παν/μίου Πατρών, διαθέτει ένα ευρύ δίκτυο σταθμών που καλύπτει την ιδιαίτερα σεισμογενή ζώνη της δυτικής Ελλάδας. Και ενώ ο κάθε οργανισμός συντηρεί ένα περιορισμένο δίκτυο σειсмоγράφων, με το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο να έχει το μεγαλύτερο τέτοιο δίκτυο που γεωγραφικά καλύπτει σχεδόν όλη την επικράτεια, όλα αυτά τα δίκτυα μαζί αποτελούν ένα εθνικό δίκτυο (Σχ. 2.1) τα δεδομένα του οποίου είναι διαθέσιμα σε όλους τους συμμετέχοντες (Ενοποιημένο Ελληνικό Σεισμολογικό Δίκτυο [4]).



**Σχ. 2.1** Ενοποιημένο Ελληνικό Σεισμολογικό Δίκτυο.

▲ : Παν/μιο Πατρών ▲ : ΑΠΘ ▲ : ΕΚΠΑ  
 ▲ : Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

Μετά την εκδήλωση ενός ισχυρού σεισμού ή όταν υπάρχει τοπικά έντονη σεισμική δραστηριότητα, οι ενδιαφερόμενοι φορείς/οργανισμοί συχνά εγκαθιστούν ένα προσωρινό (για ένα – δυο χρόνια) τοπικό δίκτυο για την καλύτερη παρακολούθηση του φαινομένου. Ένα δίκτυο σταθμών μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «αυτί» που ακούει το εσωτερικό της γης. Όσο μεγαλύτερο σε έκταση αυτό το «αυτί» και με όσο πυκνότερο δίκτυο σταθμών, τόσο το

καλύτερο. Καθώς ο ακριβής χρόνος έλευσης των σεισμικών κυμάτων σε κάθε σταθμό είναι κρίσιμης σημασίας, όλοι οι σταθμοί συγχρονίζονται με ακρίβεια της τάξης του ms μέσω του συστήματος GPS, ενώ οι συντεταγμένες και το υψόμετρο κάθε σταθμού είναι επίσης επακριβώς γνωστά με τη βοήθεια του GPS.

## **2.2. Αξιοποίηση σεισμολογικών δεδομένων**

### **2.2.1. Γενικά**

Οι καταγραφές από αξελερόμετρα τοποθετημένα πάνω σε κατασκευές πάσης φύσεως (κτήρια, οχήματα, αεροσκάφη, μηχανήματα κλπ) βοηθούν στη μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών αυτών έναντι σεισμικών δονήσεων, αλλά και έναντι άλλων φαινομένων όπως είναι οι συστολές – διαστολές λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας ή η επίδραση των ανέμων ή των κυμάτων ή άλλων μηχανικών δονήσεων, λόγω π.χ. της λειτουργίας μηχανών ή λόγω αεροδυναμικής ή υδροδυναμικής αντίστασης. Μπορούν επίσης να αντληθούν συμπεράσματα για την εσωτερική δομική κατάσταση της κατασκευής και να εντοπιστούν τυχόν προβλήματα (structure diagnostics). Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, καθώς και σε αμέτρητες άλλες παρεμφερείς, που δε γίνεται να αναφερθούν όλες, τα αισθητήρια που χρησιμοποιούνται έχουν γενικά διαφορετικές προδιαγραφές από εκείνα που προορίζονται για τη σεισμική έρευνα, ενώ το vibration analysis είναι ένα ολόκληρο κεφάλαιο της επιστήμης του μηχανικού με αφθονία σχετικής βιβλιογραφίας.

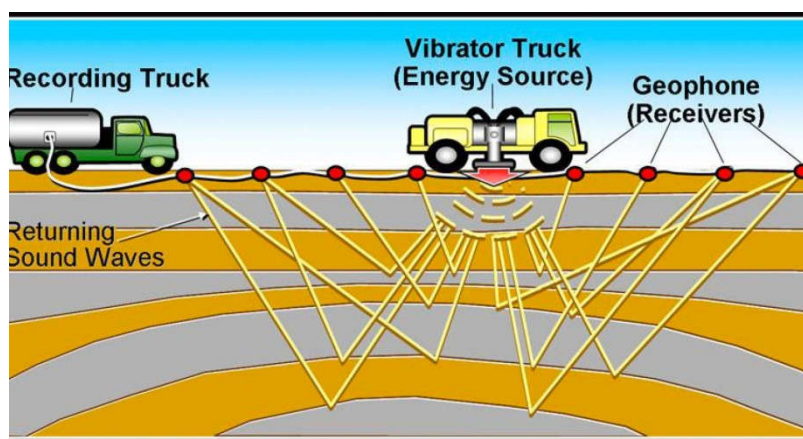
### **2.2.2. Γεωφυσικές έρευνες**

Εκτός από τις προαναφερθείσες εφαρμογές λοιπόν υπάρχουν πολλές άλλες όπου η φύση των δονήσεων επιβάλλει τη χρήση αισθητήρων με προδιαγραφές σεισμικής έρευνας. Το πιο σπουδαίο ίσως παράδειγμα είναι οι γεωφυσικές έρευνες για την αναζήτηση υδρογονανθράκων ή άλλων υπόγειων ή υποθαλάσσιων φυσικών πόρων. Κατά την εξέλιξη τέτοιων ερευνών στην ξηρά προκαλούνται ισχυρές τεχνητές δονήσεις στην επιφάνεια, είτε με εκρηκτικά, είτε με τη χρήση μηχανημάτων vibroseis (seismic vibrators) (Σχ 2.2), [29]. Τα vibroseis είναι φορτηγά οχήματα με κινούμενη μάζα αρκετών τόνων στο κάτω μέρος τους που μπορεί να δονείται πάνω στο έδαφος στη μπάντα μέχρι κάποιες δεκάδες Hz. Για ισχυρότερο αποτέλεσμα πολλά vibroseis μπορούν να συντονιστούν μαζί. Επί του εδάφους απλώνεται ένα δίκτυο γεώφωνων (§2.3.3), αστεροειδούς διάταξης, με κέντρο το σημείο των

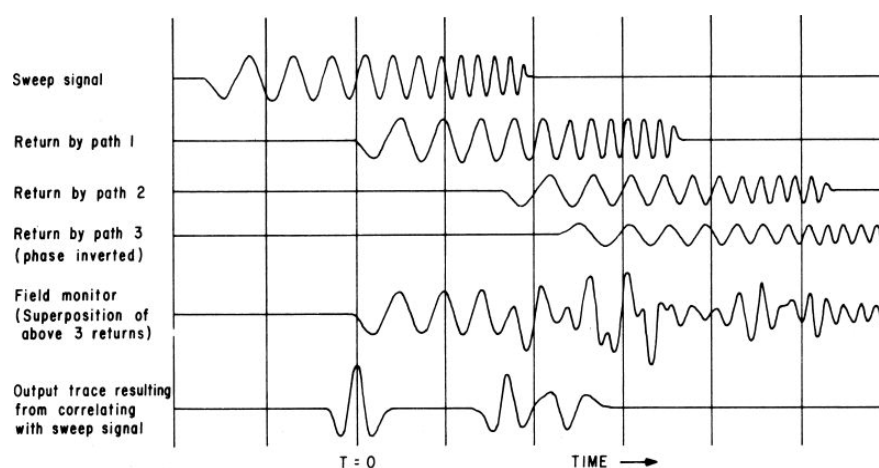
δονήσεων, το οποίο καταγράφει τις δονήσεις. Μετά το επιφανειακά διαδιδόμενο κύμα καταφθάνουν στους αισθητήρες τα κύματα τα προερχόμενα από ανακλάσεις στις διάφορες ασυνέχειες του υπεδάφους, τα οποία είναι κυρίως τύπου P, όπως παραστατικά απεικονίζεται στο Σχ. 2.3. Τα δεδομένα από τα εκατοντάδες γεώφωνα που αποτελούν το δίκτυο – «αυτί» στην επιφάνεια επεξεργάζονται κατάλληλα για να δημιουργηθεί μια εικόνα του τι υπάρχει στο υπέδαφος. Στο Σχ. 2.4 [30] βλέπουμε παράδειγμα καταγραφής από κάποιο γεώφωνο (πέμπτη κυματομορφή) όταν η δόνηση που προκαλούν τα *vibroiseis* είναι αυτή που φαίνεται στην πρώτη κυματομορφή. Το δίκτυο των αισθητήρων μεταφέρεται σε διαδοχικά γειτονικές τοποθεσίες και επαναλαμβάνονται παρόμοιες ενέργειες (πρόκληση δονήσεων, καταγραφές των ανακλάσεων) μέχρι να καλυφθεί ολόκληρη η περιοχή ενδιαφέροντος, η οποία μπορεί να είναι αρκετά  $\text{km}^2$ , σε μια διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει μήνες. Σε αυτή την εφαρμογή ενδιαφέρουν μόνο ο χρόνος έλευσης και η ένταση των κυμάτων σε κάθε αισθητήρα και όχι η διεύθυνση κίνησης γι' αυτό και χρησιμοποιούνται τα χαμηλού κόστους γεώφωνα τα οποία καταγράφουν μόνο τη Z συνιστώσα. Η διεύθυνση διάδοσης του κύματος μπορεί να προκύψει από το σύνολο των δεδομένων. Παράλληλα με τις καταγραφές από τα γεώφωνα, γίνονται καταγραφές και από ένα σταθερό δίκτυο αισθητήρων οι οποίοι βρίσκονται επί προσεγγιστικά ορθοκανονικού πλέγματος επί του χάρτη, το οποίο καλύπτει όλη την περιοχή ενδιαφέροντος, αλλά και την ευρύτερη περιοχή, συνολικά δηλαδή (τυπικά) αρκετές δεκάδες  $\text{km}^2$ . Επειδή αυτοί οι αισθητήρες βρίσκονται μακριά από τα σημεία όπου δημιουργούνται οι δονήσεις, χρησιμοποιούνται πιο ευαίσθητα αξελερόμετρα, όπως αυτό που μελετάται στην παρούσα εργασία ή καρτεσιανά αξελερόμετρα που τοποθετούνται σε οπές εντός του εδάφους.



Σχ. 2.2 Vibroseis



Σχ. 2.3 Παραστατική απεικόνιση του μηχανισμού χαρτογράφησης του υπεδάφους με τη βοήθεια τεχνητών επιφανειακών δονήσεων, π.χ. από vibroseis.

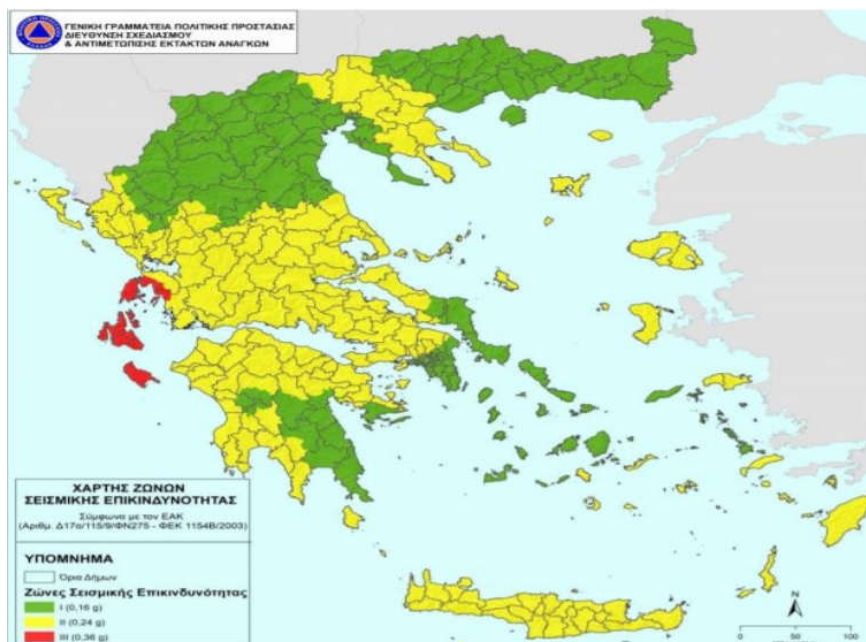


Σχ. 2.4 Κυματομορφή δόνησης του εδάφους από vibroseis (πρώτη καμπύλη) και όπως καταγράφονται οι διάφορες ανακλάσεις από ένα γεώφωνο (πέμπτη καμπύλη).

### 2.2.3. Χαρτογράφηση - χαρακτηρισμός ρηγμάτων και άλλες εφαρμογές

Στις γεωφυσικές έρευνες χρησιμοποιούνται τεχνητές πηγές δονήσεων για τη μελέτη του άμεσου υπεδάφους. Πληροφορίες όμως άλλης φύσεως μπορούμε να αντλήσουμε και από τις φυσικές δονήσεις (σεισμοί). Η πιο σημαντική κατηγορία πληροφορίας σχετίζεται με τη σεισμικότητα μιας περιοχής και την επικινδυνότητα των σεισμών που μπορεί να δώσει η περιοχή. Υπολογίζονται τα μεγέθη, εντοπίζονται οι εστίες των σεισμών, εντοπίζονται και χαρακτηρίζονται ρήγματα, ενώ δημιουργούνται χάρτες και πίνακες επικινδυνότητας που μας δίνουν την πιθανότητα πρόκλησης σεισμού με χρονικό ορίζοντα εξαρτώμενο από το

αναμενόμενο μέγεθος ή από τις αναμενόμενες μέγιστες επιταχύνσεις [31], [32] (Σχ. 2.5, Πίνακας 2.1 , Πίνακας 2.2). Μπορεί η ασθενής σεισμική δραστηριότητα σε μια περιοχή να αποτελέσει προπομπό της εκδήλωσης ενός ισχυρού σεισμού (προσεισμοί) και να δοθεί έτσι η δυνατότητα για μια πρόγνωση βραχέως χρονικού ορίζοντα.



Σχ. 2.5 Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας της ελληνικής επικράτειας με ένταξη των δήμων σε κάθε μία από τις τρεις ζώνες [31]. Με πράσινο εμφανίζεται η λιγότερο επικίνδυνη Ζώνη 1 (Z1), με κίτρινο η Ζώνη 2 (Z2) και με κόκκινο η πλέον επικίνδυνη Ζώνη 3 (Z3).

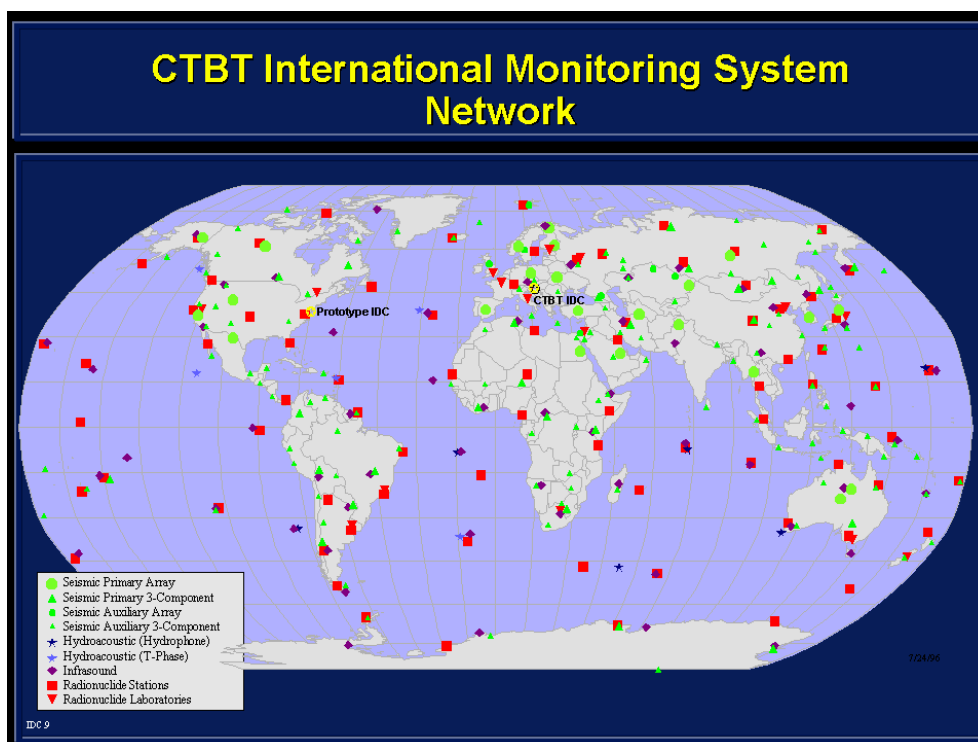
Πίνακας 2.1 Αναμενόμενες οριζόντιες επιταχύνσεις του εδάφους (σε g) ανά ζώνη επικινδυνότητας, με παράμετρο το μέσο χρόνο επαναληψιμότητάς τους σε χρόνια  $T_r$  [32].

$T_r$ (έτη)	Z1	Z2	Z3
1	0.03	0.04	0.06
10	0.05	0.07	0.10
20	0.06	0.09	0.12
50	0.08	0.11	0.16
100	0.09	0.14	0.19
200	0.11	0.17	0.23
500	0.14	0.22	0.29

Πίνακας 2.2 Μέγιστη αναμενόμενη οριζόντια επιτάχυνση του εδάφους ανά ζώνη [32].

Ζώνη	$a_g/g$
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Επίσης σπουδαία είναι η παρακολούθηση ηφαιστειών, με τις σεισμικές δονήσεις να αποτελούν σημαντικό στοιχείο για την πρόβλεψη επικείμενης έκρηξης. Σε μια άλλη εφαρμογή, παρακολουθείται η δραστηριότητα σε περιοχές που υποφέρουν από ευρείας κλίμακας καθιζήσεις, όπως για παράδειγμα κοντά σε ορυχεία λιγνίτη, λόγω της αποστράγγισης του υδροφόρου ορίζοντα στις γύρω περιοχές, οπότε μπορούν να προβλεφθούν καθιζήσεις, κατολισθήσεις ή άλλες καταστροφές. Πιο ειδικές περιπτώσεις χρήσης των σεισμολογικών οργάνων είναι η παρακολούθηση της μεταβολής παγετώνων και παγοκρηπίδων [33], όπως και η επιτήρηση της διεθνούς συμφωνίας για τη μη πραγματοποίηση πυρηνικών δοκιμών (Σχ. 2.6).



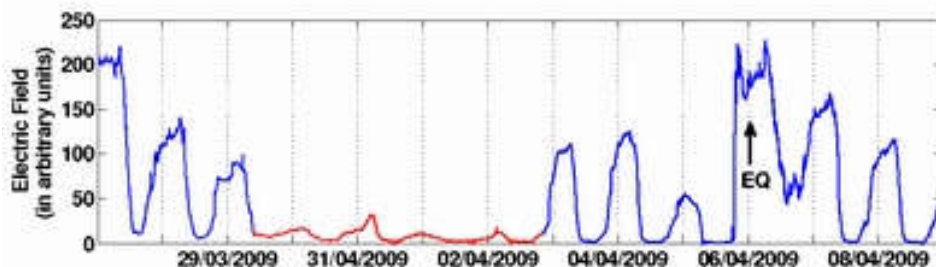
**Σχ. 2.6** Το αρχικό δίκτυο (1999) με 321 δομές για την παρακολούθηση της τήρησης της διεθνούς συμφωνίας μη πραγματοποίησης πυρηνικών δοκιμών, που ετέθη σε ισχύ το 1996, με το κέντρο δεδομένων να βρίσκεται στη Βιέννη [34]. Περιλαμβάνονται σειсмоγράφοι, υδρόφωνα, αισθητήρες υπερήχων και ανιχνευτές ραδιοϊσοτόπων. Ένα βασικό χαρακτηριστικό που διακρίνει τις τεχνητές εκρήξεις (π.χ. πυρηνικές δοκιμές) με σημειακή και στιγμιαία έκλυση της ενέργειας από τους σεισμούς είναι πως οι πρώτες αδυνατούν να δημιουργήσουν ισχυρά επιφανειακά κύματα.



Αξίζει σε αυτό το σημείο να γίνει ένα σχόλιο σχετικά με τον Αντισεισμικό Κανονισμό Κτηρίων. Ας παρατηρήσουμε στο Σχ. 2.5 πως τα δύο μεγαλύτερα αστικά κέντρα, που αμφότερα έχουν χτυπηθεί από καταστροφικούς σεισμούς τις τελευταίες δεκαετίες και συγκεντρώνουν ίσως και το 70% των οικοδομημάτων της χώρας, χαρακτηρίζονται πράσινα, αλλά βρίσκονται σε άμεση εγγύτητα με κίτρινες περιοχές, ένα χαρακτηριστικό που παραπέμπει περισσότερο σε πολιτική απόφαση μείωσης του εθνικού κόστους αντισεισμικής θωράκισης και λιγότερο σε επιστημονική προσέγγιση χαρτογράφησης και προσδιορισμού της καταστροφικής δυναμικής των ενεργών ρηγμάτων. Ας παρατηρήσουμε επίσης πως τα 0.6g (οριζόντια) που μετρήθηκαν κοντά στο επίκεντρο στο σεισμό της Πάρνηθας το 1999 ξεπερνούν κατά πολύ τα οριζόντια 0.36g για τη Z2 (π.χ. Δήμος Αχαρνών - Πάρνηθα) και κατά πολύ περισσότερο τα οριζόντια 0.24g που προβλέπονται για τη Z1 (άλλοι πιο κεντρικοί δήμοι της Αττικής). Είναι αδιανόητο (για παράδειγμα) ο Δήμος Αχαρνών (μέχρι πριν 30 χρόνια εξαιρετικά αραιοκατοικημένος, όχι πια όμως) να είναι στη Z2 και οι εξαιρετικά πυκνοκατοικημένοι δήμοι της Φιλαδέλφειας και των Αγίων Αναργύρων που είναι ακριβώς δίπλα να ανήκουν στη Z1. Μαζί και με την παρατήρηση που έγινε για τον χάρτη του Σχ. 2.5, γίνεται σχεδόν προφανές το μαγείρεμα των αρχών για την αποφυγή του οικονομικού και πολιτικού κόστους της αυξημένης αντισεισμικής θωράκισης επί της αρχής «ας ελπίσουμε πως δε θα συμβεί τίποτα επί των ημερών της δικής μας διακυβέρνησης». Πράγματι, μετά τα 5.9R της Πάρνηθας το 1999 μπορεί η πολιτική ηγεσία να πιστεύει ότι για μερικές δεκαετίες δε θα ξαναδούμε σεισμό τέτοιου μεγέθους, ομοίως επιφανειακό, τόσο κοντά στην Αθήνα, δεδομένου ότι ο προηγούμενος ισχυρός σεισμός τόσο κοντά (στο ίδιο ρήγμα) ήταν το 1705 [47]. Όμως δε χρειάζεται να είναι κανείς επιστήμονας για να καταλάβει πως ο αντισεισμικός κανονισμός πρέπει να εκσυγχρονιστεί και ο χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας να αναθεωρηθεί. Όταν γράφονταν αυτές οι γραμμές (Σεπτ. 2021) είχαμε το μεγάλο σεισμό στο Αρκαλοχώρι της Κρήτης με ένα θύμα (5.8R, εστιακό βάθος μόλις 10km). Είναι χαρακτηριστικές οι δηλώσεις του διευθυντή ερευνών του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου Γεράσιμου Χουλιάρη δυο μέρες μετά το σεισμό: «Από τον κύριο σεισμό είχαμε διπλάσιες επιταχύνσεις (σ.σ.: από τις μέγιστες αναμενόμενες για την περιοχή). Αυτό σημαίνει ότι χρειαζόμαστε καινούργιο αντισεισμικό κανονισμό. Πρέπει να χτίζουμε πιο σωστά γιατί οι επιταχύνσεις που καταγράφονται είναι διπλάσιες από το σχεδιασμό του μηχανικού... Οι πόλεις έχουν πάρει έκταση και έχουν πάει πιο κοντά σε ρήγματα». Ενώ για το γεγονός ότι το Αρκαλοχώρι στην κυριολεξία κάθεται ακριβώς πάνω από την εστία του σεισμού και για το περίπου 1g κατακόρυφης επιτάχυνσης που καταγράφηκε δήλωσε: «Η εδαφική κίνηση που παρήγαγε ο κύριος σεισμός ήταν κάθετη, δηλαδή σήκωσε τα σπίτια και τα κατέβασε. Αυτό

δημιούργησε σοβαρότατα προβλήματα στα θεμέλια των σπιτιών και είναι μια αιτία της καταστροφής που βλέπουμε αυτή την στιγμή».

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι πως η παρακολούθηση των δονήσεων του εδάφους σε διάφορες περιπτώσεις συνεπικουρείται και από άλλες τεχνολογίες που εξυπηρετούν τον ίδιο ή κάποιον παράλληλο σκοπό. Για παράδειγμα, οι πυρηνικές δοκιμές, μετά την καταγραφή τους από τους σειсмоγράφους, πιστοποιούνται από την ύπαρξη ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα. Αντίστοιχα, ενώ ένα σμήνος σεισμών μπορεί να έχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ώστε να θεωρηθεί προσεισμική ακολουθία ενός μεγαλύτερου συμβάντος, η προσπάθεια πρόβλεψης μεγάλων σεισμών με χρονικό ορίζοντα πλέον των ολίγων ωρών ή ημερών στηρίζεται στη μέτρηση διάφορων άλλων παραμέτρων [35]. Πιο σημαντικά φαίνεται να είναι τα VHF (MHz) και ULF (0.1 – 1Hz) ηλεκτρικά σήματα από το φλοιό της γης μέρες έως ώρες πριν από ένα μεγάλο επιφανειακό σεισμό, για τα οποία έχουν προταθεί διάφοροι πιθανοί μηχανισμοί γένεσης, με την αλήθεια μάλλον να βρίσκεται σε ένα συνδυασμό όλων αυτών και τα οποία μετρούνται με επίγειες ή δορυφορικές μεθόδους, καθώς και οι διαταραχές στη δομή της ιονόσφαιρας που φαίνεται να οφείλονται στην εκπομπή των παραπάνω σημάτων και μπορούν να μετρηθούν είτε με μεθόδους επίγειας ραδιοπαρακολούθησης είτε επίσης με δορυφόρους (Σχ. 2.7).



**Σχ. 2.7** Η καταγραφή ULF της διατήρησης του στρώματος D της ιονόσφαιρας, που κατά τη διάρκεια της ημέρας απορροφά την Η/Μ ακτινοβολία (αποκλείοντας την λόγω διάθλασης στο E στρώμα εκπομπή μεγάλης εμβέλειας στα μεσαία), τις μέρες πριν το σεισμό της πόλης L'Aquila της Ιταλίας στις 6/4/2009. Η ανωμαλία δείχνεται με κόκκινο (το στρώμα D για ένα διάστημα τριών ημερών ουσιαστικά εξαφανίζεται). Η χωρική κατανομή της καταγραφής τοποθετούσε τον επικείμενο σεισμό στο κεντρικό τμήμα της χώρας, χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα καλύτερου εντοπισμού. Τυπικά, με τις τρέχουσες μεθόδους, καθορίζεται ένα τετράγωνο 500km×500km για το πιθανό επίκεντρο. Ο μηχανισμός γέννησης της VHF ακτινοβολίας παρουσιάζει αρνητική ανάδραση και διαδοχικές αυξομειώσεις κατά την περίοδο εμφάνισής της, ενώ για τη ULF, που ακολουθεί αμέσως μετά, παρουσιάζεται θετική ανάδραση και η ακτινοβολία αυξάνεται ραγδαία. Κατόπιν έχουμε απότομη διακοπή όλων αυτών και ένα διάστημα κάποιων ωρών ή λίγων ημερών ηλεκτρομαγνητικής σιγής πριν την εκδήλωση του σεισμού.

Άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν τη μεταβολή της κατακόρυφης ταχύτητας των P κυμάτων καθώς οι μηχανικές τάσεις στο φλοιό αυξάνονται (απαιτείται λοιπόν δίκτυο σειсмоγράφων που να παρακολουθεί την καθημερινή μικροσεισμική δραστηριότητα), η δορυφορική παρακολούθηση των παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας (π.χ. ESA Copernicus [36]), η ανίχνευση ραδονίου στον αέρα και στα υπόγεια ύδατα, καθώς και η δορυφορική μέτρηση της μεταβολής της εκπεμπόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης που οφείλεται στη ροή ρεύματος από τα βάθη της γης προς την επιφάνεια με ταχύτητα περίπου 200m/s (είναι η ίδια ροή ρεύματος που προκαλεί την εκπομπή της ULF ακτινοβολίας που αναφέρθηκε παραπάνω και έμμεσα, μετά από κάποιες κβαντο-χημικές διεργασίες και την εκπομπή ραδονίου).

Οι λεπτομέρειες σχετικά με την επεξεργασία και την αξιοποίηση των σεισμολογικών δεδομένων για την εξαγωγή διαφόρων συμπερασμάτων δεν είναι αντικείμενο του παρόντος συγγράμματος και γενικά περιλαμβάνουν τη χρήση ειδικών αλγορίθμων και μεθόδων, που φυσικά εφαρμόζονται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.

## **2.3. Σεισμόμετρα και επιταχυνσιόμετρα**

### **2.3.1. Γενικά**

Στην §1.2.3.4 έγινε αναφορά στις μέγιστες παρατηρούμενες τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης σε σεισμούς, ενώ δεν έγινε καμία αναφορά σε «ελάχιστες» τιμές. Το ενδιαφέρον πάνω σε αυτό το θέμα είναι πως τις κινήσεις του εδάφους τις χωρίζουμε σε δύο πολύ γενικές κατηγορίες, χωρίς σαφή διαχωρισμό μεταξύ τους: την ισχυρή κίνηση (strong motion) και την ασθενή κίνηση (weak motion). Το κριτήριο είναι διαισθητικά κατανοητό, αλλά η ένταξη στη μία ή στην άλλη κατηγορία δεν είναι αυτονόητη. Τελικά, αυτό που γίνεται στην πράξη είναι να ονομάζουμε ασθενή ή ισχυρή μια κίνηση ανάλογα με το είδος των οργάνων που είναι πιο κατάλληλο ή αποκλειστικά κατάλληλο για την καταγραφή της. Οι επιλογές μας είναι δύο: τα αξελερόμετρα ή επιταχυνσιόμετρα και τα σεισμόμετρα.

### **2.3.2. Επιταχυνσιόμετρα**

Όπως λέει και το όνομά τους, μετρούν την επιτάχυνση του εδάφους. Φυσικά, αξελερόμετρα υπάρχουν με διάφορες προδιαγραφές για πληθώρα εφαρμογών. Τα όργανα που είναι κατάλληλα για τη μέτρηση κρουστικών κινήσεων και μηχανικών δονήσεων

προδιαγράφονται με εύρος ζώνης καλής λειτουργίας αρκετές δεκάδες ή και εκατοντάδες  $g$ . Η ευαισθησία όμως τέτοιων οργάνων είναι μικρή (για τα σεισμολογικά δεδομένα) και δεν είναι κατάλληλα για την καταγραφή σεισμών με συνήθεις επιταχύνσεις, όπως είδαμε, κλάσματος του  $g$  ή ολίγων  $g$ .

Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι, τα πλέον χρησιμοποιούμενα στηρίζονται στην αρχή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου [37], [38]. Οι προς μέτρηση δονήσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων σε έναν πιεζοκρύσταλλο (π.χ. χαλαζία). Το άμεσα μετρούμενο μέγεθος είναι είτε τάση είτε ηλεκτρικό φορτίο. Το σήμα που προκύπτει, ενισχύεται μέσω κάποιας ηλεκτρονικής διάταξης και η έξοδος εμφανίζεται σε μονάδες επιτάχυνσης. Τα αξελερόμετρα αυτά έχουν μικρό μέγεθος (Σχ. 2.8) και μικρό κόστος, πάντα σε σύγκριση με αυτά που θα δούμε για σεισμολογικές εφαρμογές.

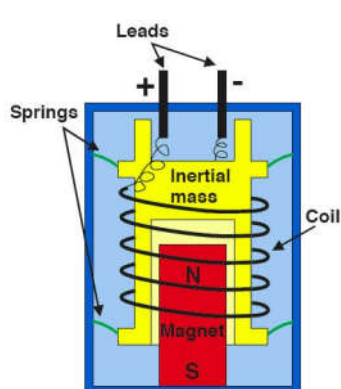


**Σχ. 2.8** Πιεζοηλεκτρικά αξελερόμετρα [37].

Τα αξελερόμετρα για την καταγραφή σεισμών, όπως και τα σεισμόμετρα που θα αναφέρουμε παρακάτω, ανήκουν στην κατηγορία των αισθητήρων αδρανειακής μάζας (inertial mass sensors). Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην ύπαρξη μιας μάζας (σεισμική μάζα – seismic mass) η οποία στηρίζεται στο υπόλοιπο πλαίσιο της συσκευής μέσω ελατηρίων. Κάποια λίγα γραμμάρια γι' αυτή τη μάζα συνήθως είναι αρκετά. Το πλαίσιο είναι πακτωμένο στο έδαφος και οι κινήσεις του εδάφους οδηγούν τη μάζα εκτός της θέσης ισορροπίας της ( $\Theta I$ ). Μετρώντας τη μετατόπιση της μάζας από τη  $\Theta I$  και μέσω κάποιων μετατροπών προκύπτει η επιτάχυνση. Για τη μέτρηση της μετατόπισης χρησιμοποιείται διαφορικός μετασχηματιστής (Linear Variable Differential Transformer – LVDT), ενώ για μεγαλύτερη ευαισθησία στη μέτρηση της μετατόπισης χρησιμοποιείται χωρητικός μετατροπέας (Differential Capacitive Displacement Transducer).

### 2.3.3. Γεώφωνα

Τα γεώφωνα είναι αξελερόμετρα με ένα μόνο LVDT για την καταγραφή της  $Z$  συνιστώσας της επιτάχυνσης (συνήθως). Είναι πολύ απλές κατασκευές με το LVDT να βρίσκεται μέσα σε μια μικρή θήκη, η οποία στο κάτω μέρος της έχει μια μεταλλική βελόνη για να καρφώνεται στο έδαφος (Σχ. 2.9) περίπου κατακόρυφα. Είναι μικρό, ελαφρύ και δίνει τη δυνατότητα ώστε πολλά γεώφωνα να τοποθετούνται επί του ίδιου καλωδίου (Σχ. 2.10) ώστε να δημιουργηθεί ένα δίκτυο καταγραφής κατάλληλο π.χ. για γεωφυσικές έρευνες (Σχ. 2.3). Είναι τόσο ευρεία η χρήση του που έχει πλέον επικρατήσει με τον όρο γεώφωνο να εννοούμε το εντός αυτού LVDT. Μπορεί π.χ. να πούμε πως ένα καρτεσιανό αξελερόμετρο περιέχει τρία γεώφωνα σε ορθογώνια διάταξη. Καθώς στις εφαρμογές που συνήθως χρησιμοποιούνται οι δονήσεις είναι γενικά ασθενείς, το ηλεκτρονικό τους μέρος είναι τέτοιο ώστε τελικά να λαμβάνουμε την ταχύτητα ως έξοδο, όπως στα σεισμόμετρα.



(α)



(β)



(γ)

Σχ. 2.9 (α) Αρχή λειτουργίας ενός γεώφωνου (β) Γεώφωνο έτοιμο προς χρήση (γ) Ο αισθητήρας βρίσκεται ερμητικά κλεισμένος εντός μεταλλικού κελύφους, από το οποίο προβάλλουν μόνο δύο ακροδέκτες.



Σχ. 2.10 Στοκ από σειρές γεωφώνων στη Σαουδική Αραβία (Al Khobar, 2021). Κατά τη γεωφυσική έρευνα σε δύσβατο ορεινό ανάγλυφο τα καλώδια με τα γεώφωνα μεταφέρονται με ελικόπτερο.

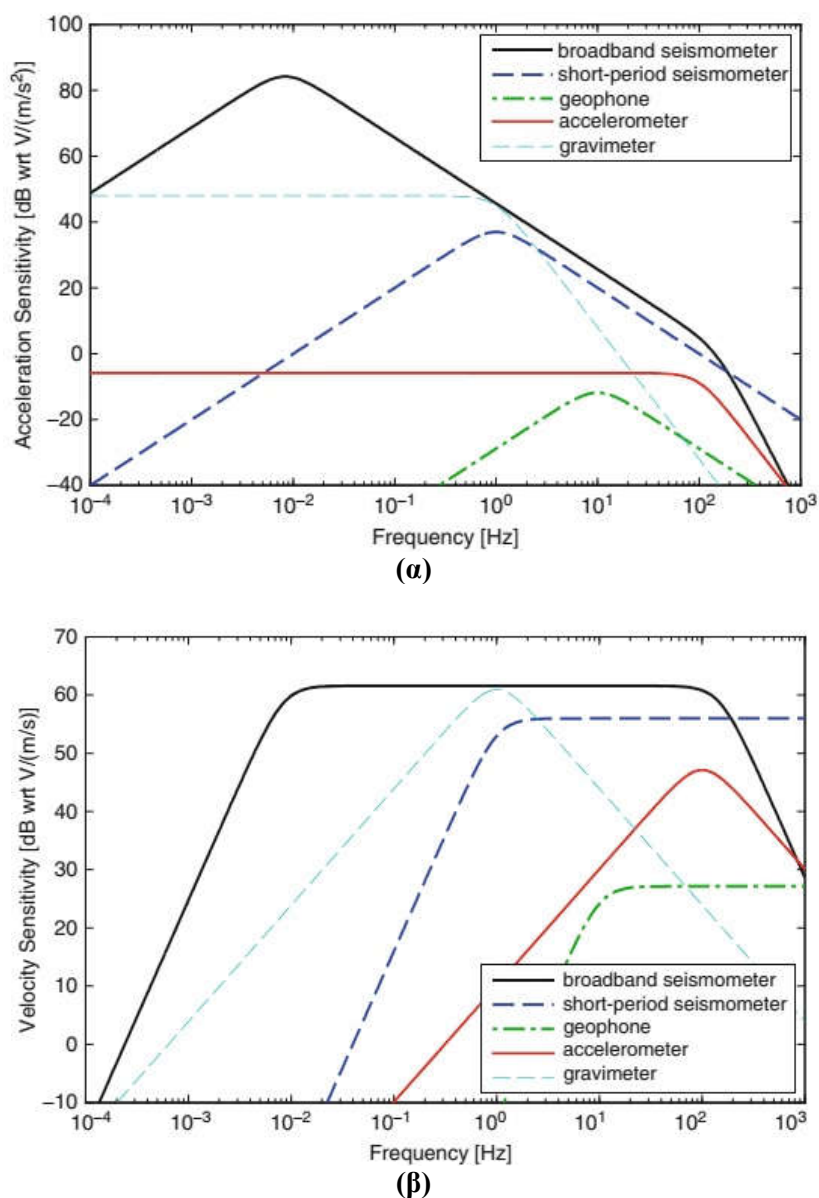
### **2.3.4. Σεισμόμετρα**

Τα σεισμόμετρα έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας με τα αντίστοιχα αξελερόμετρα (αδρανειακά), αλλά χρησιμοποιούν μεγαλύτερες σεισμικές μάζες (αρκετές δεκάδες ή λίγες εκατοντάδες gr) και διαφορετικό ηλεκτρονικό κύκλωμα. Η μεγαλύτερη μάζα αυξάνει την ευαισθησία τους και τα κάνει καταλληλότερα για την καταγραφή πολύ ασθενών μετακινήσεων του εδάφους. Μια άλλη μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα σεισμόμετρα και τα αξελερόμετρα, εκτός από τα μεγέθη των μαζών και τα ηλεκτρονικά τους, είναι η μορφή της εξόδου και το clip level. Τα σεισμόμετρα δίνουν ως έξοδο την ταχύτητα του εδάφους, ενώ λόγω της μεγαλύτερης τιμής της σεισμικής μάζας αλλά και της μικρότερης σταθεράς ελατηρίου που χρησιμοποιείται, η διαθέσιμη διαδρομή της μάζας για μετακίνηση από τη ΘΙ εξαντλείται σε strong motion συμβάντα. Στην πραγματικότητα βέβαια, όπως θα δούμε (§3.2.2.5), τόσο στα σεισμόμετρα όσο και στα αξελερόμετρα, πολύ πριν η μάζα τερματίσει στη διαθέσιμη διαδρομή της (διάκενο), η ηλεκτρική έξοδος έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της και λέμε πως το όργανο «κλίπαρε».

### **2.3.5. Τελικά τι ακριβώς χρειαζόμαστε;**

Συγκρίνοντας λοιπόν ανάμεσα στα αδρανειακά σεισμόμετρα και αξελερόμετρα διαπιστώνουμε πως στα σεισμόμετρα προτεραιότητα δίνεται στην καλή λειτουργία τους για δονήσεις που χαρακτηρίζονται από πολύ μικρές μετατοπίσεις (nm), πολύ μικρές ταχύτητες και πολύ μικρές συχνότητες (περίοδοι κάποιων δεκάδων s έως 120-150s). Για το λόγο αυτό κλιπάρουν σε αρκετά χαμηλές τιμές ταχύτητας/επιτάχυνσης, ενώ και το φάσμα καλής λειτουργίας τους σταματάει συνήθως στις λίγες δεκάδες Hz (50 – 100Hz). Τα αξελερόμετρα από την άλλη, παρότι έχουν απόκριση σταθερού πλάτους θεωρητικά από μηδέν συχνότητα, δεν χρησιμοποιούνται για τις πολύ χαμηλές συχνότητες, καθώς ο εσωτερικός τους θόρυβος είναι συγκρίσιμος με τα πλάτη των σημάτων που προσπαθούμε να ανιχνεύσουμε σε αυτές τις συχνότητες, ενώ το φάσμα καλής λειτουργίας τους μπορεί να εκτείνεται έως κάποιες εκατοντάδες Hz (200 – 300Hz) και το clip level τους να φτάνει τα αρκετά g (4-5g).

Έτσι λοιπόν, τελικά, η πλήρης καταγραφή ενός σεισμού απαιτεί την ύπαρξη και των δύο οργάνων. Οι ασθενείς δονήσεις στην αρχή και στο τέλος του συμβάντος θα καταγραφούν ικανοποιητικά από το σεισμόμετρο, ενώ στο χρονικό διάστημα που το σεισμόμετρο θα κλιπάρει, η καταγραφή θα συνεχιστεί από το αξελερόμετρο. Πολύ ασθενείς δονήσεις από ασθενείς ή απομακρυσμένους σεισμούς θα καταγραφούν επιτυχώς αποκλειστικά από το σεισμόμετρο. Στο Σχ. 2.11 βλέπουμε ενδεικτικά διαγράμματα απόκρισης πλάτους των βασικών τύπων σεισμολογικών οργάνων.

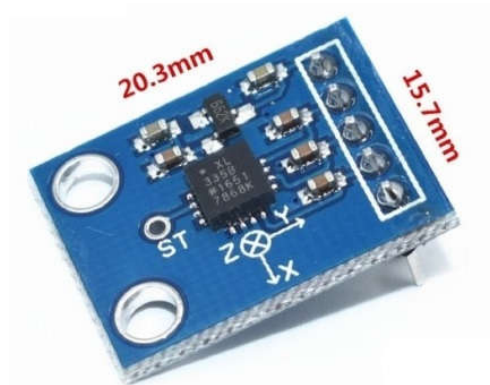


Σχ. 2.11 (α) Απόκριση επιτάχυνσης και (β) απόκριση ταχύτητας για τα συνήθη σεισμολογικά όργανα. Οι συχνότητες αποκοπής είναι μόνον ενδεικτικές, καθώς τα διαγράμματα αυτά περιγράφουν συγκεκριμένα εμπορικά προϊόντα [21].

### 2.3.6. Micro-electromechanical sensors (MEMS).

Μια ακόμα κατηγορία, που ολοένα κερδίζει έδαφος στην αγορά λόγω ευχρηστίας και κόστους, είναι τα αξελερόμετρα MEM (micro-electromechanical). Είναι αδρανειακά αισθητήρια τα οποία όμως έχουν πολύ μικρές διαστάσεις και μαζί και με το ηλεκτρονικό τους μέρος (ενίσχυση σήματος, φίλτρα, ψηφιοποίηση) προσφέρονται ως ολοκληρωμένα κυκλώματα (Σχ. 2.12). Σε αυτά το ρόλο των ελατηρίων για τη συγκράτηση της σεισμικής

μάζας στη ΘΙ αναλαμβάνουν μικροσκοπικές ίνες πυριτίου [7]. Η μέτρηση της μετατόπισης γίνεται μέσω της μεταβολής κάποιας χωρητικότητας καθώς η μάζα κινείται. Και εδώ το μετρούμενο μέγεθος, που εν συνεχεία μετατρέπεται σε μονάδες μετατόπισης, είναι τάση ή ηλεκτρικό φορτίο.

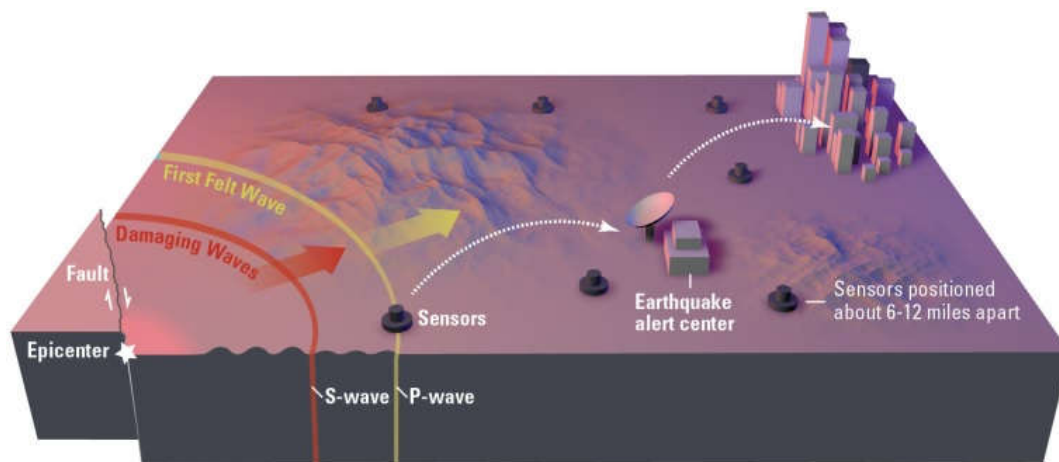


Σχ. 2.12 Μικροηλεκτρομηχανικό αξελερόμετρο, GY-61 DXL335, 3-Axis,  $\pm 3g$ .

Τα MEMS, παρότι βελτιώνονται διαρκώς, μέχρι στιγμής έχουν αρκετά χαμηλότερες επιδόσεις όσον αφορά στην ευαισθησία τους και στον εσωτερικό τους θόρυβο και δε χρησιμοποιούνται στη λεπτομερή καταγραφή σεισμών. Όμως το μικρό τους μέγεθος και το μικρό τους κόστος τα καθιστά ελκυστικά σε εφαρμογές όπου τα παραπάνω μειονεκτήματα δεν είναι κρίσιμης σημασίας, ενώ αντιθέτως είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μεγάλου αριθμού αισθητήρων. Μια τέτοια εφαρμογή είναι τα υπό ανάπτυξη συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης σεισμών [9], (Σχ. 2.13). Σε αυτά δημιουργείται ένα ευρύ δίκτυο αισθητήρων τοποθετημένων συνήθως σε δημόσια κτήρια, σχολεία κλπ., οι οποίοι είναι διασυνδεδεμένοι σε κατάλληλο δίκτυο επικοινωνιών (IoT). Καταγράφονται τα πρώιμα P κύματα από το δίκτυο αισθητήρων και αναλόγως την εξέλιξη του φαινομένου, μέσα από ειδικούς αλγόριθμους, αποφασίζεται αυτομάτως η έκδοση ειδοποίησης σεισμού προς όλους του εγκατεστημένους δέκτες ή προς τα κινητά τηλέφωνα των χρηστών των εγγεγραμμένων στην εφαρμογή που βρίσκονται στην περιοχή κινδύνου. Με ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να υπάρξει προειδοποίηση σεισμού με χρονική προήγηση από λίγα δευτερόλεπτα (αρκετή για να προστατευθεί κάποιος σε ένα ειδικό δωμάτιο) ως και ένα λεπτό (αρκετή για να εκκενωθεί ένα διώροφο κτήριο). Το επίπεδο της σεισμικής κίνησης πάνω από το οποίο εκδίδεται ειδοποίηση ρυθμίζεται από τους διαχειριστές του συστήματος. Όσο όμως αυτό το επίπεδο κατεβαίνει αυξάνεται δραματικά η πιθανότητα εσφαλμένης ειδοποίησης (false alarm) από τους υπάρχοντες αυτή τη στιγμή αλγόριθμους αξιολόγησης των εισερχόμενων δεδομένων και



έτσι, τελικά, οι πολύ ασθενείς δονήσεις είναι εκτός ενδιαφέροντος, γι' αυτό και τα MEM αξελερόμετρα καθίστανται ιδανική λύση.



**Σχ. 2.13** Σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης σεισμού. Οι αισθητήρες που απαρτίζουν το δίκτυο απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις περίπου 10 ως 15 km [9]. Γίνεται σαφές πως για να δημιουργηθεί ένα τέτοιο δίκτυο, που θα προστατεύει π.χ. ένα μεγάλο αστικό κέντρο, απαιτούνται εκατοντάδες εγκατεστημένοι αισθητήρες.

## 2.4. Θόρυβος και άλλα χαρακτηριστικά των σεισμολογικών οργάνων

### 2.4.1. Γενικά για το θόρυβο στα σεισμολογικά όργανα

Αναφέρθηκε ήδη πως για τη σωστή καταγραφή ενός σεισμού, ιδίως αν αυτός είναι ασθενής, απαιτείται ώστε η τοποθεσία στην οποία βρίσκεται εγκατεστημένος ο σταθμός να είναι κατά το δυνατόν απαλλαγμένη από ανθρωπογενείς θορύβους. Είδαμε επίσης πως, ακόμα κι αν καταφέρουμε να βρούμε μια τέτοια τοποθεσία, θα πρέπει επιπλέον να έχουμε φροντίσει ώστε οι ατμοσφαιρικές μεταβολές θερμοκρασίας και πίεσης να μην επηρεάζουν τη λειτουργία του οργάνου. Τέλος, είδαμε πως ακόμα και αν επιτύχουμε όλα τα παραπάνω, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τον απανταχού παρόντα θόρυβο γης προκειμένου να φιλτράρουμε από αυτόν την πληροφορία ενδιαφέροντος. Γεννιέται λοιπόν το ερώτημα: Αν καταφέρουμε την τέλεια θερμική μόνωση και στεγανότητα ενός σταθμού, σε ένα απόλυτα ήσυχο μέρος, και έχουμε τη δυνατότητα να φιλτράρουμε με επιτυχία το θόρυβο της γης, θα μπορούμε να καταγράψουμε οσοδήποτε ασθενή συμβάντα που να υπερβαίνουν το θόρυβο γης; Η απάντηση είναι όχι και αυτό διότι υπάρχουν δύο πηγές θορύβου, οι οποίες δε γίνεται να απαλειφθούν και οι οποίες θέτουν ένα ταβάνι στη διακριτική ικανότητα ενός σεισμολογικού οργάνου. Η μία είναι η κίνηση Brown των μορίων του αέρα που περιβάλλουν

το αισθητήριο που μετρά τη μετατόπιση και η άλλη είναι ο ηλεκτρονικός θόρυβος στο ηλεκτρονικό κύκλωμα του οργάνου.

### 2.4.2. Θόρυβος Brown

Τα μόρια ενός ρευστού και δη του αέρα, κινούνται λόγω της θερμικής τους ενέργειας. Η κίνηση αυτή έχει μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο όσο η θερμοκρασία μειώνεται. Η κρούση των μορίων του αέρα με τη σεισμική μάζα στα σεισμολογικά αδρανειακά όργανα έχει ως αποτέλεσμα την κίνησή της και η κίνηση αυτή καταγράφεται ως ανεπιθύμητος θόρυβος. Ο θόρυβος αυτός θα είναι τόσο πιο σημαντικός όσο ο λόγος της σεισμικής μάζας προς την επιφάνεια που βαίνει προς τη διεύθυνση κίνησής της μικραίνει, αλλά και όσο η σταθερά του ελατηρίου είναι μικρότερη, αν κάθε φορά οι άλλες παράμετροι είναι σταθερές. Αποδεικνύεται [39] πως η ισοδύναμη επιτάχυνση  $(\ddot{x}_i)_{ne}$  (noise equivalent acceleration) που προκύπτει από την κίνηση Brown του αέρα είναι

$$(\ddot{x}_i)_{ne}^2 = \frac{4Bk_B T \Delta f}{M^2} = \frac{4k_B T}{M} \frac{\omega_0}{Q} \quad (2.1)$$

όπου  $M$  είναι η σεισμική μάζα,  $k_B=1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K είναι η σταθερά Boltzman,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία [K] και  $B$  η ιζώδης τριβή [N/(m/s)]. Με  $Q$  συμβολίζεται ο παράγοντας ποιότητας (quality factor) του συστήματος μάζας-ελατηρίου ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση

$$Q = 1 / 2\zeta \quad (2.2)$$

με το  $\zeta$  να είναι ο συντελεστής φυσικής απόσβεσης για το σύστημα μάζας-ελατηρίου, ενώ  $\omega_0$  είναι η φυσική συχνότητα του συστήματος. Σε ένα παράδειγμα υπολογισμού, στην [58] οι τιμές που ισχύουν για το αξελερόμετρο που παρουσιάζεται εκεί είναι  $\omega_0=367$ rad/sec,  $M=8.4$ gr και  $Q=83$  και  $B=0.037$ N/(m/s). Έτσι, το επίπεδο του θορύβου λόγω κίνησης Brown στους 298K (25°C) είναι

$$(\ddot{x}_i)_{ne}^2 = 8.66 \cdot 10^{-18} (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz} \quad \text{ή} \quad (\ddot{x}_i)_{ne} = 2.94 \cdot 10^{-9} (\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{0.5} \quad (2.3)$$

ή αλλιώς -170dB αν εκφραστεί ως προς την τιμή αναφοράς  $1(\text{m/s}^2)/\text{Hz}^{0.5}$  (σε μονάδες  $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$  είναι -340dB). Θεωρητικά θα μπορούσαμε να απαλείψουμε την κίνηση Brown αν

ο αισθητήρας της μετατόπισης εγκαθίστατο εντός θαλάμου κενού, μια τέτοια λύση όμως είναι πρακτικά ανεφάρμοστη για τα μεγάλα όργανα, ενώ βρίσκει μερική εφαρμογή στα MEM αξελερόμετρα, όπου η μικροσκοπική σεισμική μάζα τους βρίσκεται σε χώρο εντός του chip στον οποίο ο αέρας έχει αντικατασταθεί από άζωτο πολύ χαμηλής πίεσης.

### 2.4.3. Ηλεκτρονικός θόρυβος

Ο ηλεκτρονικός θόρυβος είναι ένα θέμα γνωστό στο χώρο των μηχανικών και απασχολεί τους σχεδιαστές ηλεκτρονικών κυκλωμάτων τόσο περισσότερο όσο τα σήματα που διακινούνται είναι ασθενέστερα ή όσο οι προδιαγραφές πιστότητας σήματος είναι πιο αυστηρές. Οφείλεται σε διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με τη λειτουργία των ημιαγωγών αλλά και των άλλων στοιχείων ενός κυκλώματος και γενικά αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Τα διάφορα ολοκληρωμένα κυκλώματα και οι τελεστικοί ενισχυτές ειδικότερα (TE), κατατάσσονται σε κατηγορίες ποιότητας ανάλογα με το θόρυβο που παράγουν και συνήθως το κόστος τους ανεβαίνει όσο η ποιότητά τους βελτιώνεται. Οι αντιστάτες και τα πηνία επίσης αποτελούν σημαντική πηγή θορύβου (Johnson thermal white noise) λόγω ωμικής αντίστασης και όσο μεγαλύτερη η αντίσταση  $R$  [ $\Omega$ ] τόσο μεγαλύτερος και ο θόρυβος. Πιο συγκεκριμένα η φασματική κατανομή του θορύβου Johnson περιγράφεται από τη σχέση

$$V_{JN,rms}^2 = 4k_B T R \cdot \Delta f \quad (2.4)$$

είναι δηλαδή λευκός θόρυβος.

Εκτός από τον αυτοφυή/εσωτερικό θόρυβο που πηγάζει από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και τις αντιστάσεις υπάρχει και ο θόρυβος που προκύπτει από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από το περιβάλλον και από κυκλώματα σε εγγύτητα με το κύκλωμα ενδιαφέροντος, όπως επίσης και ο θόρυβος που φτάνει από τις πηγές τροφοδοσίας, σε ένα π.χ. τυπωμένο κύκλωμα, ο οποίος οφείλεται στην κακή σχεδίαση των τροφοδοτικών και των γραμμών τροφοδοσίας σε συνδυασμό με την υψηλή διακύμανση που ενδεχομένως παρουσιάζουν τα ρεύματα που τραβάν οι διάφορες συσκευές οι συνδεδεμένες στην κοινή τροφοδοσία.

Όλους τους παραπάνω θορύβους προσπαθούμε να τους περιορίσουμε κατά το δυνατόν με διάφορες τεχνικές χωρίς όμως ποτέ να μπορούμε να τους μηδενίσουμε. Μερικοί γενικοί κανόνες είναι οι ακόλουθοι:

- Σχεδιάζουμε σωστά τις τροφοδοσίες, με σωστές τιμές πυκνωτών εκεί που πρέπει, τόσο στο αρχικό σημείο τροφοδοσίας μετά το σταθεροποιητικό τάσης, όσο και κοντά σε ολοκληρωμένα (bypass capacitors), ιδίως αν αυτά επιτελούν διακοπτική λειτουργία (π.χ. ενισχυτές παλμών για διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία). Μικρής τιμής (συνήθως ολίγα nF ως 1μF) MKT πυκνωτές απαλείφουν τις υψίσυχνες διακυμάνσεις, ενώ μεγαλύτερης τιμής (αρκετά μF ή κάποια mF) MKP ή ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές απαλείφουν διακυμάνσεις μεγαλύτερου πλάτους και μικρότερης συχνότητας.
- Διαχωρίζουμε πλήρως σήματα, τροφοδοσίες και γη (GR) χρησιμοποιώντας multi-plane PCB και όχι παραδοσιακά (through-hole) μονής ή διπλής όψης. Επειδή το κόστος αυξάνεται κατακόρυφα με το πλήθος των επιπέδων, στις περισσότερες των περιπτώσεων μια επιλογή PCB με τέσσερα planes αποτελεί ένα καλό trade off.
- Τοποθετούμε το ground plane (GR) του PCB ανάμεσα στα planes των τροφοδοσιών και των γραμμών σήματος. Το ground plane καλό είναι να καλύπτεται παντού από αγωγό, οπουδήποτε δεν υπάρχουν άλλες οδεύσεις ή νία.
- Φροντίζουμε ώστε η επαφή με το GR να γίνεται άμεσα και όχι μέσω κάποιας επιμήκου διαδρομής και η επαφή/κόλληση να είναι άριστη παρουσιάζοντας ελάχιστη αντίσταση.
- Φροντίζουμε ώστε οι δρόμοι σήματος, ιδιαίτερα αν είναι σήματα ρεύματος, να μη σχηματίζουν βρόχους και αν είναι εφικτό η επιστροφή του ρεύματος να γίνεται επί διαδρομής πλησίον και παράλληλα με εκείνη της αρχικής όδευσης (αν δε γίνεται μέσω του GR), ώστε να μη δημιουργείται βρόχος δημιουργίας μαγνητικού πεδίου.
- Αποφεύγουμε να σχεδιάζουμε οξείες γωνίες στους δρόμους σημάτων/τροφοδοσιών. Η επιλογή αυτή ελαχιστοποιεί επίσης την πιθανότητα διάσπασης της μόνωσης και βραχυκυκλώματος στην περίπτωση που οι διαφορές τάσεων είναι μεγαλύτερες από τις συνήθεις λίγες δεκάδες Volt.
- Τοποθετούμε μεταλλικά προστατευτικά κελύφη (shielding ή screening) σε στοιχεία που είναι πιθανόν είτε να εκπέμπουν EMI είτε να δρουν ως κεραίες λήψης, π.χ. πηνία και μετασχηματιστές, ιδίως αν έχουν διάκενο στον πυρήνα τους (η ύπαρξη διακένου στα μαγνητικά στοιχεία αυξάνει δραματικά την εκπομπή από αυτά Η/Μ παρεμβολών).

- Βάζουμε δακτυλίους φερριτή σε τυχόν σύρματα εκτός πλακέτας που καταλήγουν σε μονάδες με χαμηλή αντίσταση εισόδου (και άρα φέρουν μη αμελητέο ρεύμα) για να περιορίσουμε την ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου περίξ αυτών και τη διάχυση EMI.
- Χρησιμοποιούμε θωρακισμένα σύρματα, αντί για απλά μονωμένα, με την εξωτερική θωράκιση να είναι συνδεδεμένη στο GR.
- Μειώνουμε, ει δυνατόν, τις συχνότητες των σημάτων αν αυτά επηρεάζουν μέσω EMI γειτονικά κυκλώματα, π.χ. μειώνουμε τη φέρουσα συχνότητα σε μια AM διαμόρφωση, όπως αυτή που θα δούμε στην υλοποίηση της κατασκευής για την παρούσα εργασία.
- Αυξάνουμε τη συχνότητα (π.χ. διακοπτική συχνότητα στα παλμοτροφοδοτικά) αν αυτό μας διευκολύνει στο φιλτράρισμα των αρμονικών τάσης - ρεύματος, που διαφορετικά θα διαχέονταν προς διάφορες κατευθύνσεις εντός του κυκλώματος (είσοδος, έξοδος, τροφοδοσίες).
- Υλοποιούμε ενεργά (με TE) ή παθητικά φίλτρα (κυκλώματα RLC, συνήθως RC) επιτρέποντας τη διέλευση σήματος μόνο στη μπάντα ενδιαφέροντος.
- Υιοθετούμε τοπολογίες ή χρησιμοποιούμε ολοκληρωμένα κυκλώματα με υψηλό CMRR (Common Mode Rejection Ratio).
- Εφαρμόζουμε κατάλληλο feedback όταν αυτό αποτελεί τρόπο απαλοιφής του θορύβου.
- Επιλέγουμε ολοκληρωμένα που παράγουν χαμηλό θόρυβο ή που είναι λιγότερο ευαίσθητα σε εισερχόμενους θορύβους είτε από τα I/O pins τους, είτε από την τροφοδοσία. Προκειμένου για σεισμόμετρα (πολύ χαμηλές συχνότητες) δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε τυχόν dc offset, input bias current, temperature drift και θόρυβος  $1/f$  των ολοκληρωμένων που θα χρησιμοποιηθούν.
- Pins ολοκληρωμένων που αναγράφονται ως N/C (not connected) ή ακροδέκτες που δεν χρησιμοποιούνται (αν π.χ. σε ένα chip με δύο ή τέσσερις TE εμείς δεν χρησιμοποιούμε κάποιον/κάποιους) αντιμετωπίζονται ανάλογα με τις συστάσεις του κατασκευαστή για το τι είναι σωστότερο. Οι δεύτεροι συνήθως γειώνονται ή συνδέονται σε κάποια από τις τροφοδοσίες μέσω κάποιας αντίστασης.
- Αν είναι εφικτό, θορυβώδη τμήματα του κυκλώματος σχεδιάζονται σε διαφορετικό PCB από εκείνα τα οποία υλοποιούν άλλες, λιγότερο θορυβώδεις λογικές. Μπορεί π.χ. να διαχωρίζουμε σε διαφορετικές πλακέτες το ψηφιακό από το αναλογικό μέρος του κυκλώματος, ή, προκειμένου για σήμα που διαμορφώνεται και

αποδιαμορφώνεται, να διαχωρίζουμε το μέρος του κυκλώματος με το διαμορφωμένο σήμα (υψηλή συχνότητα) από εκείνο με τη χρήσιμη πληροφορία (χαμηλή συχνότητα).

- Αποφεύγουμε τη χρήση αντιστατών με μεγάλες τιμές αντίστασης. Αντιστάσεις μεγαλύτερες από λίγα MΩ είναι ικανές να δημιουργήσουν προβλήματα σε ευαίσθητα κυκλώματα όπως αυτά των σεισμολογικών οργάνων.
- Αποφεύγουμε να σχεδιάζουμε παθητικά φίλτρα με πηνία και προτιμούμε RC φίλτρα. Αποφεύγουμε έτσι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, αλλά και την απορρόφηση EMI.
- Σχεδιάζουμε high density PCB κυκλώματα τεχνολογίας SMT (Surface Mount Technology) και όχι through-hole. Χρησιμοποιούμε στοιχεία διαφορετικά από τα SMD (Surface Mount Device), π.χ. πυκνωτές MKT ή αντιστάτες 0.25W, μόνο αν δε γίνεται αλλιώς. Αυτή η τακτική μειώνει ασφαλώς και τις διαστάσεις των κυκλωμάτων.
- Φροντίζουμε ώστε τα κέρδη στους διάφορους κλάδους να είναι τέτοια ώστε να μην ενισχύονται οι θόρυβοι. Πέρα από τις δοκιμές επί του πάγκου, αυτή η μελέτη υποστηρίζεται αρκετά και από τη μελέτη των διαγραμμάτων μέτρου-φάσης και του γεωμετρικού τόπου ριζών της συνάρτησης μεταφοράς ενός συστήματος. Με αυτά τα εργαλεία μπορούμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος όταν κάποια κέρδη μεταβάλλονται και τον τρόπο με τον οποίο οι πόλοι κινούνται προς το δεξί ημιπίπεδο ή τον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η απόκριση φάσης του κυκλώματος και άρα μπορούμε να προβλέψουμε την ενίσχυση του θορύβου σε κάποια ζώνη συχνοτήτων ή τη μετάβαση σε ασταθή λειτουργία.
- Κάνουμε Noise Analysis με κάποιο λογισμικό εξομοίωσης κυκλωμάτων (π.χ. Orcad PSpice ή LTspice) για να εντοπίσουμε τις σπουδαιότερες πηγές θορύβου και να λάβουμε τα κατάλληλα μέτρα (π.χ. τοποθέτηση αντιπαρασιτικών πυκνωτών στα κατάλληλα σημεία). Στη [40], για παράδειγμα, γίνεται noise analysis του κυκλώματος του σεισμόμετρου που παρουσιάζεται και προκύπτει πως η σπουδαιότερη πηγή θορύβου είναι ο θερμικός θόρυβος του πηνίου που υπάρχει εκεί.

Σίγουρα υπάρχουν και άλλες τεχνικές για την αντιμετώπιση του θορύβου οι οποίες διαφεύγουν του γράφοντος, δύο όμως είναι τα αδιαμφισβήτητα γεγονότα: (i) Ποτέ δε θα μπορέσουμε να τον μηδενίσουμε (ii) Είναι μεγάλη η σημασία του σε ευαίσθητα όργανα όπως τα σεισμόμετρα και τα αξελερόμετρα για σεισμολογικές εφαρμογές.

## 2.4.4. Χαρακτηρισμός οργάνων με βάση τις επιδόσεις τους

### 2.4.4.1. Κλάση οργάνου (*class*)

Στα σεισμολογικά όργανα η κλάση του οργάνου καθορίζεται από το εύρος ζώνης συχνοτήτων στο οποίο η απόκριση του οργάνου παρουσιάζει σταθερό πλάτος (είναι, όπως λέμε, flat). Την κατηγοριοποίηση αυτή έχει καθιερώσει η USGS [6]. Οι διαθέσιμες κλάσεις είναι οι A, B, C και D με τα καλύτερα να είναι αυτά της κλάσης A.

Εάν αναφερόμαστε σε σεισμόμετρα η class-A χαρακτηρίζεται από flat velocity response στη ζώνη 30s – 50Hz. Τα broadband (BB) σεισμόμετρα λ.χ. είναι class-A όργανα με flat response στην παραπάνω ζώνη (τουλάχιστον) και bandwidth που τυπικά εκτείνεται από τα 100s ως τα 50Hz, ενώ κάποια BB όργανα έχουν ακόμα μεγαλύτερο bandwidth. Υπάρχουν και τα short period class-A σεισμόμετρα με bandwidth από 5s ως 50Hz και flat response από 1Hz ως 35Hz. Το bandwidth καθορίζεται από τις συχνότητες αποκοπής (-3dB).

Για τα αξελερόμετρα, ως class-A χαρακτηρίζονται όσα έχουν flat response στη ζώνη 50s – 50Hz και class-B όσα έχουν flat response στη ζώνη 10s – 35Hz.

### 2.4.4.2. Clip level

Καθορίζει τις ακρότατες τιμές του μετρούμενου μεγέθους που μπορούν να μετρηθούν από το όργανο. Τα class-A αξελερόμετρα έχουν συνήθως clip level τουλάχιστο  $\pm 3.5g$ , ενώ τα class-B έχουν περίπου  $\pm 2.5g$ . Παράδειγμα: Ένα BB σεισμόμετρο με ευαισθησία 1500V/(m/s) και μέγιστη πραγματική τάση εξόδου  $\pm 20V$  έχει clip level στα  $\pm 0.013m/s$ . Είναι σημαντικό να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως η τάση εξόδου όταν το όργανο κλιπάρει συνήθως δεν είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας του ηλεκτρονικού του κυκλώματος, αλλά λίγο μικρότερη. Αν για παράδειγμα τα ηλεκτρονικά του κυκλώματα λειτουργούν με διαφορεική τροφοδοσία  $\pm 15V$  το clip level θα αντιστοιχεί σε τάση περίπου  $\pm 13V$ . Αυτό καθορίζεται από το output voltage swing της τελευταίας μονάδας ενίσχυσης πριν την έξοδο.

### 2.4.4.3. Ευαισθησία (*sensitivity*)

Όπως σε όλα τα μετρητικά όργανα, έτσι και στα σεισμολογικά όργανα, ως ευαισθησία ορίζεται ο λόγος της μεταβολής του σήματος εξόδου προς τη μεταβολή του σήματος εισόδου που την προκαλεί. Στην περίπτωσή μας, επειδή η απόκριση πλάτους αλλάζει με τη συχνότητα οφείλουμε να περιορίσουμε τον παραπάνω ορισμό στη flat περιοχή. Τυπική τιμή για την ευαισθησία ενός BB σεισμόμετρου είναι 1000 – 1500 V/(m/s). Αντίστοιχα, τυπικές τιμές για τα αξελερόμετρα είναι  $\pm 2.5V/g$  ως  $\pm 4V/g$ . Η ευαισθησία μπορεί να αλλάξει αν το

clip level είναι παράμετρος που μπορεί να αλλάξει από το χρήστη (δίνεται αυτή η δυνατότητα σε κάποιες συσκευές) και γενικά είναι συνάρτηση του clip level και της μέγιστης τάσης εξόδου, που επίσης μπορεί σε κάποια προϊόντα να επιλέγεται από το χρήστη (π.χ. μεταξύ δύο τιμών) και να πάρει τιμές  $\pm 10V$ ,  $\pm 20V$  ή και  $\pm 40V$ . Η ευαισθησία και το clip level επιλέγονται ανάλογα και με το πιο είναι το εύρος τάσεων που μπορεί να δεχτεί η επόμενη βαθμίδα, που είναι ο digitizer.

#### **2.4.4.4. Dynamic range**

Βασικό μέγεθος που καθορίζει την ποιότητα ενός σεισμολογικού οργάνου είναι ο εσωτερικός του θόρυβος (Brownian και electronic noise). Αν και γενικά ο θόρυβος είναι συνάρτηση της συχνότητας, στην πλειονότητα των περιπτώσεων η διακύμανση με τη συχνότητα είναι αρκούντως μικρή ώστε να μπορούμε να θεωρήσουμε πως πρόκειται για λευκό θόρυβο. Για παράδειγμα, σε strong motion αξελερόμετρα τυπική τιμή για την κατανομή του θορύβου είναι το  $1\mu g/Hz^{1/2}$ , ενώ για ένα weak motion αξελερόμετρο τυπική τιμή είναι το  $1ng/Hz^{1/2}$ .

Για την περιγραφή των επιδόσεων ενός οργάνου ως προς τον εσωτερικό του θόρυβο χρησιμοποιείται το μέγεθος της δυναμικής περιοχής (dynamic range), που ορίζεται ως ο λόγος της rms τιμής τάσης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του μετρούμενου μεγέθους (καθορίζεται από το clip level) προς την rms τιμή του θορύβου στην έξοδο και εκφράζεται σε dB. Ένα ποιοτικό όργανο αναμένεται να έχει dynamic range γύρω στα 150dB. Εάν ο θόρυβος δεν έχει σταθερό πλάτος σε όλο το bandwidth του οργάνου, στον παρονομαστή του παραπάνω λόγου θα μπει η rms τιμή του θορύβου στη συχνότητα  $f=1Hz$ . Μια άλλη περίπτωση είναι να χωριστεί το bandwidth σε ζώνες με προσεγγιστικά σταθερά (διαφορετικά) επίπεδα θορύβου και συνεπώς διαφορετικό dynamic range για την κάθε μία από αυτές.

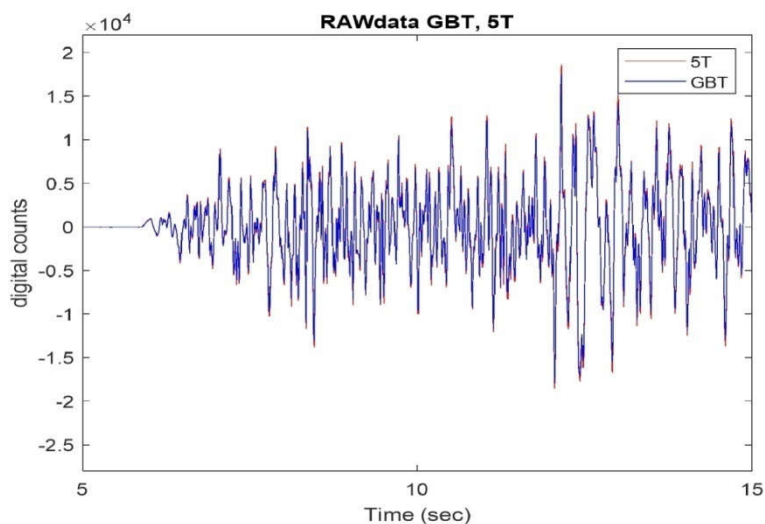
Να σημειωθεί πως σε ένα σεισμολογικό όργανο το dynamic range μπορεί να οριστεί ανεξάρτητα, μόνο για το μηχανισμό του αισθητήρα μαζί με το ηλεκτρονικό του κύκλωμα και κάπως έτσι άλλωστε πλασάρεται ένας τέτοιος μηχανισμός στην αγορά. Συνήθως όμως μας ενδιαφέρουν οι επιδόσεις θορύβου του συνόλου της διάταξης, η οποία περιλαμβάνει και τη βαθμίδα του digitizer που ακολουθεί. Ο digitizer διαθέτει στην είσοδό του μια αναλογική προενισχυτική βαθμίδα και μετά έναν Analog-to-Digital Converter (ADC). Ο θόρυβος του προενισχυτή προστίθεται σε αυτόν του μηχανισμού του αισθητήρα και άρα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του θορύβου στις εγγραφές του οργάνου [41]. Στη συνέχεια, η διαδικασία κβαντοποίησης και ψηφιοποίησης της πληροφορίας εισάγει ένα σφάλμα



κβαντοποίησης (quantization error) και γνωρίζουμε πως το SQNR (Signal-to-Quantization Noise Ratio) δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το SNR (Signal-to-Noise Ratio) της βαθμίδας που προηγείται, διότι σε μια τέτοια περίπτωση προβάλλεται δυσανάλογα στην έξοδο ο θόρυβος της αναλογικής διάταξης του αισθητήρα [42]. Με άλλα λόγια, με δεδομένο το dynamic range του αισθητήρα (μαζί με τα ηλεκτρονικά του) δεν έχει νόημα να αυξάνεται οσοδήποτε το πλήθος των bits του ψηφιακού μέρους (το SQNR μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και το resolution του ADC), αντιθέτως πρέπει να παραμένει σε τέτοιο επίπεδο ώστε (ιδανικά) μεταβολή του LSB (Least Significant Bit), δηλαδή μεταβολή του αποτελέσματος κατά ένα digital count, να αντιστοιχεί στο πλάτος του εσωτερικού θορύβου. Έτσι, αν έχουμε δεδομένο αισθητήρα, είναι σημαντικό να επιλέξουμε το σωστό digitizer, χωρίς απαραίτητα να ισχύει πως (για παράδειγμα) ένας 22bit ή 24bit digitizer θα είναι καλύτερη επιλογή από έναν 20bit (τυπική τιμή πλέον για έναν digitizer είναι τα 32bit).

#### 2.4.4.5. Διαγράμματα φασματικής κατανομής ισχύος θορύβου

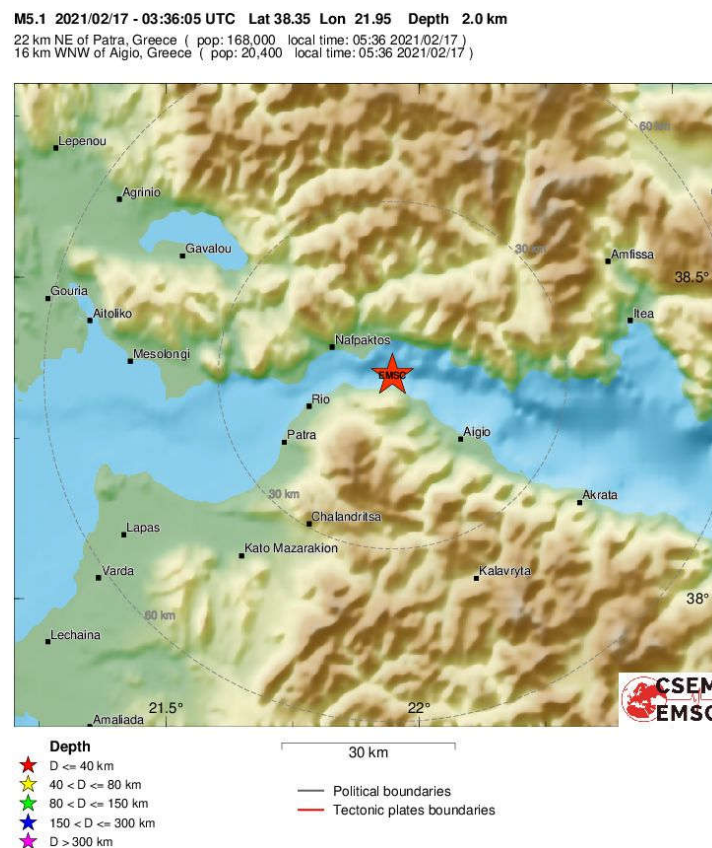
Μία απευθείας εικόνα για τον εσωτερικό θόρυβο ενός οργάνου μπορούμε να έχουμε με το διάγραμμα φασματικής κατανομής ισχύος θορύβου. Για να καταλάβουμε όμως τι είναι ένα τέτοιο διάγραμμα, είναι χρήσιμο πρώτα να περιγράψουμε τι είναι ένα διάγραμμα φασματικής κατανομής ισχύος (Power Spectral Density – PSD plot).



Σχ. 2.14α Καταγραφή ενός σεισμού από δύο αξελερόμετρα [59].

Στο (Σχ. 2.14α) βλέπουμε την καταγραφή ενός σεισμού κατά τη διεύθυνση Z από το αξελερόμετρο που παρουσιάζεται στην [59] (μπλε καμπύλη), καθώς και από ένα αξελερόμετρο αναφοράς (κόκκινη καμπύλη, μόλις που διακρίνεται). Ο σεισμός αυτός,

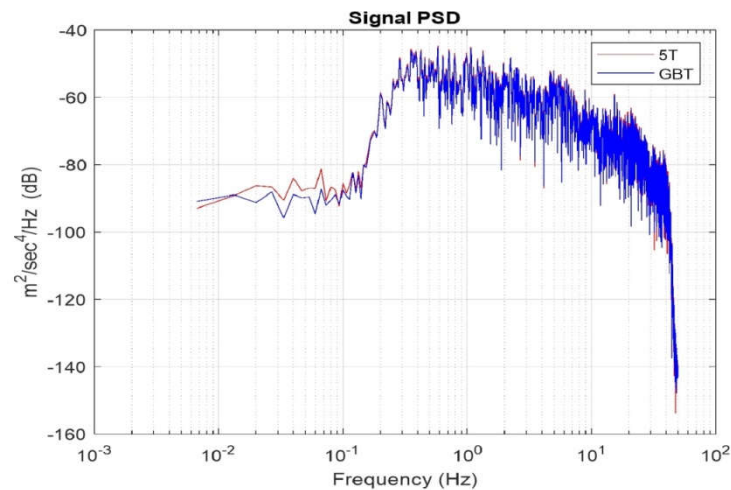
μεγέθους 5.1R, συνέβη στις 17/2/2021 και είχε επίκεντρο περίπου 22km από το σταθμό καταγραφής, ο οποίος βρισκόταν στο Παν/μιο Πατρών (Σχ. 2.14β). Οι μονάδες στον y άξονα είναι digital counts (δηλαδή δίνεται η ψηφιακή τιμή που καταγράφεται από τον digitizer ως η A/D μετατροπή του σήματος εξόδου του σένσορα), ενώ από τη σύγκριση προκύπτει πως τα δύο μηχανήματα κάνουν σχεδόν ταυτόσημες καταγραφές. Παρότι στο Σχ. 2.14α αποτυπώνονται μόλις περίπου 15s, η διάρκεια του σεισμού ήταν περίπου ένα λεπτό. Είναι προφανές πως δεν πρόκειται για κάποια περιοδική ταλάντωση, αλλά για μια ακανόνιστη δόνηση.



Σχ. 2.14β Αποτύπωση της ανακοίνωσης για το σεισμό της 17/2/2021 στη θαλάσσια περιοχή μεταξύ Ναυπάκτου και Ρίου.

Με την εφαρμογή ειδικού αλγόριθμου, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τη συνάρτηση μεταφοράς του οργάνου (Welch, [44]), μπορούμε για το συνολικό διάστημα που διήρκεσε ο σεισμός να κάνουμε φασματική ανάλυση της κυματομορφής και να δούμε την κατανομή της ισχύος του σεισμού στο σημείο του σταθμού στις διάφορες συχνότητες. Έτσι, προκύπτει το διάγραμμα PSD του Σχ. 2.15 στο οποίο αποτυπώνεται και πάλι το αποτέλεσμα και από τα δύο μηχανήματα. Στο γράφημα αυτό πρέπει να προσέξουμε πως η δειγματοληψία από τον

digitizer έχει γίνει με ρυθμό 200sps και συνεπώς η πληροφορία στην περιοχή άνω των 100Hz παύει να είναι ακριβής. Στην πραγματικότητα, με 200sps, η καταγραφή παύει να είναι ακριβής για συχνότητες άνω των 70Hz περίπου. Είναι σημαντικό κατά την ανάγνωση ενός τέτοιου διαγράμματος να γνωρίζουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας καθώς και την τυχόν εφαρμογή έξτρα ψηφιακών φίλτρων στον digitizer (τέτοια φίλτρα εφαρμόζονται με επιλογή του χρήστη).

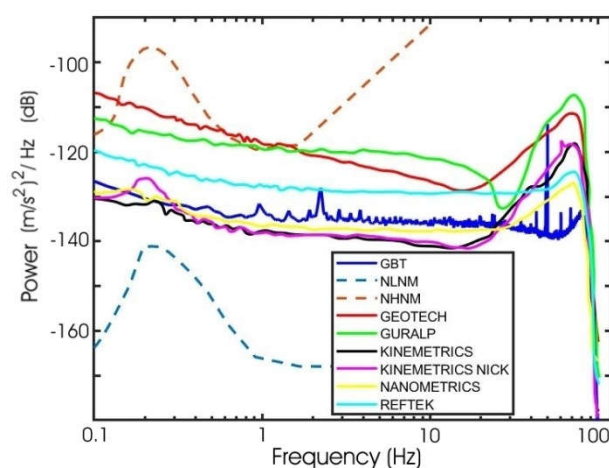


Σχ. 2.15 Διαγράμματα PSD των σημάτων του Σχ. 2.14α.

Επίσης να σημειωθεί πως στη διεθνή βιβλιογραφία, για τα διαγράμματα φασματικής κατανομής ισχύος, άλλοτε χρησιμοποιούνται ως μονάδες μέτρησης τα  $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$  dB και σε άλλες περιπτώσεις τα  $(\text{m/s}^2)/\sqrt{\text{Hz}}$  dB, χωρίς να υπάρχει κάποια σαφής αιτιολόγηση επί του θέματος. Η έκφραση της ίδιας ποσότητας με τις δύο παραπάνω διαφορετικές επιλογές έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση του αποτελέσματος κατά έναν παράγοντα 2, όπως είδαμε και για τη σχέση (2.3).

Έστω τώρα πως απαιτείται να γίνει διάγραμμα για τη φασματική κατανομή του εσωτερικού θορύβου του οργάνου. Το αισθητήριο όργανο τοποθετείται σε κάποιο εξαιρετικά ήσυχο μέρος [41], [43]. Ως τέτοιο μπορεί να θεωρηθεί η στοά ενός ορυχείου σε μεγάλο βάθος ή τα έγκατα ενός μεγάλου φράγματος μακριά από πόλεις, χωριά, οδικούς ή σιδηροδρομικούς άξονες. Αν δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα, αμέσως επόμενη επιλογή είναι κάποια οπή σε βραχώδες έδαφος, μακριά από τον αστικό ιστό, με το όργανο σε βάθος τουλάχιστο 10m. Στη συνέχεια αφήνεται για κάποιο επαρκές χρονικό διάστημα, π.χ. 12 ή 24 ώρες, ώστε να έρθει σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του και ακολούθως αφήνεται να γράφει για αρκετές ώρες ή ίσως για λίγες μέρες. Με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού

επιλέγεται ένα συνεχές διάστημα κάποιων λεπτών (15 ως 60 λεπτά αρκούν) το οποίο να είναι σχετικά ήσυχο σε σχέση με το υπόλοιπο μήκος της καταγραφής. Με τον όρο «ήσυχο» εννοούμε πως σε αυτό το διάστημα δεν έχει συμβεί κάποιος έστω μικρός σεισμός και αυτό που καταγράφεται είναι ο εσωτερικός θόρυβος του οργάνου, ο οποίος φυσικά υπερτίθεται στον απανταχού παρόντα θόρυβο γης. Τέλος, με την εφαρμογή ειδικού αλγόριθμου (Welch, [44]), ο οποίος διαιρεί το δεδομένο διάστημα σε μικρότερα με κάποιο ποσοστό αλληλοεπικάλυψης (το επιλέγει ο χρήστης) γίνεται φασματική ανάλυση με Fast Fourier Transform (FFT) και προκύπτει το διάγραμμα φασματικής πυκνότητας θορύβου (Noise Power Spectral Density plot – NPSD). Στο Σχ. 2.16 βλέπουμε τη συγκριτική παράθεση τέτοιων διαγραμμάτων που αντιστοιχούν σε διάφορα εμπορικά προϊόντα.

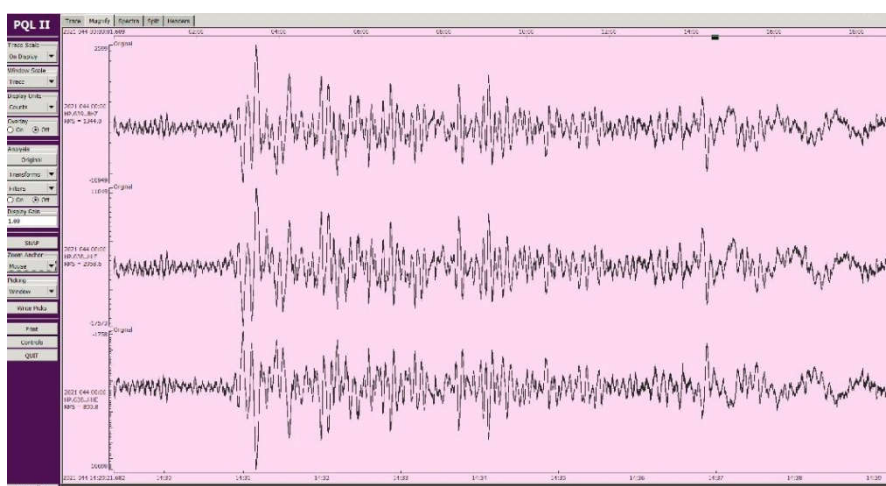


**Σχ. 2.16** Διαγράμματα φασματικής κατανομής ισχύος εσωτερικού θορύβου για διάφορα εμπορικά αδρανειακά αξελερόμετρα, που χρησιμοποιούνται για σεισμική και γεωφυσική έρευνα [58].

Υπάρχει τέλος η περίπτωση να μη μας ενδιαφέρουν οι απόλυτες επιδόσεις ενός οργάνου σχετικά με τον εσωτερικό του θόρυβο, αλλά μόνο οι επιδόσεις του συγκριτικά με κάποιο άλλο όργανο το οποίο θεωρούμε ως πρότυπο (π.χ. κάποιο το οποίο καταλαμβάνει αποδεδειγμένα στην αγορά μια από τις καλές θέσεις από απόψεως ποιότητας). Τότε δεν είναι απαραίτητο να αναζητήσουμε ήσυχο μέρος για την εγκατάσταση του σταθμού. Αρκεί τα δυο όργανα να βρίσκονται εγκατεστημένα στο ίδιο κιβώτιο και να καταγράφουν μαζί για ένα διάστημα π.χ. 24 ή 48 ωρών ή, τέλος πάντων, ολίγων 24ώρων, κατά το οποίο θα καταγράφουν σεισμούς, εξωτερικούς, θορύβους, θορύβους λόγω μεταβολών των καιρικών συνθηκών, αυτόματες mass-recentering μετατοπίσεις για όποιο από τα δύο όργανα έχει τέτοια λειτουργία κλπ. Μέσα από ειδικό αλγόριθμο και πάλι (McNamara [27]) το διάστημα

αυτό χωρίζεται σε μικρότερα, διάρκειας π.χ. μιας ή δύο ωρών, με σχετικά μικρή αλληλοεπικάλυψη (π.χ. 10%) και εκτελείται ανάλυση της φασματικής κατανομής για το κάθε ένα ξεχωριστά. Επί του διαγράμματος τώρα, η φασματική κατανομή για κάθε ένα από αυτά τα διαστήματα εμφανίζεται ως ένα ίχνος και συνεπώς από το συνολικό διάστημα των κάποιων 24ώρων προκύπτουν πολλά τέτοια ίχνη.

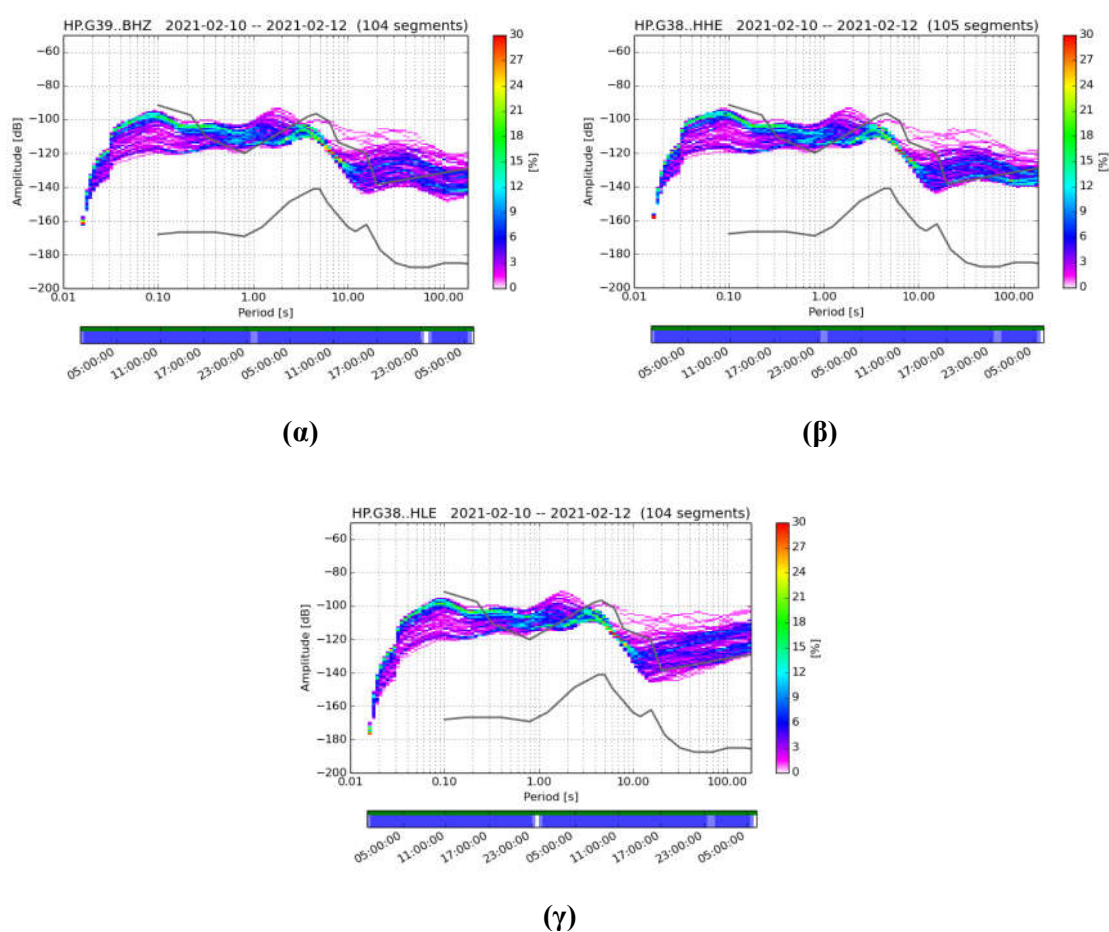
Στο Σχ. 2.17 βλέπουμε την καταγραφή στο χρόνο ενός σεισμού (Z συνιστώσα) από τρία διαφορετικά όργανα. Όπως και στην περίπτωση των δύο οργάνων του Σχ. 2.14, όλα φαίνεται να καταγράφουν το ίδιο πράγμα (η τρίτη κυματομορφή είναι απλώς ανεστραμμένη). Είναι σαφές πως από παρατηρήσεις στο πεδίο του χρόνου δεν είναι εφικτή κάποια ουσιώδης σύγκριση, οφείλουμε λοιπόν να καταφύγουμε σε NPSD διαγράμματα προκειμένου να πετύχουμε σύγκριση μεταξύ των οργάνων και να βγάλουμε συμπεράσματα.



Σχ. 2.17 Καταγραφή της Z συνιστώσας ενός σεισμού από τρεις διαφορετικούς εμπορικούς αισθητήρες.

Στο Σχ. 2.18 βλέπουμε τρία τέτοια διαγράμματα που αντιστοιχούν στη Z συνιστώσα τριών διαφορετικών οργάνων. Το κάθε ίχνος επί του διαγράμματος αντιστοιχεί, όπως προαναφέρθηκε, σε κάποιο σχετικά μικρό χρονικό διάστημα (σε σχέση με το σύνολο των δεδομένων που απεικονίζονται). Η χρωματική κλίμακα δείχνει την πιθανότητα να διέρχεται ίχνος από το συγκεκριμένο σημείο του διαγράμματος και βοηθάει πιο εύκολα στο να εντοπίσουμε σε ποιες συχνότητες εμφανίζεται η φασματική υπογραφή αληθινών δονήσεων (μικρή πιθανότητα, ροζ χρώμα) και σε ποιες συγκεντρώνεται ο θόρυβος (μεγάλη πιθανότητα, κόκκινο χρώμα), καθώς και σε τι επίπεδα (dB) κυμαίνεται ο θόρυβος. Επειδή εδώ ο θόρυβος μπορεί να είναι και μηχανικός θόρυβος (δονήσεις) προερχόμενος από το περιβάλλον, ή άλλες αιτίες (π.χ. συστολή – διαστολή μερών του οργάνου λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας)

είναι απαραίτητο σε ένα τέτοιο διάγραμμα να εμφανίζονται και τα μοντέλα NNNM και NLNM, που είδαμε στην §1.3. Η σύγκριση μεταξύ των διαγραμμάτων μπορεί να μας δείξει αν κάποια συμβάντα καταγράφηκαν με τον ίδιο τρόπο από τα όργανα, καθώς και σε ποιες περιοχές του φάσματος υπερτερεί το ένα όργανο σε σχέση με το άλλο από άποψης θορύβου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, επειδή τα όργανα βρίσκονταν εγκατεστημένα εντός του αστικού ιστού (σε υπόγειο πολυκατοικίας), τα αποτυπωμένα ίχνη συγκεντρώνονται στην περιοχή του NNNM, αλλά και ακόμη ψηλότερα. Διαγράμματα από σταθμούς στην ύπαιθρο βρίσκονται πιο χαμηλά, εντός της ζώνης μεταξύ NLNM και NNNM.



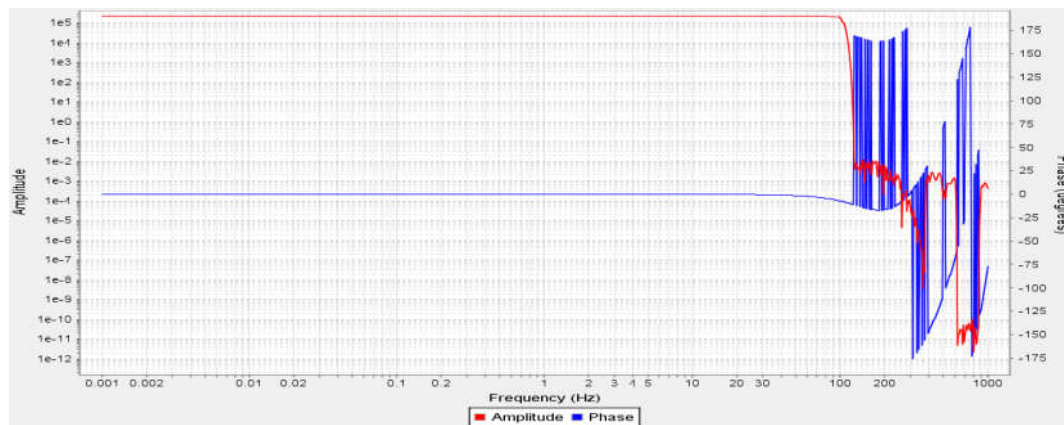
**Σχ. 2.18** Συγκριτικά NPSD διαγράμματα τριών διαφορετικών αισθητήρων. Το (α) αφορά σε υπό ανάπτυξη σεισμόμετρο [5] με ελατήριο σταθεράς  $K$ , το (β) αντιστοιχεί στο ίδιο (κατά τ' άλλα) όργανο αλλά με ελατήριο σταθεράς  $3K$  και το τρίτο στο εμπορικό προϊόν TC-120 της Nanometrics. Παρατηρούμε πως στη γκάμα 0.1s – 10s και τα τρία όργανα συμπεριφέρονται παρόμοια. Διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στις πολύ μικρές περιόδους (<0.1s) και στις πολύ μεγάλες (>10s) με το ενδιαφέρον να επικεντρώνεται στη δεύτερη περίπτωση. Το (β) είναι εκτός συναγωνισμού, ενώ το (α) φαίνεται να είναι ελαφρώς καλύτερο από το (γ) καθώς εμφανίζει παρόμοια διακριτική ικανότητα με εκείνο (σεισμικά συμβάντα έχουν καταγραφεί ομοίως και από τα δύο όργανα), αλλά παρουσιάζει χαμηλότερα επίπεδα θορύβου (dB).

#### 2.4.4.6. Συνάρτηση μεταφοράς – IRIS Consortium files

Η γνώση της συνάρτησης μεταφοράς (ΣΜ) στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας  $s=j\omega$  για ένα σεισμολογικό όργανο είναι κρίσιμης σημασίας για την ορθή του χρήση. Το αναλογικό σήμα, το οποίο μετά την κβαντοποίηση και ψηφιοποίηση που υπόκειται στον ADC καταγράφεται ως μια ακολουθία διακριτών τιμών, δε μπορεί να αντιστοιχηθεί στο αληθινό σεισμικό κύμα αν η ΣΜ δεν είναι γνωστή. Εφόσον η ΣΜ είναι γνωστή, η καταγραφή από έναν αξελερογράφο ή σειсмоγράφο μπορεί, μέσα από μια μαθηματική διεργασία αποσυνέλιξης (deconvolution), που γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, να οδηγήσει στην ανασύνθεση της σεισμικής δόνησης.

Η ΣΜ ενός αισθητήρα είναι πλήρως γνωστή αν είναι γνωστό το κέρδος του αισθητήρα (σε  $V/(m/s)$  ή  $V/(m/s^2)$ ) για μια συγκεκριμένη συχνότητα (επιλέγεται κάποια εντός της flat περιοχής), καθώς και οι μιγαδικές τιμές των πόλων και των μηδενικών της. Για την ανασύνθεση όμως του πραγματικού σήματος εισόδου δεν επαρκεί η γνώση της ΣΜ του αισθητήριου οργάνου, αλλά απαιτείται να είναι γνωστό και το κέρδος του προενισχυτή του digitizer, το sampling rate καθώς και τυχόν ψηφιακά φίλτρα που εφαρμόζονται. Έτσι, δημιουργούνται από τους κατασκευαστές σεισμολογικών οργάνων τυποποιημένα αρχεία κειμένου (.resp files, από τη λέξη response, μπορούν να προσπελαθούν και να τροποποιηθούν με οποιονδήποτε text editor). Τα αρχεία αυτά είναι διαθέσιμα στο σύνδεσμο του IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) [46] και πρόσβαση σε αυτά μπορεί να έχει ο οποιοσδήποτε. Περιέχουν τις πληροφορίες για κάθε αισθητήρα που λανσάρεται στην αγορά από μέλος της κοινοπραξίας IRIS, ώστε να μπορεί ο καθένας να συγκρίνει μεταξύ οργάνων από διάφορες εταιρίες πριν προβεί σε κάποια αγορά, ενώ επιπλέον για τους πελάτες που θα συνδυάσουν αισθητήρα και digitizer της ίδιας εταιρίας προσφέρονται αντίστοιχα αρχεία, τα οποία όμως περιλαμβάνουν και την επίδραση του digitizer. Για κάθε διαφορετικό σετ επιλογών στη λειτουργία του digitizer (συχνότητα δειγματοληψίας, εφαρμοζόμενο φίλτρο, clip level) υπάρχει διαφορετικό .resp file. Στο Παράρτημα I της εργασίας παρατίθεται ενδεικτικά ένα τέτοιο .resp file. Είναι για κάποιο εμπορικό αξελερόμετρο (corner frequency = 200Hz) και για ρυθμίσεις του digitizer: sampling frequency  $f_s=250\text{Hz}$  (άλλες επιλογές: 50, 100, 200, 500, 1000), Filter = Linear (άλλη επιλογή: Minimum) και Clip level = 4g (άλλες επιλογές: 0.25, 0.5, 1, 2).

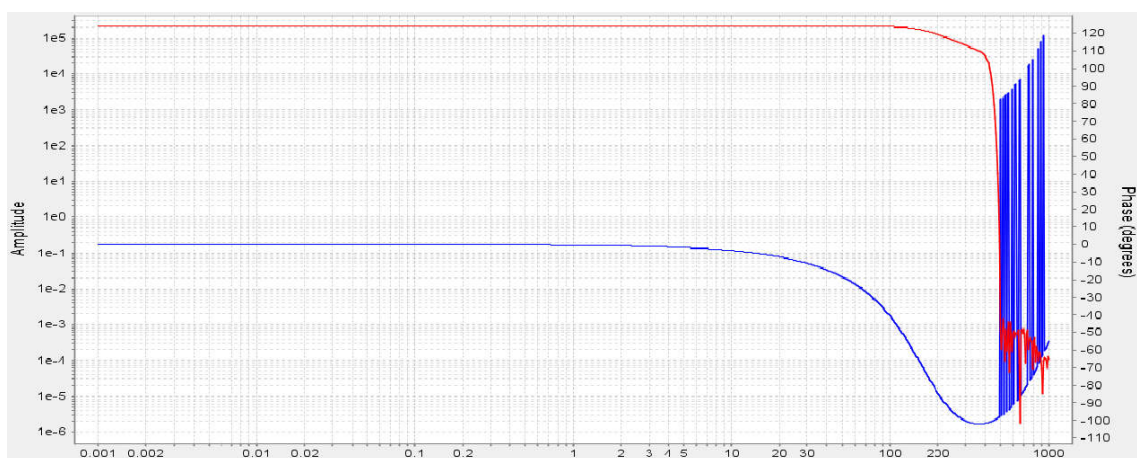
Για να μπορέσουμε να αποτυπώσουμε γραφικά τη συνάρτηση μεταφοράς (μέτρο, φάση) ένα .resp file ανοίγεται με το λογισμικό εργαλείο JResPlot. Στη σειρά γραφημάτων του Σχ. 2.19 βλέπουμε τα διαγράμματα μέτρου-φάσης του συστήματος (αισθητήρας + digitizer) με ρυθμίσεις για τον digitizer Filter = Linear, Clip level = 4g και  $f_s = 250, 500$  και  $1000$  Hz για



(α)



(β)



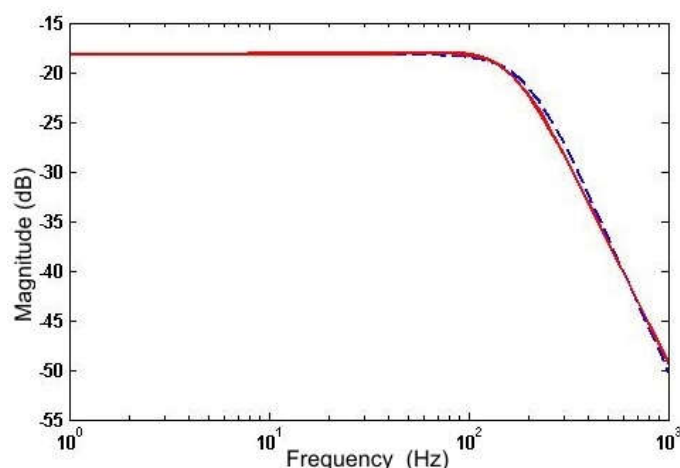
(γ)

**Σχ. 2.19** Διαγράμματα μέτρου – φάσης για το συνδυασμό αξελερόμετρου μαζί με digitizer της ίδιας εταιρίας, όπως προκύπτουν από τα σχετικά .resp files. Η διαφοροποίηση ανάμεσα στα τρία διαγράμματα είναι η συχνότητα δειγματοληψίας: (α) 250Hz, (β) 500Hz και (γ) 1kHz.

τα σχήματα 2.19(α), 2.19(β) και 2.19(γ) αντίστοιχα, ενώ στο Σχ. 2.20 είναι το διάγραμμα μέτρου του ίδιου σένσορα, όπως παρουσιάζεται στην [58].



Παρατηρούμε από τα διαγράμματα πως η συχνότητα δειγματοληψίας που επιλέγουμε θέτει ένα όριο συχνότητας πάνω από το οποίο ουσιαστικά δε μπορούμε να έχουμε πληροφορία για την αληθινή δόνηση. Για  $f_s=250\text{Hz}$  αυτό το όριο είναι περίπου  $120\text{Hz}$ , για  $f_s=500\text{Hz}$  είναι περίπου  $250\text{Hz}$  και για  $f_s=1\text{kHz}$  είναι περίπου  $450\text{Hz}$ .



**Σχ. 2.20** Διάγραμμα μέτρου για το αξελερόμετρο που παρουσιάζεται στην [58]. Με διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται το διάγραμμα για την πλήρη έκφραση της συνάρτησης μεταφοράς (3.12), ενώ με συνεχή γραμμή εκείνο για την απλοποιημένη έκφραση (3.15) (§3.2.3.3). Η απλοποιημένη έκφραση (3.15) είναι αυτή που αποτυπώνεται στο περιεχόμενο του σχετικού .resp file (Σχ. 2.19).

#### 2.4.5. Άλλα κριτήρια και προδιαγραφές

Κατά την αγορά σεισμολογικών οργάνων ο υποψήφιος αγοραστής λαμβάνει υπόψιν του διάφορες παραμέτρους πριν καταλήξει στις τελικές του επιλογές. Πιο σωστά, με βάση και όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, πρέπει να πούμε ότι δίνει προτεραιότητα στις διάφορες παραμέτρους που τον ενδιαφέρουν και αναλόγως συντάσσει τους όρους του διαγωνισμού και τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Το κόστος (ανώτατη καθορισμένη τιμή) είναι μία από αυτές, αλλά προδιαγράφεται τέτοιο ώστε σπανίως να αποκλείει τα ακριβά προϊόντα, οπότε η επιλογή προμηθευτή κρίνεται συνήθως στις υπόλοιπες τεχνικές λεπτομέρειες. Οι πιο σπουδαίες εξ αυτών έχουν ήδη αναφερθεί: class, bandwidth, dynamic range, clip level, sensitivity, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας, για την οποία έγινε αναφορά στην §2.1. Αναλόγως την εφαρμογή όμως μπορεί άλλα κριτήρια να έχουν εξίσου βαρύνουσα ή ακόμα και μεγαλύτερη σπουδαιότητα.

Ο digitizer είναι ουσιαστικά το ήμισυ ενός σεισμολογικού σταθμού και οι τεχνικές του προδιαγραφές είναι σημαντικές. Μία από αυτές είναι ο αριθμός των καναλιών που διαθέτει. Σε ένα digitizer με τρία κανάλια μπορεί να συνδεθεί μόνο ένα αισθητήριο και να

καταγράφονται οι τρεις συνιστώσες N, E και Z, ενώ σε έναν άλλο με έξι μπορούν να συνδεθούν δύο όργανα, π.χ. ένα αξελερόμετρο και ένα σεισμόμετρο, που είναι ένας συνήθης συνδυασμός. Το resolution είναι μια άλλη σπουδαία παράμετρος. Υπάρχουν π.χ. προϊόντα των 16bit, των 22bit ή των 32bit. Το βάθος της εσωτερικής μνήμης για αποθήκευση δεδομένων είναι ένα άλλο θέμα, όπως και η δυνατότητα σύνδεσης μέσω Ethernet, USB θύρας και WiFi, ενώ η επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλου TCP/IP και δικτύου κινητής τηλεφωνίας πρέπει να θεωρείται δεδομένη. Για τις USB θύρες είναι ένα ζήτημα το αν είναι USB 1, 2 ή 3 και πόσο μεγάλες μνήμες flash μπορούν να υποστηρίξουν (π.χ. φλασάκι USB 3 σε θύρα USB 2 μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή της θύρας, μια λεπτομέρεια που αναγράφεται στο user's manual). Το sampling rate και αν αυτό είναι ρυθμιζόμενο από το χρήστη είναι ένα άλλο σπουδαίο ζήτημα, καθώς καθορίζει τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να μεταφέρονται σε πραγματικό χρόνο ή να αποθηκεύονται σε περίπτωση διακοπής της επικοινωνίας, όπως και το χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος κατά την επεξεργασία των δεδομένων, αλλά και την πιστότητα της καταγραφής αν μιλάμε για συχνότητες άνω των μερικών δεκάδων Hz. Το λειτουργικό που χρησιμοποιείται (π.χ. Linux) και η ειδική μονάδα για τη λήψη σήματος GPS γενικά δεν απασχολούν τους χρήστες, αλλά αναφέρονται στα data sheets.

Τα επίπεδα θορύβου καθώς και οι αποδεκτές τάσεις εισόδου στον προενισχυτή του digitizer είναι ένα άλλο ζήτημα. Ο θόρυβος αυτός συνήθως μελετάται συνολικά, μαζί με τον θόρυβο τον προερχόμενο από το αισθητήριο αυτό καθεαυτό μια και δεν είναι εύκολο να διαχωριστούν μεταξύ τους, αν και κάποιοι κατασκευαστές αναφέρονται ξεχωριστά στο θόρυβο από τον προενισχυτή του digitizer. Επειδή πολλές φορές γίνεται αγορά μόνο digitizer ή μόνο αισθητήρων, αναγκαστικά πρέπει να υπάρχει συμβατότητα ανάμεσα στα δύο (το τμήμα του εξοπλισμού που ήδη υπάρχει και εκείνο που πρόκειται να αγοραστεί) και τα οποία μπορεί τελικά να μην προέρχονται από την ίδια κατασκευαστική εταιρία. Είναι χαρακτηριστικό το παράδειγμα να επιλέγεται αισθητήρας από τους ακριβούς, θεωρητικά καλύτερης ποιότητας, αλλά πιο οικονομικός digitizer από άλλη εταιρία.

Το μέγεθος και το βάρος των οργάνων επί της ουσίας είναι παράμετροι που δεν έχουν ιδιαίτερη σημασία και όλα τα όργανα των διαφόρων εταιριών εμφανίζουν παρόμοιες διαστάσεις και βάρος λίγων κιλών. Παρότι ένας σένσορας των 3kg, λ.χ. σε σχέση με έναν άλλο των 5kg, προσφέρει μια ευκολία στη διαδικασία εγκατάστασης σταθμών όταν πρόκειται να εγκατασταθούν πολλοί σταθμοί και είναι συνεπώς σημαντικό το έργο να ολοκληρωθεί σε λίγες μέρες, αυτό το πλεονέκτημα από μόνο του δε δικαιολογεί τη διαφορά κόστους ανά αισθητήριο που μπορεί να είναι πολλές χιλιάδες ευρώ. Αντιθέτως μάλιστα, το

μεγαλύτερο μέγεθος αποδεδειγμένα προσφέρει το πλεονέκτημα της μικρότερης θερμοκρασιακής ευαισθησίας [21]. Είναι όμως ένα κριτήριο το οποίο, εκ πρώτης όψεως παραδόξως, αποτυπώνεται περιστασιακά, ιδίως σε φωτογραφικούς διαγωνισμούς, των οποίων οι όροι προφανώς έχουν σα σκοπό να αποκλείσουν οικονομικότερα μοντέλα για ανομολόγητους αλλά ευνόητους λόγους.

Τέλος, μια σπουδαία οικογένεια κριτηρίων στην αγορά σεισμολογικών οργάνων, είναι η εγγύηση που προσφέρεται, οι γραπτές ή προφορικές δεσμεύσεις του κατασκευαστή σχετικά με το after sales support, καθώς και το καλό όνομα της εταιρίας στην αγορά, το οποίο χτίζεται κυρίως μέσα από την ποιότητα των προϊόντων, αλλά και μέσα από την καλή αντιμετώπιση των πελατών σε όλους του τομείς (οικονομικές συνδιαλλαγές και διευκολύνσεις, shipping, άμεση ανταπόκριση στα διάφορα αιτήματα, επισκευές). Στην ίδια οικογένεια κριτηρίων εντάσσεται και το αποτύπωμα που αφήνει η εταιρία στη διεθνή σεισμολογική κοινότητα, μέσα από διαφημίσεις, δημοσιεύσεις, παρουσία σε εκθέσεις και συνέδρια, συνεργασίες με εκπαιδευτικά ιδρύματα κλπ.

## **2.5. Η παγκόσμια αγορά σεισμολογικών οργάνων**

Υποψήφιοι αγοραστές σεισμολογικών οργάνων είναι συνήθως κρατικές δομές (π.χ. Περιφέρεια, Υπουργείο, Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας), πανεπιστήμια, γεωδυναμικά ινστιτούτα, ερευνητικά κέντρα, μεγάλες κατασκευαστικές εταιρίες ή εταιρίες γεωφυσικών ερευνών κλπ. Επειδή συνήθως δρομολογείται η αγορά πλήθους οργάνων και τα κόστη είναι μεγάλα, οι απαιτούμενες προδιαγραφές αποτυπώνονται στην προκήρυξη κάποιου διαγωνισμού. Στο διαγωνισμό συμμετέχουν οι εταιρίες κατασκευής οργάνων απευθείας ή μέσω των κατά τόπους αντιπροσώπων τους.

Η αγορά είναι παγκόσμια και οι κατασκευαστές ανά τον κόσμο είναι λίγοι, μόλις δέκα - δώδεκα περίπου, με τρεις-τέσσερις εξ αυτών να κατέχουν το συντριπτικά μεγαλύτερο κομμάτι της. Το γεγονός μάλιστα ότι κάποιοι εξ αυτών, γενικά, δεν κινούνται επιχειρηματικά στον παγκόσμιο χάρτη, αλλά περιορίζονται γεωγραφικά στις γειτονικές τους χώρες, στις οποίες και κατέχουν τη μερίδα του λέοντος (π.χ. οι ιάπωνες κατασκευαστές στην περιοχή της ανατολικής Ασίας και του Ειρηνικού) εντείνει τον ανταγωνισμό μεταξύ των υπολοίπων στην υπόλοιπη αγορά. Ο κάθε μικρότερος κατασκευαστής λοιπόν εκτελεί έναν αγώνα δρόμου για να μπορέσει να λανσάρει προϊόντα εφάμιλλης ποιότητας με εκείνα των μεγάλων

κατασκευαστών σε ανταγωνιστικό κόστος. Σε αυτό τον αγώνα κρίσιμης σημασίας αποδεικνύεται η ύπαρξη συνεργατών/αντιπροσώπων στις διάφορες χώρες (με έμφαση φυσικά σε αυτές που παρουσιάζουν έντονη σεισμικότητα), οι οποίοι θα μπορέσουν να ενημερωθούν για τους προκηρυσσόμενους διαγωνισμούς και να τρέξουν τις διαδικασίες για την κατάθεση προσφοράς. Σημαντικές είναι επίσης και οι συνεργασίες μεταξύ των ολίγων μικρών εταιριών, κατά τ' άλλα ανταγωνιστών, όταν επιδιώκουν να κερδίσουν διαγωνισμούς στους οποίους συμμετέχουν οι γίγαντες του χώρου, για να διεισδύσουν έτσι σε αγορές στις οποίες είναι λιγότερο γνωστοί. Σημειωτέον πως για τη μοναδική στην Ελλάδα εταιρία ανάπτυξης σεισμολογικών οργάνων [5] το μεγαλύτερο μέρος των προϊόντων της προορίζεται για εξαγωγή και όχι για εγχώριους πελάτες.

Πέρα από τις λεπτομέρειες των διάφορων επιχειρηματικών ελιγμών, ο γενικός κανόνας είναι πως τα προϊόντα των λιγότερο γνωστών εταιριών πωλούνται σε τιμές μικρότερες από εκείνα των περισσότερο γνωστών και είναι θέμα του αγοραστή πλέον να κρίνει και να ζυγίσει ανάμεσα στο κόστος και την ποιότητα για να καταλήξει στο τι θα αγοράσει. Σε κάποιες περιπτώσεις η ποιότητα είναι πραγματικά αντίστοιχη με αυτή των εδραιωμένων προϊόντων και αυτό που απομένει να γίνει είναι η θραύση του φράγματος έλλειψης εμπιστοσύνης από τους υποψήφιους πελάτες προς τις μικρότερες εταιρίες. Αυτό το τελευταίο επιτυγχάνεται με καλύτερη διαφήμιση και επειδή η καλύτερη διαφήμιση είναι τα ίδια τα προϊόντα ενθαρρύνονται οι αγοραστές να πάρουν μικρό αριθμό οργάνων, δοκιμαστικά, σε οριακά χαμηλό κόστος, με την προοπτική μελλοντικής ευρύτερης συνεργασίας. Σε άλλες περιπτώσεις ο αντιπρόσωπος διαθέτει στον υποψήφιο αγοραστή όργανα, εντελώς δωρεάν για μια μικρή δοκιμαστική περίοδο.

## **2.6. Η αρχή λειτουργίας force-balance των αδρανειακών σεισμολογικών οργάνων**

Για την καταγραφή της κίνησης του εδάφους σε ένα ιδανικό αδρανειακό αισθητήριο η σεισμική μάζα διατηρείται στη ΘΙ με ελατήριο αμελητέας σταθεράς ελατηρίου και οποιοδήποτε άλλο στοιχείο στήριξης της μάζας παρουσιάζει μηδενικές τριβές προς αυτή. Συνεπώς στην οποιαδήποτε κίνηση του εδάφους η μάζα παραμένει ακίνητη και καταγράφεται η μεταξύ τους σχετική μετατόπιση. Παρότι η υλοποίηση του ιδανικού αισθητηρίου είναι αδύνατη τα πρώτα σεισμόμετρα (στα μέσα του 20ου αι.) προσπαθούσαν

να προσεγγίσουν τις παραπάνω συνθήκες, κυρίως μέσω της χρήσης μεγάλων μαζών που μπορεί να έφταναν τις πολλές δεκάδες κιλά. Ακόμα όμως κι αν πετυχαίνει κανείς να προσεγγίσει τις ιδανικές συνθήκες που προαναφέρθηκαν δε θα το κατάφερνε για όλο το εύρος δυνατών μετατοπίσεων, που όπως είδαμε μπορεί να είναι ακόμη και κάποια μέτρα. Έτσι λοιπόν τα πρώτα σεισμόμετρα αντιμετώπιζαν σοβαρούς τεχνικούς περιορισμούς.

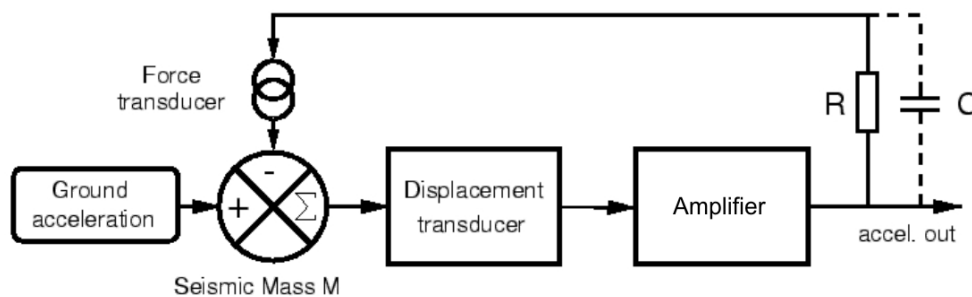
Με την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής δόθηκε η δυνατότητα ώστε μέσω μιας λογικής κλειστού βρόχου ελέγχου να μπορούν οι αδρανειακοί αισθητήρες να λειτουργούν καλά και να καταγράφουν πιστά την κίνηση του εδάφους σε όλο το δυνατό εύρος τιμών για τις παραμέτρους μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση και συχνότητα. Η λογική είναι σχετικά απλή: η απόκλιση από τη ΘΙ ανιχνεύεται και μέσω ενός σερβομηχανισμού (force actuator ή forcer) ασκείται στη μάζα μία δύναμη επαναφοράς ανάλογη της απόκλισης από τη ΘΙ (force balance - FB) στη βάση κάποιας λογικής PD ή PID ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό η μετατόπιση της σεισμικής μάζας από τη ΘΙ θα είναι πλέον μικρή ακόμα και για μεγάλες τιμές των παραμέτρων μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση. Για παράδειγμα, στην [58] παρουσιάζεται ένα αξελερόμετρο για το οποίο, στη μέγιστη μετρήσιμη επιτάχυνση (4g) η απόκλιση της σεισμικής μάζας είναι μόλις 0.045mm.

Καθώς η τελικά προκύπτουσα απόκλιση οφείλεται στη διαφορά της αδρανειακής δύναμης λόγω της κίνησης του εδάφους και του αθροίσματος της ασκούμενης δύναμης επαναφοράς από τον actuator συν τη δύναμη του ελατηρίου (αν διαιρέσουμε με τη μάζα μιλάμε πια για επιταχύνσεις και όχι για δυνάμεις), και εφόσον η απόκλιση είναι πολύ μικρή, το μέτρο της δύναμης επαναφοράς και άρα και η απόκλιση από τη ΘΙ είναι ουσιαστικά ανάλογα της επιτάχυνσης του εδάφους. Θεωρούμε δηλαδή πως η απόκλιση της σεισμικής μάζας είναι τόσο μικρή, σχεδόν αμελητέα, που ουσιαστικά η ασκούμενη δύναμη επαναφοράς είναι ίση με την αδρανειακή δύναμη λόγω της επιτάχυνσης του εδάφους, ενώ η δύναμη του ελατηρίου θεωρείται επίσης αμελητέα. Λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς διαφόρων τμημάτων του κλειστού βρόχου η προσέγγιση αυτή είναι τόσο πιο καλή όσο πιο μικρή είναι η τελική μετατόπιση, η οποία βέβαια δεν μπορεί να είναι μηδενική, ενώ για κάποιους λόγους δεν επιδιώκουμε να την κάνουμε οσοδήποτε μικρή (δε θέλουμε πάρα πολύ μεγάλο damping στη λειτουργία κλειστού βρόχου, αλλά ένα damping factor περίπου ίσο με  $1/\sqrt{2}$  και ένα overshoot σε βηματική διέγερση περίπου 5%). Επειδή η δύναμη αυτή είναι ανάλογη του ρεύματος στο σερβομηχανισμό, το ρεύμα αυτό, ή η πτώση τάσης που προκαλεί καθώς διέρχεται από μια αντίσταση, μετριέται και αποτελεί μέτρο της επιτάχυνσης του εδάφους.

Στα αξελερόμετρα η επιτάχυνση του εδάφους είναι ευθέως ανάλογη της απόκλισης της σεισμικής μάζας από τη ΘΙ. Συνεπώς, στα FB σεισμολογικά όργανα το μέγεθος που κατ'

ουσία μετριέται είναι η επιτάχυνση του εδάφους. Οι διάφορες λεπτομέρειες όμως στο ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου, σε συνδυασμό με τις παραμέτρους του μηχανικού συστήματος (μάζα-ελατήριο) καθορίζουν αν το όργανο θα είναι σεισμόμετρο (flat response ταχύτητας) ή αξιλερόμετρο (flat response επιτάχυνσης).

Στο Σχ. 2.21 βλέπουμε το γενικό μπλοκ διάγραμμα ενός FB σεισμολογικού οργάνου. Βλέπουμε πως ο P έλεγχος υλοποιείται με μια αντίσταση και ο D έλεγχος με έναν πυκνωτή. Εάν αυτός ο πυκνωτής είναι πολύ μεγάλος, ώστε ουσιαστικά να καθορίζει το ρεύμα μέσα στον forceer, το κέρδος του κλάδου ανάδρασης γίνεται ανάλογο της συχνότητας και το συνολικό σύστημα παρουσιάζει απόκριση πλάτους επιτάχυνσης αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας και άρα απόκριση ταχύτητας σταθερή με τη συχνότητα, μια σχεδιαστική επιλογή που συναντάμε στα σεισμόμετρα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε με περισσότερη λεπτομέρεια κάποιες τοπολογίες κυκλωμάτων ελέγχου FB σεισμολογικών οργάνων.



Σχ. 2.21 Συνοπτικό block διάγραμμα για ένα σεισμολογικό όργανο (αξιλερόμετρο) [45].

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

# **ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ FORCE-BALANCE ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ**

### **3.1. Βασικές τοπολογίες κυκλωμάτων ελέγχου σεισμολογικών οργάνων force-balance**

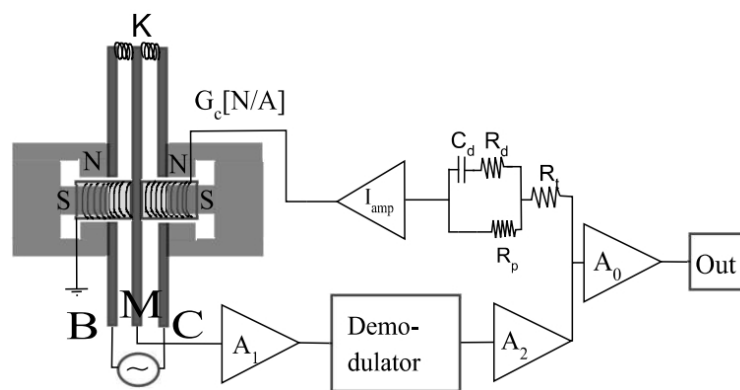
#### **3.1.1. Εισαγωγή**

Είναι γεγονός ότι λόγω εμπορικής αξιοποίησης της σχετικής γνώσης δεν υπάρχουν πολλές αναλυτικές περιγραφές, σίγουρα όχι από κατασκευαστές εμπορικών προϊόντων και όταν υπάρχουν είναι –ίσως και εσκεμμένα– ελλιπείς ή στρεβλές. Στα data sheets και στα user's manuals οι πληροφορίες σχετίζονται με τις επιδόσεις των οργάνων και τις απαιτούμενες ενέργειες από πλευράς χρήστη για την εγκατάσταση, τη συντήρηση και τη σωστή λειτουργία. Σπανίως και μόνο σε παλαιότερες εκδόσεις (προηγούμενων δεκαετιών, από την εποχή που δεν ελλόχευε ο κίνδυνος αντιγραφής της τεχνολογίας από κινέζους μηχανικούς) μπορεί κανείς να βρει μερικές λεπτομέρειες παραπάνω για την εσωτερική δομή των οργάνων, τις τοπολογίες, τις συνδέσεις, τα ολοκληρωμένα που χρησιμοποιούνται κλπ. Πιο πιθανό είναι να βρει κανείς κάποιες απίθανες λεπτομέρειες και συμβουλές στο διαδίκτυο από ομάδες ή μεμονωμένα άτομα που ασχολήθηκαν με την κατασκευή ενός τέτοιου οργάνου και ανέβασαν τα συμπεράσματά τους σε ένα web site ή σε κάποιο open access online περιοδικό. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα που βρίσκουμε στη [40]. Εκεί, δύο ιδιώτες κατασκεύασαν με υλικά από τα ράφια του υπογείου τους ένα BB σεισμόμετρο και διέθεσαν όλες τις πληροφορίες στο κοινό (σχέδια, κυκλώματα, υλικά, μετρήσεις, φωτογραφίες, συμβουλές κλπ), ενώ μέσα στα λίγα χρόνια που ακολούθησαν κατασκεύασαν δεύτερη και τρίτη έκδοση του οργάνου, ενσωματώνοντας κάθε φορά διάφορες βελτιώσεις και μειώνοντας το μέγεθός του. Σε προσωπική επικοινωνία μέσω email που είχε ο γράφων με έναν εκ των δύο δημιουργών αυτών των σεισμόμετρων προέκυψε πως αυτή τη στιγμή (2021) λειτουργούν παγκοσμίως περίπου δέκα τέτοια αυτοσχέδια σεισμόμετρα και πως οι δημιουργοί τους (ιδιώτες χομπίστες κατά βάση) διατηρούν ένα forum επικοινωνίας και ανταλλαγής ιδεών, εμπειριών και απόψεων.

Στα επόμενα θα παρουσιαστούν μερικές τοπολογίες σεισμολογικών οργάνων, όπως αντλήθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία, θα αναλυθεί η λειτουργία τους και θα ερμηνευθεί η επίδραση της κάθε υπομονάδας στην απόκριση της συσκευής. Θα δούμε πρώτα τη βασική τοπολογία για ένα FB αξελερόμετρο και στη συνέχεια θα εξετάσουμε τις τρεις βασικές τοπολογίες σεισμόμετρων οι οποίες είναι κατά τι πιο περίπλοκες από την αντίστοιχη του αξελερόμετρου. Κάποιες έξτρα λεπτομέρειες για τη γεωμετρία και τις μηχανικές ιδιότητες του συστήματος μάζας ελατηρίου, για τον actuator, καθώς και για το αισθητήριο μέτρησης της μετατόπισης από τη ΘΙ θα δοθούν σε επόμενες παραγράφους.

### 3.1.2. Force-balance αξελερόμετρο

Η βασική αρχή στη λογική ελέγχου ενός FB αξελερόμετρου αποτυπώνεται στο μπλοκ διάγραμμα του Σχ. 3.1.



Σχ. 3.1 Συνοπτικό block διάγραμμα του κυκλώματος ελέγχου ενός FB αξελερόμετρου [58].

Βασικό στοιχείο του οργάνου είναι το σύστημα μάζας ελατηρίου. Ο προσεκτικός σχεδιασμός του μηχανικού συστήματος είναι κρίσιμης σημασίας για τη λειτουργία του οργάνου, ιδίως αν δεν πρόκειται για αξελερόμετρο αλλά για σεισμόμετρο, όπου ζητούμενο είναι η όσο γίνεται χαμηλότερη φυσική συχνότητα. Σε τέτοια περίπτωση (σεισμόμετρο) και προκειμένου να επιτευχθούν φυσικές συχνότητες της τάξης του 1Hz, ή και αρκετά μικρότερες, με μάζες που δε θα ξεπεράσουν τις κάποιες δεκάδες ή λίγες εκατοντάδες gr, επιστρατεύονται διάφορες τεχνικές σχεδίασης όπως είναι οι αστατικές γεωμετρίες (astatic geometries), γεωμετρίες δηλαδή στις οποίες ουσιαστικά το μηχανικό σύστημα από μόνο του (μάζα - ελατήριο), χωρίς την άσκηση ηλεκτρομαγνητικής δύναμης επαναφοράς, βρίσκεται σε ασταθή ισορροπία [18]-[20]. Η ιδιαίτερη προσθήκη που έχει κάθε τέτοιος αισθητήρας



αστατικής γεωμετρίας είναι ο μηχανισμός επαναφοράς (re-centering servo). Ο μηχανισμός αυτός συνοδεύεται από σειρά μειονεκτημάτων, όπως είναι οι βλάβες που μπορεί να παρουσιάσει, αλλά και οι συχνές ενεργοποιήσεις του, οι οποίες μπορεί να διαρκούν και κάποια λεπτά, κατά τα οποία αποκλείεται η καταγραφή σεισμού. Αντιθέτως, για ένα strong motion αξελερόμετρο η μάζα είναι συνήθως της τάξης των μόλις κάποιων γραμμαρίων χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερα σχεδιαστικά τεχνάσματα.

Πέρα από τις σχεδιαστικές λεπτομέρειες αυτού του συστήματος, οι παράμετροι που τελικά ενδιαφέρουν για την απόκριση του αξελερόμετρου (ηλεκτρονικό μέρος – συνάρτηση μεταφοράς) είναι η φυσική του συχνότητα  $f_0$  και η σταθερά φυσικής απόσβεσης  $\zeta$ . Η μετατόπιση από τη ΘΙ μετριέται και μετατρέπεται σε τάση, η οποία, έπειτα από κατάλληλη ενίσχυση, εφαρμόζεται πάνω σε ένα δικτύωμα μιας αντίστασης ( $R_p$ ) και ενός πυκνωτή ( $C_d$ ) παράλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους (για τα στοιχεία  $R_d$  και  $R_t$  θα μιλήσουμε παρακάτω). Το συνολικό ρεύμα που διαρρέει το δικτύωμα αυτό είναι και το ρεύμα που τροφοδοτείται προς τον actuator, συνήθως όχι απευθείας (υπάρχει όμως και αυτή η επιλογή), αλλά περνώντας μέσα από έναν current-to-current ενισχυτή, ο οποίος με τη σειρά του μπορεί να είναι μια εν σειρά σύνδεση δύο ενισχυτών, ενός current-to-voltage και ενός voltage-to-current. Το ρεύμα που έρχεται μέσα από την  $R_p$  υλοποιεί τον αναλογικό (P) έλεγχο, αφού είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης, δηλαδή ανάλογο της μετατόπισης της σεισμικής μάζας από τη ΘΙ και εκείνο που έρχεται μέσα από τον  $C_d$  υλοποιεί τον διαφορικό έλεγχο, αφού είναι ανάλογο της παραγώγου της εφαρμοζόμενης τάσης, δηλαδή ανάλογο της παραγώγου της μετατόπισης της σεισμικής μάζας. Φυσικά δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι μέσα από τις γνωστές μας σχέσεις

$$F_{ελ} = -Kx \quad (\text{δύναμη ελατηρίου}) \quad (3.1)$$

$$F = Ma \quad (\beta' \text{ νόμος τους Νεύτωνα}) \quad (3.2)$$

προκύπτει (Παράτημα II) πως η μετατόπιση από τη ΘΙ σε ένα FB όργανο για σταθερή επιτάχυνση του εδάφους είναι ανάλογη αυτής της επιτάχυνσης (το κέλυφος του οργάνου είναι πακτωμένο στο έδαφος). Στις παραπάνω γενικές σχέσεις  $F$  είναι η συνιστάμενη δύναμη επί μιας μάζας  $M$ ,  $a$  η επιτάχυνση,  $F_{ελ}$  είναι η δύναμη του ελατηρίου,  $K$  είναι η σταθερά του ελατηρίου και  $x$  η μετατόπιση από τη ΘΙ, που είναι ίση με την παραμόρφωση του ελατηρίου.

### **3.1.3. Force – balance σεισμόμετρο: τοπολογία A**

Ο πιο απλός τρόπος για να υλοποιηθεί κανείς ένα σεισμόμετρο είναι να πάρει την έξοδο ενός αξελερόμετρου σαν αυτό που αποτυπώνεται στο Σχ. 3.1 και να την περάσει μέσα από κατάλληλο ολοκληρωτή, ώστε να μας δίνει την ταχύτητα. Προκειμένου να πληρούνται οι απαιτήσεις για αυξημένη ευαισθησία στις χαμηλές συχνότητες και για μικρή επιρροή από το θόρυβο Brown πρέπει η φυσική συχνότητα του συστήματος ανοιχτού βρόχου να είναι αρκούντως μικρή (μέχρι ολίγα s), δηλαδή να χρησιμοποιηθεί μια μεγαλύτερη σε σχέση με το αξελερόμετρο μάζα (αρκετές δεκάδες gr ή ίσως 150-200gr) ή/και ελατήριο με μικρότερη σταθερά. Ενώ όμως ένα αξελερόμετρο έχει flat απόκριση έναντι της επιτάχυνσης από κάποια μέγιστη συχνότητα (roll-off frequency) έως το DC, η σταθερά ολοκλήρωσης του ολοκληρωτή στην παραπάνω περίπτωση θέτει ένα κάτω όριο συχνότητας για τη flat απόκριση της ταχύτητας.

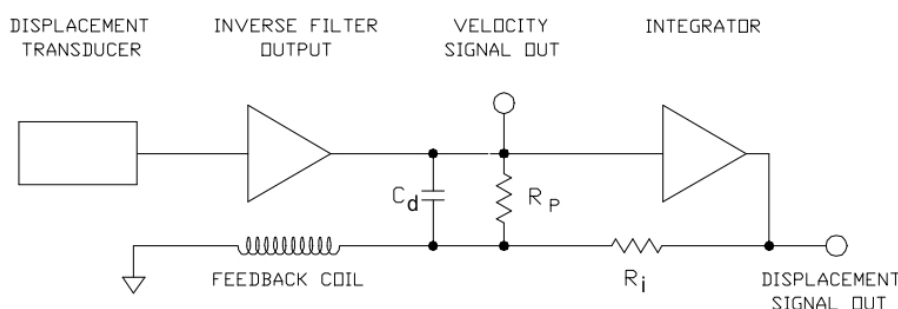
Δυστυχώς όμως ένα τέτοιο σεισμόμετρο δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση κι αυτό διότι δεν έχει υψηλή ευαισθησία στις πολύ χαμηλές συχνότητες, ενώ στην ίδια περιοχή του φάσματος, ο θόρυβος που παρουσιάζει γίνεται συγκρίσιμος με τα ασθενή σήματα που επιθυμούμε να ανιχνεύσουμε. Οπότε και το προκύπτον σεισμόμετρο θα είναι αναγκαστικά περιορισμένων επιδόσεων και ενδεχομένως ακατάλληλο για περιόδους σήματος μεγαλύτερες από 100-120s, όταν πλέον στην αγορά συχνά απαιτούνται BB σεισμόμετρα για ως και 160-360s.

### **3.1.4. Force – balance σεισμόμετρο: τοπολογία B**

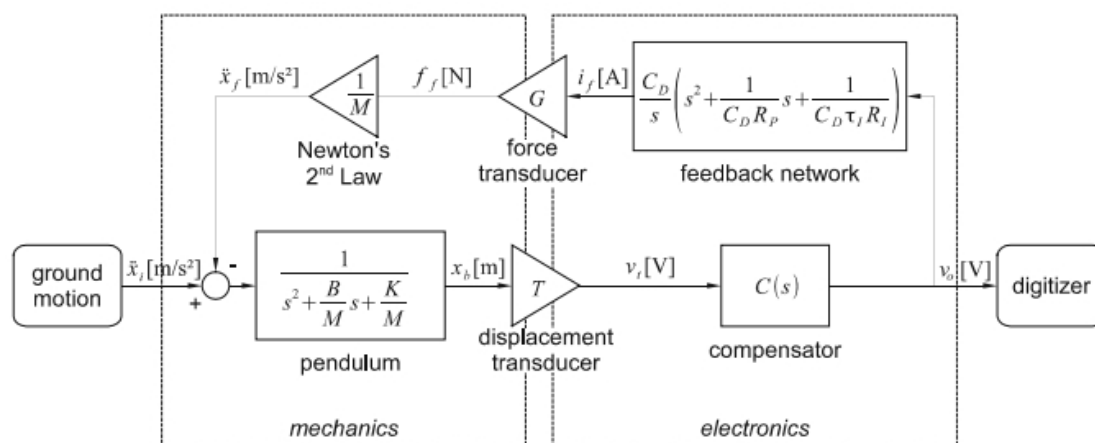
Η πλέον ικανοποιητική προσέγγιση για τη δημιουργία σεισμόμετρου υψηλών επιδόσεων, με έμφαση στις χαμηλές συχνότητες (BB), αποτυπώνεται στο κύκλωμα (συνοπτική περιγραφή) του σχήματος Σχ. 3.2 (στο Σχ. 3.3 βρίσκεται το αντίστοιχο μπλοκ διάγραμμα με τις ΣΜ). Σε αυτό παρατηρούμε πως δεν υπάρχει ολοκληρωτής στην έξοδο, δεν κάνουμε ολοκλήρωση της επιτάχυνσης, η προκύπτουσα έξοδος είναι απευθείας ταχύτητα. Οι προσθήκες – τροποποιήσεις σε αυτό το κύκλωμα, σε σχέση με εκείνο του αξελερόμετρου που είδαμε στο Σχ. 3.1, είναι τρεις:

- (1) Στον κλάδο ανοιχτού βρόχου υπάρχει τώρα και ένα αντίστροφο φίλτρο (inverse filter - IF), αυτό που στο Σχ. 3.3 αποτυπώνεται ως “compensator”.
- (2) Στον κλάδο ανάδρασης, παράλληλα με τα στοιχεία  $R_p$  και  $C_d$  που είδαμε, υπάρχει και ένας ολοκληρωτής με τη σταθερά χρόνου αυτού του ολοκληρωτή να καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την κάτω συχνότητα αποκοπής.

- (3) Η τιμή της  $C_d$ , η οποία για το αξελερόμετρο ήταν κάποιες εκατοντάδες nF, εδώ λαμβάνει τιμές της τάξης των δεκάδων  $\mu F$  (το ίδιο δεν ισχύει και για την τοπολογία A).



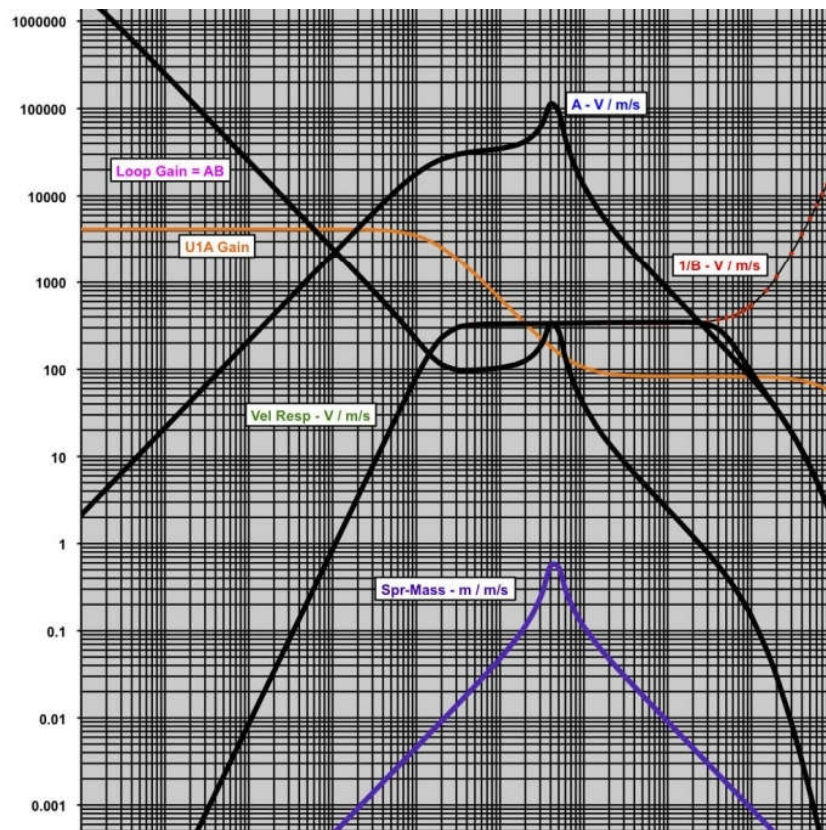
Σχ. 3.2 Τοπολογία κυκλώματος ελέγχου ενός BB σεισμόμετρου [48].



Σχ. 3.3 Γενικό μπλοκ διάγραμμα για ένα BB σεισμόμετρο [21].

Το IF είναι ο ένας από τους δύο λόγους για την αύξηση της ευαισθησίας στις χαμηλές συχνότητες. Το διάγραμμα πλάτους του είναι όπως αυτό που φαίνεται στο Σχ. 3.4 (πορτοκαλί καμπύλη). Έχει δύο κρίσιμες συχνότητες ( $f_{ifL}$  και  $f_{ifH}$ ) οι οποίες επιλέγονται έτσι ώστε η  $f_{ifH}$  (μηδενικό του IF) να συμπέσει με τον πόλο του μηχανικού συστήματος και η  $f_{ifL}$  (πόλος του IF) να συμπέσει με την επιθυμητή χαμηλή συχνότητα αποκοπής στη flat απόκριση του σεισμόμετρου. Το μηχανικό σύστημα (μάζα – ελατήριο) είναι δεύτερης τάξης και έχει μια φυσική απόκριση όπως αυτή που φαίνεται στο Σχ. 3.4 (μωβ καμπύλη). Τοποθετώντας το μηδενικό του IF στον πόλο (συχνότητα συντονισμού)  $f_0$  του μηχανικού συστήματος καταφέρνουμε να αντισταθμίσουμε την απόσβεση του σήματος, μειωμένης της συχνότητας, για συχνότητες μικρότερες της  $f_0$ . Η απόσβεση του μηχανικού συστήματος γίνεται με 20dB/dec και έτσι, για να επιτευχθεί πλήρης αντισταθμιση το IF σχεδιάζεται ώστε να ενισχύει με επίσης 20dB/dec, αν και στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται και η επιλογή για

40dB/dec [49]. Η απόκριση ταχύτητας ενός τέτοιου σεισμόμετρου δε διαφέρει σε κάτι από αυτή για το όργανο με τον ολοκληρωτή στην έξοδο που περιγράψαμε στην §3.1.3.



**Σχ. 3.4** Διαγράμματα πλάτους για ένα BB σεισμόμετρο. Με μωβ είναι η καμπύλη για το μηχανικό σύστημα μάζας – ελατηρίου, ενώ με πορτοκαλί είναι εκείνη του αντίστροφου φίλτρου. Με την ένδειξη “Vel Resp – V/m/s” σημειώνεται η καμπύλη απόκρισης ταχύτητας του οργάνου [40].

Το IF όμως, με την ενίσχυση που προσφέρει στις χαμηλές συχνότητες, δε μπορεί από μόνο του να επιτύχει την επιθυμητή αυξημένη ευαισθησία σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων. Απαιτείται και ένα μηχανικό σύστημα με όσο το δυνατόν χαμηλότερη φυσική συχνότητα, το οποίο επιτυγχάνεται με το συνδυασμό μεγάλης αδρανειακής μάζας και μικρής σταθεράς ελατηρίου (πάντα συγκριτικά με αυτά που συναντάμε σε ένα αξελερόμετρο). Όμως αυτές οι δύο απαιτήσεις ικανοποιούνται δύσκολα και η προσπάθεια υλοποίησης ενός τέτοιου συστήματος ανεβάζει σημαντικά το κόστος του οργάνου, ενώ επιπλέον το καθιστά ογκωδέστερο, βαρύτερο και πιο ευπαθές στις μετακινήσεις. Ο απλούστερος τρόπος για την επίτευξη φυσικής περιόδου π.χ. 1s, 2s ή μεγαλύτερης διαφαίνεται αυτή τη στιγμή να είναι η χρήση ειδικών περιστροφικών ελατηρίων, τα οποία είναι πατενταρισμένα και τα οποία από μόνα τους θα ανέβαζαν το κόστος ενός σεισμόμετρου κατά €1000 περίπου (κοστίζουν

χονδρικά €300/τεμ., απαιτούνται τρία), συν το όποιο έξτρα κόστος για την εκ θεμελίων νέα σχεδίαση μηχανικού και ηλεκτρονικού μέρους, που να είναι συμβατή με τη χρήση τους.

Με σκοπό την αποφυγή αυτού του σκοπέλου και με την ουσιώδη συμβολή του γράφοντα, πραγματοποιείται αυτή την περίοδο (φθινόπωρο 2021) εντατική ερευνητική δραστηριότητα στα εργαστήρια της εταιρίας, τα αποτελέσματα της οποίας αναμένονται με ενδιαφέρον εντός των επομένων μηνών. Τεχνικός στόχος της έρευνας είναι το γεφύρωμα του χάσματος ανάμεσα σε μια υψηλή φυσική συχνότητα ανοιχτού βρόχου (π.χ. δεκάδες Hz) και σε μια χαμηλή ελάχιστη συχνότητα καλής λειτουργίας ενός σεισμομέτρου (π.χ.  $6.25\text{mHz} = 160\text{s}$ ) με επεμβάσεις στο ηλεκτρονικό κύκλωμα (χρήση αντίστροφου φίλτρου τάξεως μικρότερης της μονάδας). Τυχόν επιτυχία σε αυτή την προσπάθεια θα προσέφερε αυτομάτως ένα σπουδαίο πλεονέκτημα της εταιρίας έναντι των ανταγωνιστών της, καθώς θα της έδινε τη μοναδική δυνατότητα (που δε θα έχουν οι άλλοι κατασκευαστές) να παράγει σεισμόμετρα υψηλών προδιαγραφών με συγκριτικά πολύ χαμηλό κόστος.

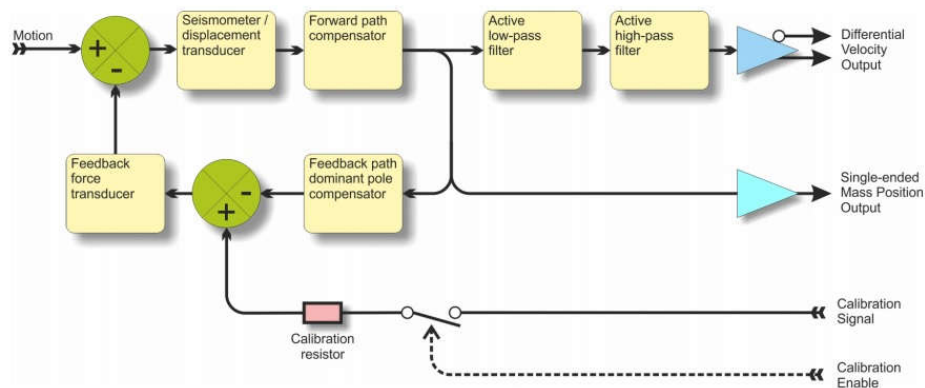
Με τον ολοκληρωτή στο βρόχο ανάδρασης ο έλεγχος είναι πλέον PID, σε αντιδιαστολή με τον PD έλεγχο που έχουμε στο αξελερόμετρο. Η σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης καθορίζει, ως προανφέρθη και το αριστερό γόνατο στην απόκριση του οργάνου. Στις πολύ χαμηλές συχνότητες το feedback καθορίζεται ουσιαστικά από τον ολοκληρωτή και λιγότερο από την αντίσταση, ενώ ο διαφορικός έλεγχος μέσω του πυκνωτή καθίσταται αμελητέος. Το αντίθετο συμβαίνει στις υψηλές συχνότητες, για τις οποίες κύριο ρόλο παίζουν ο διαφορικός και λιγότερο ο αναλογικός έλεγχος με τον ολοκληρωτή να μην επιδρά καθόλου, ενώ υπάρχει και μια συχνότητα (crossover frequency) για την οποία I και D έλεγχος αλληλο-ακυρώνονται και απομένει μόνο ο P έλεγχος μέσω της  $R_p$ .

Είναι σημαντικό να υπενθυμίσουμε σε αυτό το σημείο (βλ. και §2.4.4.6) πως η πληροφορία που καταγράφεται από τα σεισμολογικά όργανα έξω από το φάσμα συχνοτήτων που καθορίζουν οι συχνότητες αποκοπής δεν είναι άχρηστη, υπό την προϋπόθεση όμως πως η σχέση σήματος – θορύβου παραμένει ικανοποιητική (ο λόγος SNR παραμένει υψηλός). Για την ανασύνθεση του αληθινού σήματος (της κυματομορφής της δόνησης του εδάφους) και τη δημιουργία του ενεργειακού φάσματος από το σήμα που καταγράφεται μπορεί λοιπόν να ληφθούν υπόψη και συχνότητες έξω από την flat περιοχή. Για συχνότητες μεγαλύτερες του πάνω γόνατου, θα πρέπει και η συχνότητα δειγματοληψίας του digitizer να είναι αρκούντως υψηλή (τουλάχιστον τριπλάσια της συχνότητας των συνιστωσών που σκοπεύουμε να λάβουμε υπόψη). Αν π.χ. έχουμε γόνατο στα 170Hz και θέλουμε να λάβουμε υπόψη μας τις καταγραφές για έως και 250Hz, σωστό είναι να ρυθμίσουμε τον digitizer σε λειτουργία 1kHz, παρότι θεωρητικά αρκούν 500Hz (θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist - Shannon). Αν

αναφερόμαστε σε συχνότητες μικρότερες από το κάτω γόνατο ενός σεισμόμετρου θα πρέπει πρώτα να είμαστε βέβαιοι για τα επίπεδα θορύβου του οργάνου σε αυτή την περιοχή, τα οποία όμως, συνήθως, είναι απαγορευτικά για να επιτρέψουν ένα τέτοιο εγχείρημα, καθώς οι μετακινήσεις του εδάφους σε τέτοιες συχνότητες είναι εξαιρετικά ασθενείς.

### 3.1.5. Force – balance σεισμόμετρο: τοπολογία Γ

Μία υβριδική τοπολογία, που συνδυάζει στοιχεία από τις δύο προηγούμενες, βρίσκουμε στην [56]. Σε αυτήν υπάρχει το αντίστροφο φίλτρο στον κλάδο ανοιχτού βρόχου, αλλά απουσιάζει ο ολοκληρωτής από τον κλάδο ανάδρασης (Σχ. 3.5), ενώ πριν την έξοδο δεν υπάρχει ολοκληρωτής, αλλά ένα band-pass φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση μόνο των συχνοτήτων ενδιαφέροντος, δηλαδή κάτι περισσότερο αριστερά και δεξιά της flat περιοχής. Με την τοπολογία αυτή μπορούμε να φτιάξουμε σεισμόμετρο με καλές επιδόσεις, όχι όμως για πολύ μεγάλες περιόδους (μέχρι λίγες δεκάδες s).



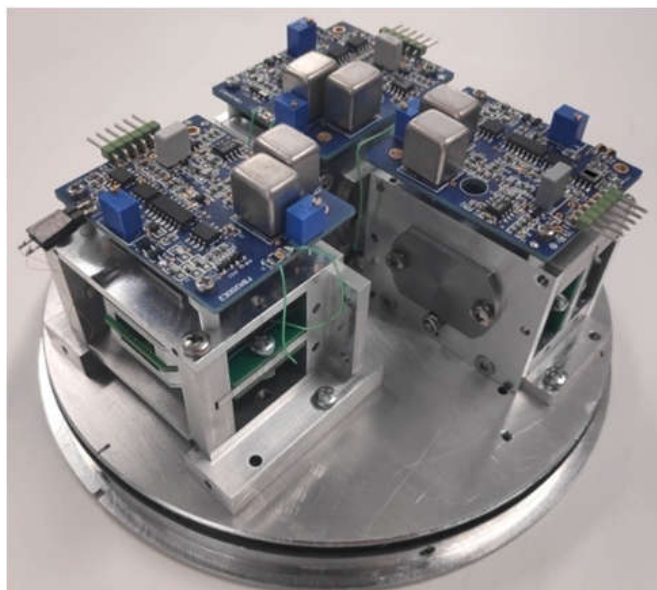
Σχ. 3.5 Υβριδική τοπολογία ελέγχου σεισμόμετρου [56].

## 3.2. Περιγραφή και θεωρητική ανάλυση της τοπολογίας που θα υλοποιηθεί

### 3.2.1. Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα επιχειρηθεί υλοποίηση μιας διάταξης σαν και αυτή που περιγράφεται στην §3.1.2, δηλαδή ένα force-balance αξελερόμετρο (FBA) με προδιαγραφές καταλληλότητας για σεισμική έρευνα. Η εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά τη ερευνητική διεργασία για τη συγγραφή των [58] και [59] με τη συμμετοχή του γράφοντος θα αξιοποιηθεί ώστε να κατασκευαστεί μια πανομοιότυπη διάταξη, με το ηλεκτρονικό μέρος

όμως να βρίσκεται όχι σε τυπωμένο κύκλωμα SMT, αλλά με DIP στοιχεία πάνω σε breadboard. Στο Σχ. 3.6 βλέπουμε το συγκεκριμένο όργανο για καταγραφή σεισμικών κυμάτων και στους τρεις άξονες. Κάθε ένας από τους τρεις αισθητήρες συνοδεύεται από δύο πλακέτες SMT. Η μία, αυτή που φαίνεται στο πάνω μέρος, με τους μετασχηματιστές μέσα σε μεταλλική θωράκιση, έχει τις λειτουργίες υψηλής συχνότητας του διαμορφωμένου σήματος (kHz). Η άλλη, είναι μικρότερη σε μέγεθος και βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πρώτη (δε φαίνεται) και έχει τις λειτουργίες που σχετίζονται με την έξοδο της διάταξης και το feedback signal, όλα στη βάση του αποδιαμορφωμένου σήματος χαμηλής συχνότητας (ως λίγες εκατοντάδες Hz) που έρχεται από την πρώτη πλακέτα. Με πράσινο μόλις που διακρίνονται οι πλακέτες που αποτελούν τους οπλισμούς του χωρητικού αισθητήρα μετατόπισης. Στο αισθητήριο που φαίνεται σε πρώτο πλάνο η κίνηση είναι κατακόρυφη για την καταγραφή της Z συνιστώσας, ενώ στα άλλα δύο έχουμε οριζόντια κίνηση για την καταγραφή των E και N συνιστωσών.



**Σχ. 3.6** Εικόνα από το εσωτερικό του οργάνου που περιγράφεται στην [58].

Στόχος της εργασίας είναι η υλοποίηση ενός μόνο αισθητηρίου για την καταγραφή μιας μόνο συνιστώσας. Είναι εις γνώσιν το γράφοντος πως η χρήση breadboard είναι πολύ πιθανό να εγείρει διάφορα απρόβλεπτα προβλήματα θορύβων ή και να μεγεθύνει κάποια άλλα που είναι ήδη γνωστά. Υπάρχει όμως και αισιοδοξία για την έκβαση του εγχειρήματος, καθώς κατά την ανάπτυξη του προϊόντος που απεικονίζεται στο Σχ. 3.6 προέκυψε πως οι

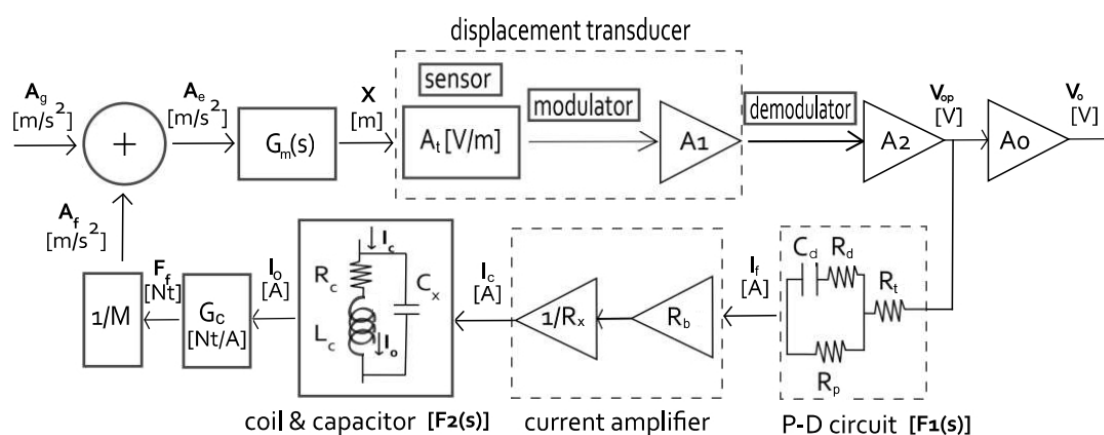
σπουδαιότεροι θόρυβοι, με μεγάλη δυσκολία στην απαλοιφή τους, προέρχονται από τις γειτονικές πανομοιότυπες μονάδες και γι' αυτό οι τρεις μονάδες χωρίζονται μεταξύ τους με φύλλα αλουμινίου (δεν υπάρχουν στην εικόνα). Το εργαστηριακό πρωτότυπο που θα αναπτυχθεί δε θα γειτνιάζει με άλλα αισθητήρια κι έτσι πιθανώς να μην αντιμετωπίζει άλλα προβλήματα με EMI απομακρυσμένης προέλευσης. Ο εσωτερικός θόρυβος που δημιουργείται από τον φορέα του σεισμικού σήματος (σε συχνότητα οπωσδήποτε μεγαλύτερη από 5kHz, θα γίνει η κατάλληλη επιλογή) φαίνεται να καταπολεμάται αποτελεσματικά με ένα παθητικό RC φίλτρο δεύτερης τάξης στον κλάδο ανοιχτού βρόχου, ενώ άλλοι θόρυβοι καταπνίγονται με κατάλληλο feedback ή αντιπαρασιτικούς πυκνωτές, κάτι τι οποίο ελπίζουμε να ισχύσει και στη δική μας περίπτωση.

### 3.2.2. Περιγραφή των επιμέρους τμημάτων μηχανικού και ηλεκτρονικού μέρους

#### 3.2.2.1. Γενική περιγραφή της τοπολογίας

Στο Σχ. 3.7 βλέπουμε το λεπτομερές μπλοκ διάγραμμα για τα αξελερόμετρο που προτείνεται να υλοποιηθεί. Αποτελείται από δύο βασικά μέρη:

- A. Το μηχανικό μέρος (το σύστημα δηλαδή μάζας – ελατηρίου).
- B. Τα ηλεκτρονικά της συσκευής και ο ηλεκτρομαγνήτης.



Σχ. 3.7 Λεπτομερές μπλοκ διάγραμμα του αξελερόμετρου που θα κατασκευαστεί [58].

Ο ηλεκτρομαγνήτης χωροθετείται κατά το ήμισυ επί του κινούμενου τμήματος, αφού τα πηνία του βρίσκονται πάνω σε αυτό. Οι μαγνήτες και το υπόλοιπο μαγνητικό κύκλωμα είναι μέρος του σταθερού πλαισίου.



Η διάταξη είναι η ίδια είτε πρόκειται για στοιχείο που καταγράφει οριζόντια συνιστώσα, είτε για κάποιο που καταγράφει την κατακόρυφη. Αυτό της κατακόρυφης είναι ίδιο με ένα οριζόντιας, όμως απλώς τοποθετείται με  $90^\circ$  κλίση. Το σύστημα μάζας ελατηρίου διαθέτει βάση που ολισθαίνει επί του μεταλλικού πλαισίου του μηχανισμού και μια κοχλίωση επιτρέπει το κεντράρισμά του στο διαθέσιμο διάκενο, είτε πρόκειται για οριζόντιο είτε για κατακόρυφο στοιχείο. Το κεντράρισμα γίνεται διά χειρός με τη χρήση του κοχλία και η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί όταν η ηλεκτρική έξοδος του αισθητήρα μετατόπισης είναι 0V.

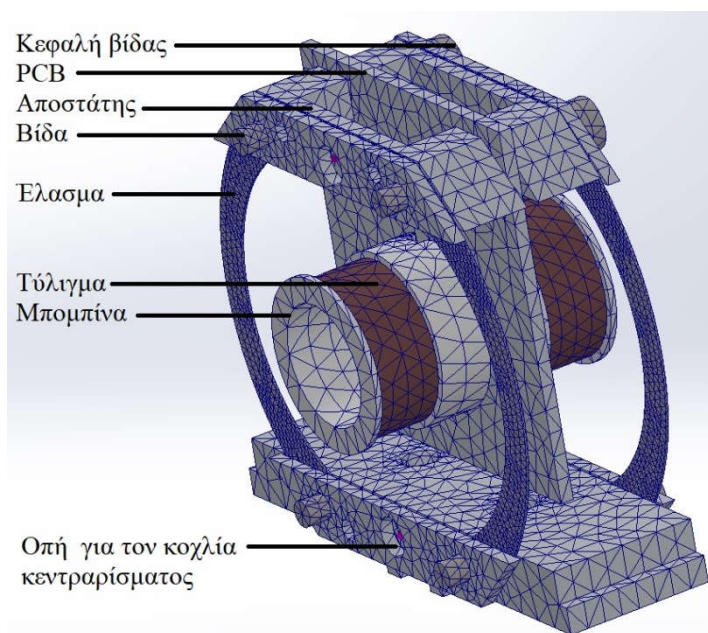
Η επιτάχυνση που εφαρμόζεται στο πλαίσιο (η επιτάχυνση του εδάφους) κατά την αξονική διεύθυνση του αξελερόμετρου (με τον όρο «άξονας» εννοούμε τη διεύθυνση ταλάντωσης της σεισμικής μάζας) προκαλεί τη μετατόπιση της σεισμικής μάζας ως προς το πλαίσιο, η οποία μετρείται από τον αισθητήρα μεταβλητής χωρητικότητας με ευαισθησία  $A_t$  [V/m]. Η έξοδος αυτού του αισθητήρα αποτελεί την είσοδο ενός προενισχυτή κέρδους  $A_I$ . Το μηχανικό μέρος υλοποιεί ένα μετατροπέα γέφυρας Blumlein, ο οποίος τροφοδοτείται από μία γεννήτρια ημιτονικού σήματος  $15V_{pp}$  και επιτυγχάνει διαμόρφωση κατά πλάτος του φορέα σύμφωνα με το σεισμικό σήμα. Αρχικά, η λειτουργία της συσκευής γινόταν με φέρουσα συχνότητα 30kHz, αλλά γρήγορα προέκυψε πως μια μέτρια μείωσή της συνοδεύεται από σειρά πλεονεκτημάτων, όπως είναι η μείωση των θορύβων και η μικρότερη κατανάλωση, χωρίς αντιθέτως να προκύπτει κάποιο μειονέκτημα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα εξεταστεί η πιθανότητα να μειωθεί κι άλλο η φέρουσα συχνότητα. Αναμενόμενο είναι συχνότητες κάτω των 5kHz να δημιουργούν προβλήματα πιστότητας στο σήμα εξόδου, καθώς ο digitizer που ακολουθεί μπορεί να δειγματοληπτεί σε έως και 1kHz. Επιπλέον, με πολύ χαμηλή φέρουσα συχνότητα αναμένεται να διευρύνεται η μη γραμμική περιοχή λειτουργίας του αισθητήρα μετατόπισης (§3.2.2.4), καθώς η εμπέδηση των μεταβλητών χωρητικοτήτων θα είναι ιδιαίτερα αυξημένη και τυχόν ασυμμετρίες θα μεγεθύνονται, ενώ ίσως να αυξάνεται και η κατανάλωση λόγω του μεγαλύτερου ρεύματος στο μετασχηματιστή.

Ο αποδιαμορφωτής, μαζί με το φίλτρο που τον ακολουθεί, δρα ως ανιχνευτής περιβάλλουσας σήματος (envelope detector) και με είσοδο το διαμορφωμένο σήμα δίνει ως έξοδο το σεισμικό σήμα.

Ο κλάδος ανάδρασης αποτελείται από ένα RC δικτύωμα και έναν ενισχυτή ρεύματος δύο σταδίων. Το ρεύμα εξόδου αυτού του ενισχυτή τροφοδοτείται προς έναν ηλεκτρομαγνήτη με δύο πηνία εν σειρά συνδεδεμένα και σταθερά μετατροπής  $G_c$  [N/A]. Έτσι, με τον ηλεκτρομαγνήτη να δημιουργεί τη δύναμη την απαραίτητη για να αντισταθμιστεί η αδρανειακή δύναμη που εκτρέπει τη σεισμική μάζα από τη ΘΙ, ολοκληρώνεται ο κλειστός βρόχος του συστήματος.

### 3.2.2.2. Ο μηχανισμός σεισμικής μάζας – ελατηρίου

Ο σεισμική μάζα του αξελερόμετρου αποτελείται από την κεντρική κινητή πλάκα του αισθητήρα μετατόπισης, τα πηνία που είναι προσκολλημένα πάνω της, καθώς και κάποια μικρά μεταλλικά εξαρτήματα (αλουμινένια) (Σχ.3.8). Τα εξαρτήματα αυτά εξυπηρετούν δύο σκοπούς. Ο βασικός τους ρόλος είναι αυτός της στήριξης της πλάκας πάνω στα ελατήρια, ενώ λειτουργούν παράλληλα ως αποστάτες που τα διατηρούν σε κάποια απόσταση (λίγα mm) από αυτή, ώστε να είναι δυνατή η ταλάντωση. Η αύξηση της σεισμικής μάζας κατά τι είναι ο άλλος, καθώς, για να βελτιώσουμε τις επιδόσεις θορύβου του οργάνου, δε θέλουμε αυτή να είναι πάρα πολύ μικρή.



**Σχ. 3.8** Snapshot από το περιβάλλον του SolidWorks, στο οποίο εμφανίζεται το σύστημα μάζας – ελατηρίου και η διαίρεση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία. Σημειώνονται επίσης διάφορα εξαρτήματα.

Στα σεισμόμετρα εκείνα που ενσωματώνουν έναν παρόμοιο μηχανισμό στήριξης της σεισμικής μάζας, καθώς η μάζα είναι ήδη πολλές δεκάδες γραμμάρια, τα δυο - τρία περίπου γραμμάρια που προστίθενται με αυτά τα εξαρτήματα δεν κάνουν σπουδαία διαφορά και έτσι, για λόγους μείωσης του κόστους, αυτά μπορεί και να είναι πλαστικά (ειδικό πλαστικό που δεν πολυμερίζεται με τα χρόνια). Αν αντιθέτως θεωρείται κρίσιμης σημασίας η όσο γίνεται μεγαλύτερη μάζα, θα είναι μπρούτζινα, όπως και η υπόλοιπη σεισμική μάζα στο σεισμόμετρο. Επειδή όλα αυτά (ελάσματα, σεισμική μάζα, αποστάτες) πιάνονται μαζί με μεταλλικές βίδες (αναλόγως, αλουμινένιες ή μπρούτζινες), φροντίζεται ώστε να μην υπάρξει

επαφή διαφορετικών μετάλλων (π.χ. μπρούτζος με αλουμίνιο) για την αποφυγή φαινομένων οξειδωσης (τα ανοξειδωτα ελάσματα δεν έχουν τέτοιο πρόβλημα).

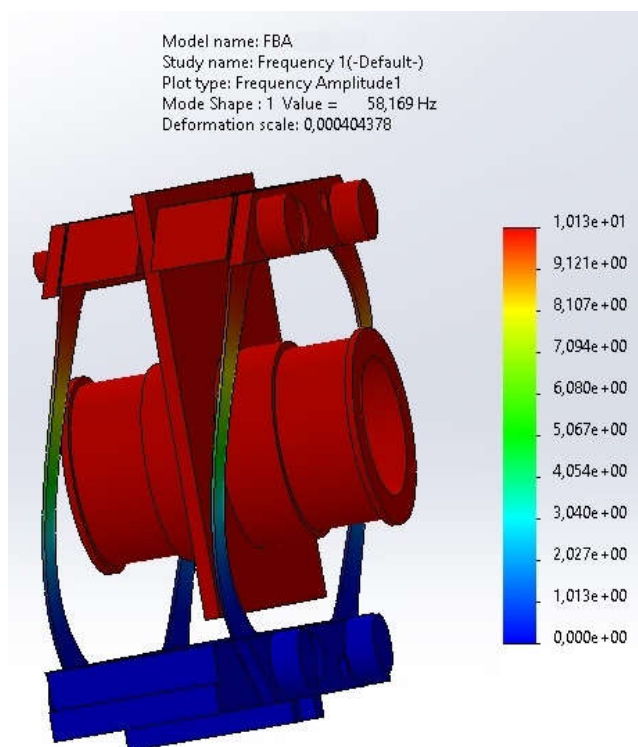
Η γεωμετρία του εκκρεμούς με άκαμπτο βραχίονα (τοποθέτηση με τη μάζα προς τα κάτω, προς τα πάνω ή προς άλλη διεύθυνση) χρησιμοποιείται ευρέως σε εμπορικά και αυτοσχέδια όργανα, αλλά, ως είναι αναμενόμενο, παρουσιάζει μη γραμμική απόκριση [50]. Το γεγονός αυτό σημαίνει στην πράξη πως το error signal του συστήματος (δηλαδή τελικά η απόκλιση της σεισμικής μάζας από τη ΘΙ) πρέπει να είναι πολύ μικρό για να αποφευχθεί η παραμόρφωση της καταγραφής. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξησης της σταθεράς  $G_c$ , φτιάχνουμε δηλαδή πιο ισχυρό ηλεκτρομαγνήτη, κάτι το οποίο όμως δυστυχώς έρχεται σε σύγκρουση με την απαίτηση για αυξημένη ευαισθησία. Ο σένσορας, που θα χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα εργασία, υλοποιεί μια γεωμετρία γραμμικής ταλάντωσης που σε μεγάλο βαθμό αμβλύνει το πρόβλημα αυτό των συστημάτων εκκρεμούς.

Το μηχανικό σύστημα έχει επανασχεδιαστεί και έχει βελτιωθεί αρκετές φορές με βασικό εργαλείο σε αυτή τη διαδικασία το λογισμικό SolidWorks της Dassault. Στους τελευταίους γύρους αυτής της μελέτης σημαντική ήταν και η συμβολή του γράφοντος. Με αξιοποίηση της υπάρχουσας εμπειρίας πάνω σε άλλο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (Opera της Vector Fields), αλλά και με ουσιώδη καθοδήγηση από συνεργάτες της εταιρίας στο Εργαστήριο Υπολογισμού και Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Αεροναυπηγικής του Παν/μίου Πατρών, κατέστη δυνατή η πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του πανίσχυρου αυτού εργαλείου για τους σκοπούς της έρευνας που αποτυπώνεται στις [58] και [59]. Κατά τις εξομοιώσεις το πλήθος των τετράεδρων στοιχείων διατηρήθηκε σε περίπου 45000 (Σχ. 3.8). Το πλήθος αυτό είναι απότοκος της στρατηγικής σχεδιασμού που θέλει πολλά στοιχεία (πυκνό πλέγμα) στα ελατήρια που παραμορφώνονται και αραιό πλέγμα στις υπόλοιπες δομές και είναι αρκετά μικρό ώστε να εξασφαλίζεται ένας αποδεκτός χρόνος εξομοίωσης με ένα κοινό PC (γενικά δεν υπερέβαινε το ένα τέταρτο της ώρας).

Σύμφωνα με τη διερεύνηση που έγινε μέσω παραμετρικής ανάλυσης, το ελλειψοειδές σχήμα για τα ελάσματα είναι το βέλτιστο. Με αφαίρεση υλικού από το βασικό σχέδιο ελάσματος καταφέραμε να έχουμε τρεις διαφορετικές εκδοχές, με τη σταθερά ελατηρίου για το πιο μαλακό να είναι κάποιες εκατοντάδες N/m και για το πιο σκληρό περίπου τριπλάσιο (αναφερόμαστε σε ζεύγος ελασμάτων). Αυτό βοηθάει στο να γίνονται διάφορες δοκιμές. Για παράδειγμα, για τα σεισμόμετρα της εταιρίας πλέον χρησιμοποιείται το πιο μαλακό από τα τρία, επιλογή που μείωσε αισθητά τη φυσική τους συχνότητα. Για το τελικό σχέδιο του αξελερόμετρου η συχνότητα ελεύθερης οριζόντιας ταλάντωσης υπολογίστηκε με το

SolidWorks στα 58.2Hz, ενώ πειραματικά προσδιορίστηκε στα 58.4Hz. Σημαντικό να αναφερθεί εδώ πως η απόκλιση μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος εμπίπτει στα περιθώρια λάθους τη υπολογιστικής μεθόδου, καθώς διαφοροποιήσεις στις επιλογές δημιουργίας του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων δημιουργούσαν και διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα της τάξης (τυπικά) του 1%. Το υλικό των ελασμάτων είναι ανοξείδωτος χάλυβας, που συνήθως χρησιμοποιείται για ελάσματα μετασχηματιστών.

Στο Σχ. 3.9 υπάρχει μια τρισδιάστατη απεικόνιση από το περιβάλλον του SolidWorks με το μηχανικό σύστημα εκτός της θέσης ισορροπίας του για τον πρώτο του κανονικό τρόπο ταλάντωσης. Η χρωματική κλίμακα περιγράφει την απόκλιση (από τη ΘΙ) σε mm, αλλά επί της ουσίας βοηθάει μόνο στο να καταλάβει κανείς τη σχετική μετατόπιση μεταξύ των διαφόρων τμημάτων της όλης γεωμετρίας. Τα 10mm της μέγιστης μετατόπισης που εμφανίζονται στο σχήμα τα έχει επιλέξει ο χρήστης, ώστε στην απεικόνιση να γίνεται σαφής η γεωμετρία της ταλάντωσης. Το μέγιστο μιας πραγματικής ταλάντωσης θα εξαρτηθεί από τις δυνάμεις παραμόρφωσης που ασκούνται και δε θα είναι παρά κλάσμα του mm. Πέρα από την παρουσιαζόμενη γραμμική ταλάντωση υπάρχουν και άλλοι κανονικοί τρόποι ταλάντωσης, οι οποίοι όμως αντιστοιχούν σε ιδιοσυχνότητες αρκετά έξω από τη μπάνα

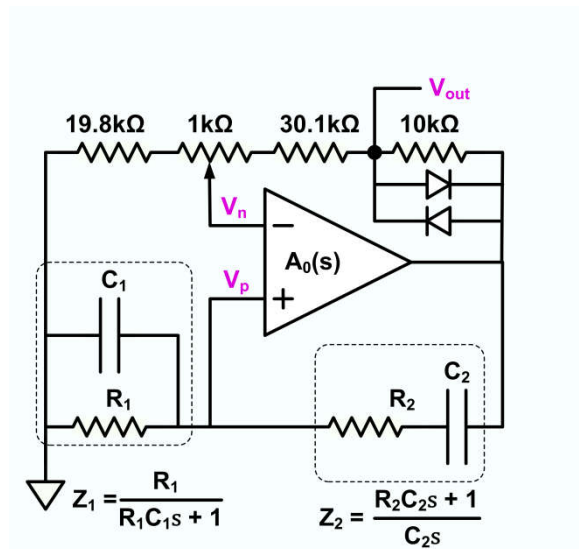


Σχ. 3.9 3D απεικόνιση του συστήματος μάζας – ελατηρίου στον πρώτο κανονικό τρόπο ταλάντωσης [58]. Η χρωματική κλίμακα για τη μετατόπιση είναι σε mm.

ενδιαφέροντος. Ο δεύτερος κανονικός τρόπος ταλάντωσης (περιστροφή του συστήματος περί τον κατακόρυφο άξονα, έτσι όπως φαίνεται στην εικόνα) αντιστοιχεί σε ιδιοσυχνότητα 515Hz.

### 3.2.2.3. Γεννήτρια υψηλής συχνότητας

Ως γεννήτρια ημιτονικού υψίσυχνου σήματος για τη δημιουργία της φέρουσας συχνότητας  $f_c$  (στην παρούσα εργασία είναι  $f_c=11.2\text{kHz}$ , βλ. §3.3.2.2) χρησιμοποιείται μια τυπική διάταξη ταλαντωτή γέφυρας Wien με αυτόματο έλεγχο κέρδους (Σχ. 3.10). Η έξοδος της γέφυρας έχει τάση με πλάτος  $2.6V_{pp}$  και μεταφέρεται στην είσοδο ενός διαφορικού ενισχυτή. Η έξοδος του ενισχυτή τροφοδοτεί έναν audio μετασχηματιστή (Μ/Σ) με μεσαία λήψη στο δευτερεύον. Με τη μεσαία λήψη συνδεδεμένη στη γη, το δευτερεύον οδηγεί τις δύο πλάκες του αισθητήρα μετατόπισης μεταβλητής χωρητικότητας με τα δύο σήματα να βρίσκονται σε

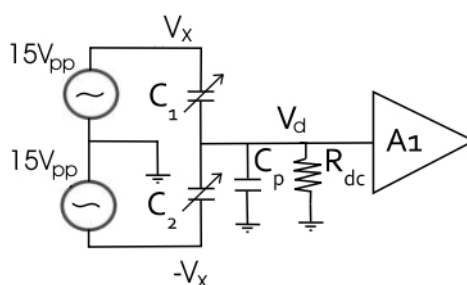


Σχ. 3.10 Μια τοπολογία γέφυρας Wien που χρησιμοποιεί διόδους για τον περιορισμό του πλάτους ταλάντωσης. Η συγκεκριμένη τοπολογία δίνει ένα σήμα με THD < 5% [55].

διαφορά φάσης  $180^\circ$  και με πλάτος  $15V_{pp}$  έκαστο (συνεπώς, η peak-to-peak τάση από πλάκα σε πλάκα είναι 30V) (Σχ. 3.11).

### 3.2.2.4. Αισθητήρας μετατόπισης της σεισμικής μάζας

Ο ρόλος αυτού του χωρητικού μετατροπέα είναι ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης της σεισμικής μάζας και συνεπώς πρέπει να μπορεί να μετράει τη γραμμική μετατόπιση με πολύ μεγάλη ακρίβεια, της τάξης του nm. Ως γνωστόν, η χωρητικότητα για ένα ζεύγος όμοιων, επίπεδων και παράλληλων αγωγίμων πλακών είναι:



Σχ. 3.11 Ισοδύναμο κύκλωμα του αισθητήρα μετατόπισης [58].

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (3.1)$$

όπου  $A$  είναι το εμβαδό των πλακών,  $d$  είναι η μεταξύ τους απόσταση και  $\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12}$  F/m η διηλεκτρική σταθερά του κενού. Η σχέση αυτή ισχύει με πολλή καλή ακρίβεια όταν η απόσταση  $d$  είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με τις μεγάλες διαστάσεις των δύο πλακών, κάτι το οποίο ισχύει στην περίπτωση μας για οποιαδήποτε θέση της κινούμενης πλάκας (σε διαφορετική περίπτωση των πεδίο παρυφής διακένου (fringing field) πρέπει να ληφθεί υπόψη και η (3.1) δεν ισχύει). Στην προκειμένη περίπτωση δημιουργούνται δύο όμοιοι πυκνωτές με την τοποθέτηση δύο ακίνητων πλακών και μιας τρίτης κινούμενης στο μέσον του ενδιαμέσου χώρου. Το ρόλο των αγώγιμων πλακών αναλαμβάνουν μικρά, ορθογώνιου σχήματος κομμάτια πλακέτας για τυπωμένο κύκλωμα (PCB) δύο επιπέδων. Η χωρητικότητες των δύο πυκνωτών είναι:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 A}{d_1} \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 A}{d_2} \quad (3.2)$$

όπου  $d_1 = d_2 = 0.50 \text{ mm} = d$  στη ΘΙ και  $A = 340 \text{ mm}^2$ , από τα οποία προκύπτει  $C_1 = C_2 = 6.0 \text{ pF} = C_0$ . Η εναλλασσόμενη τάση  $V = 2V_x$  ( $30 \text{ V}_{pp}$ ) εφαρμόζεται ανάμεσα στις δύο ακίνητες πλάκες Β και C (Σχ. 3.1) και έξοδος του αισθητήρα είναι η διαφορά ανάμεσα στις τιμές τάσης που αντιστοιχούν στους δύο πυκνωτές, δηλαδή, επί της ουσίας, πρόκειται για έναν χωρητικό διαιρέτη τάσης. Με μία μετατόπιση  $x$  του μεσαίου οπλισμού οι δύο χωρητικότητες γίνονται:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 A}{d-x} \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 A}{d+x} \quad (3.3)$$

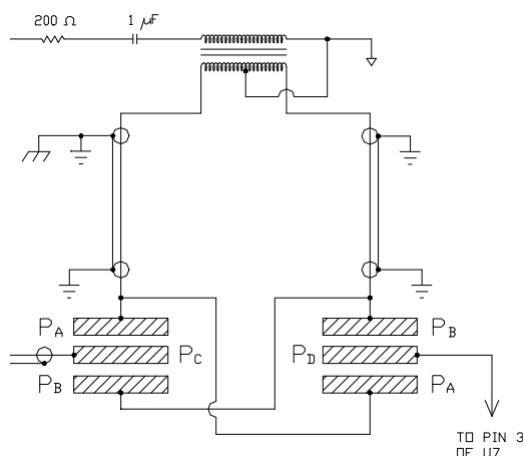
Με την (3.3) ως σημείο εκκίνησης προκύπτει πως η τάση εξόδου του αισθητήρα είναι:

$$V_d = \frac{V}{2} \cdot \frac{x}{d} \quad (3.4)$$

Από την (3.4) γίνεται σαφές πως, πέρα από την όποια βαθμίδα ενίσχυσης που ενδεχομένως ακολουθεί, για να αυξηθεί η ευαισθησία του σένσορα αυτού καθεαυτού θα πρέπει είτε να αυξηθεί η τάση της εφαρμοζόμενης φέρουσας συχνότητας είτε να μειωθεί το διάκενο ανάμεσα στους οπλισμούς των πυκνωτών, ενώ το ακριβές εμβαδό τους δεν έχει σημασία. Πιο σωστά μάλλον, η σημασία του εμβαδού των οπλισμών περιορίζεται στην προϋπόθεση που προαναφέρθηκε, να είναι δηλαδή το διάκενο αρκούντως μικρό σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις, καθώς και στον αρνητικό αντίκτυπο που έχει η αύξηση του εμβαδού στο θόρυβο Brown. Στην περίπτωση μας αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης δεν είναι εφικτή, καθώς ήδη το επίπεδό της ταυτίζεται με την τάση τροφοδοσίας. Η μείωση του διακένου εξάλλου επίσης δεν είναι απλή υπόθεση, καθώς ήδη τα 0.50mm δημιουργούν σειρά προβλημάτων κατά τη διαδικασία σωστού κεντραρίσματος της μεσαίας πλάκας (τελευταία γίνεται μια προσπάθεια να αυτοματοποιηθεί αυτή η εργασία). Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως τα 340mm<sup>2</sup> είναι προσεγγιστικά το εμβαδό της αγωγίμης επιφάνειας, καθώς στο μεσαίο οπλισμό έχουν γίνει κάποιες οπές για να μειωθεί η αντίσταση του αέρα κατά την κίνηση της σεισμικής μάζας αλλά και ο θόρυβος Brown. Δηλαδή στην πραγματικότητα η  $C_0$  είναι κατά τι διαφορετική από τα 6rF που υπολογίσαμε παραπάνω.

Μία σχεδιαστική επιλογή για μεγαλύτερη ευστάθεια του κυκλώματος, που όμως δεν εφαρμόζεται στην περίπτωση μας, είναι ο διαχωρισμός και των τριών οπλισμών σε δύο ίδια αγωγή μέρη και η δημιουργία έτσι δύο ανεξάρτητων μεταβλητών πυκνωτών με τις δύο πλέον εξόδους των οποίων να οδηγούνται σε έναν διαφορικό ενισχυτή μέσω μιας bootstrap σύνδεσης. Στο Σχ. 3.12 βλέπουμε παραστατικά αυτή τη σχεδίαση.

Να σημειωθεί πως όλα τα μεταλλικά μέρη φτάνουν στην εταιρία από το εξωτερικό έτοιμα, κομμένα με CNC και παρουσιάζουν κάποιο τζόγο σε όλες τις γραμμικές τους διαστάσεις. Μείωση αυτού του τζόγου κατά την παραγγελία τους σημαίνει σημαντική αύξηση του κόστους και του χρόνου παράδοσής τους. Τυχόν κακό φινίρισμά των μεταλλικών εξαρτημάτων αντιμετωπίζεται με διά χειρός λείανση. Μετά και από την προσπάθεια λοιπόν κεντραρίσματος της σεισμικής μάζας στο μέσον μεταξύ των δύο σταθερών οπλισμών ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα αστάθειας της όλης διάταξης οφειλόμενα σε τζόγους μεγαλύτερους του συμφωνημένου, κακό φινίρισμα καθώς και στην ευπλασία του μετάλλου



Σχ. 3.12 Χωρητικός σένσορας μετατόπισης, χωρισμένος σε δύο ίδια τμήματα σε σύνδεση bootstrap [48].

(αλουμίνιο), που το καθιστά ευαίσθητο στην άσκηση πιέσεων (π.χ. κατά το βίδωμα στήριξης στη βάση) ή σε συστολές – διαστολές. Τα προβλήματα αυτά συχνά βρίσκουν προσωρινές λύσεις μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης (ρυθμίσεις κέρδους, προσθήκη φίλτρων), αλλά καθίσταται απαραίτητη η συνεχής βελτίωση των προϊόντων μέσω επανασχεδιασμού και επιλογής νέων κραμάτων για τα εξαρτήματα με στόχο την αύξηση της στιβαρότητάς τους. Έτσι, έρχεται κάθε δυο χρόνια (χονδρικά) μια νέα βερσιόν ενός οργάνου με βελτιώσεις τόσο στο ηλεκτρονικό όσο και στο μηχανικό μέρος, οι οποίες πολλές φορές δε γίνονται καν αντιληπτές από τους χρήστες (εκτός κι αν αναφερόμαστε σε βελτιώσεις των επιδόσεων οι οποίες αποτυπώνονται στον κατάλογο), παρά μόνο από την εταιρία, καθώς μειώνουν τις (εξαιρετικά σπάνιες) περιπτώσεις που όργανα επιστρέφουν πίσω για επισκευή - ρύθμιση. Σε κάποιες περιπτώσεις, αντί μιας χρονοβόρας και κοστοβόρας επισκευής, έπειτα από συνεννόηση, μπορεί να αποσταλλεί στον πελάτη ολοκαίνουργιο το νέο, βελτιωμένο προϊόν, χωρίς κανένα έξτρα κόστος.

Κλείνοντας αυτή την παράγραφο πρέπει να σημειώσουμε πως η πλέον σύγχρονη μέθοδος για τη μέτρηση μεταβολών της μετατόπισης σε σεισμολογικά όργανα με πολύ υψηλή ευαισθησία βασίζεται σε συμβολόμετρα λέιζερ (π.χ. [49]). Η επιλογή αυτή όμως ανεβάζει σημαντικά το κόστος και δεν προτιμάται για όργανα που πρόκειται να κατασκευαστούν σε μαζική παραγωγή.

### 3.2.2.5. Ηλεκτρονικό κύκλωμα του αισθητήρα μετατόπισης

Ο αισθητήρας μετατόπισης ακολουθείται από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που σκοπό έχει να ενισχύσει την τάση εξόδου του, όπως αυτή προκύπτει έπειτα από τη μετατόπιση της

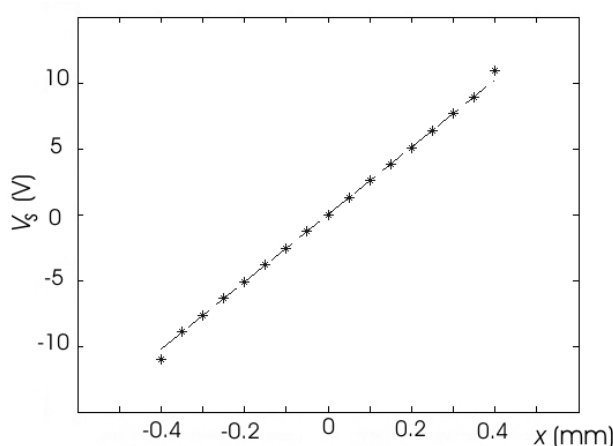


σεισμικής μάζας (άρα και του μεσαίου οπλισμού που είναι μέρος της) από τη ΘΙ και τη συνεπακόλουθη μεταβολή στις χωρητικότητες των δύο μεταβλητών χωρητικότητων. Για το σκοπό αυτό υλοποιείται μια ενισχυτική βαθμίδα δύο σταδίων (ο  $A_I$  στα Σχ. 3.1 και Σχ 3.7). Περιέχει ένα FET και ένα διπολικό τρανζίστορ σε κασκαδική σύνδεση (cascode amplifier) και έναν ακολουθητή που αυξάνει περεταίρω το κέρδος. Το ισοδύναμο κύκλωμα του συνδυασμού σένσορα και προενισχυτή είναι αυτό που απεικονίζεται στο Σχ. 3.11. Την όλη διάταξη του  $A_I$  τη θεωρούμε ως έναν ιδανικό ενισχυτή, θεωρούμε δηλαδή πως λόγω της πολύ μεγάλης εμπέδησης εισόδου του (ιδανικά θα πρέπει να είναι αρκετά MΩ) το ρεύμα εισόδου σε αυτόν είναι περίπου μηδενικό. Ο λόγος που επελέγη αυτή η τοπολογία (τυπικός προενισχυτής για HF ραδιοφωνική λήψη) είναι πως σε αυτή την πολύ ευαίσθητη βαθμίδα του κυκλώματος είναι σημαντικό να υπάρχει πάρα πολύ μεγάλη εμπέδηση εισόδου και πολύ μικρή ευαισθησία σε θορύβους. Η τελευταία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ειδικής ανάδρασης εντός του  $A_I$ . Η παρασιτική χωρητικότητα  $C_p$ , που αναπόφευκτα υφίσταται μεταξύ του μεσαίου οπλισμού του αισθητήρα (και του αγωγού που τον συνδέει με τον  $A_I$ ) και της γης, δεν παραμορφώνει το κατά πλάτος διαμορφωμένο (AM) σήμα, παρά μόνο μειώνει ελαφρώς το κέρδος του αισθητήρα κάνοντάς το κατά τι μικρότερο από αυτό που υπολογίζεται με την (3.4). Η τιμή της μπορεί να είναι μη αμελητέα συγκριτικά με εκείνες μεταξύ των οπλισμών του αισθητήρα, καθώς τα μεταλλικά μέρη του αισθητήρα είναι γειωμένα και το ίδιο ισχύει για το τυχόν περίβλημα θωράκισης περί τον αγωγό που μεταφέρει το σήμα στην επόμενη βαθμίδα. Η θωράκιση αυτή, αν και γενικά κρίνεται απαραίτητη για να προστατέψει το σήμα από εισερχόμενες παρεμβολές (όπως π.χ. απεικονίζεται στο Σχ. 3.12), στο εμπορικό προϊόν απουσιάζει λόγω της δυσκαμψίας που προκαλεί στον αγωγό, δυσχεραίνοντας έτσι την ελεύθερη κίνηση της κινητής πλάκας του αισθητήρα στην οποία καταλήγει η μία άκρη του. Η αντίσταση  $R_{dc}$  θέτει το δυναμικό στον κόμβο  $V_d$  κοντά στο μηδέν [51] και για την τιμή της ισχύει πως πρέπει:

$$R_{dc} \gg \frac{1}{2\pi C_0 f_c} \quad (3.5)$$

Με αντικατάσταση των τιμών στο β' μέλος ( $C_0=6\text{pF}$ ,  $f_c=15\text{kHz}$ ) της ανίσωσης προκύπτει  $R_{dc} \gg 1.7\text{M}\Omega$ . Η τιμή που τελικά επιλέγεται (έπειτα και από μερικές δοκιμές) είναι  $2\text{-}3\text{M}\Omega$ . Παρότι αυτή δεν είναι «πολύ μεγαλύτερη» από τα  $1.7\text{M}\Omega$ , μεγαλύτερη τιμή οδηγεί σε αυξημένο θερμικό θόρυβο Johnson περιορίζοντας τη διακριτική ικανότητα του όλου συστήματος μέτρησης της μετατόπισης.

Η συνολική ευαισθησία για το σύστημα αισθητήρας – cascode amplifier – ακολουθητής μετρήθηκε με ακρίβεια στα 25500V/m. Αυτή η τιμή ισχύει στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής τιμών της μετατόπισης  $x$  (0 – 0.50mm). Όταν  $x \rightarrow d$  η ευαισθησία εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένη. Στο Σχ. 3.13 βλέπουμε το γράφημα της ευαισθησίας του αισθητήρα μετατόπισης (τάση εξόδου  $V_s$  έναντι της μετατόπισης  $x$ ) όπως προέκυψε από τις μετρήσεις. Ο ακριβής καθορισμός της μετατόπισης προκειμένου να γίνουν οι μετρήσεις επετεύχθη με χρήση φίλερ ελασμάτων μέτρησης διακένου, που τοποθετούνταν προσεκτικά στα άκρα του διακένου ώστε ούτε να επηρεάζεται η χωρητικότητα του πυκνωτή, αλλά ούτε και να υπάρχει πιθανότητα βραχυκύκλωσης των δύο οπλισμών. Είναι εμφανής στο γράφημα η γραμμική συσχέτιση μεταξύ μετατόπισης και τάσης εξόδου στην περιοχή  $|x| < 0.35\text{mm}$ . Βέβαια, σε λειτουργία κλειστού βρόχου, δεν υπάρχουν πραγματικές συνθήκες λειτουργίας που να εκτρέπουν τη σεισμική μάζα τόσο μακριά από τη ΘΙ. Ειδικότερα, λαμβάνοντας υπόψη κάποια δεδομένα που θα παρουσιαστούν λίγο παρακάτω (§3.2.3), προκύπτει πως με τη μέγιστη επιτάχυνση εδάφους 4g που μπορεί να μετρήσει το εμπορικό προϊόν φτάνοντας στο clip level, η μετατόπιση είναι μόλις 0.045mm.



Σχ. 3.13 Ευαισθησία του χωρητικού αισθητήρα μετατόπισης (τάση  $V_s$  έναντι της μετατόπισης  $x$ ) [58].

### 3.2.2.6. Αποδιαμορφωτής και προενισχυτής σήματος

Για την αποδιαμόρφωση του σήματος που έρχεται από τον αισθητήρα μετατόπισης επιλέγεται ένας C-MOS διακόπτης σε ολοκληρωμένο κύκλωμα, ο οποίος, μέσω ειδικού ακροδέκτη εισόδου, συγχρονίζεται με τη φέρουσα συχνότητα και η έξοδός του τροφοδοτεί έναν ενισχυτή με ΤΕ. Μεταξύ του αποδιαμορφωτή και του ενισχυτή παρεμβάλλεται ένα low

pass φίλτρο μονού πόλου (άρα κόβει με 20dB/dec) με συχνότητα αποκοπής τα 350Hz. Ρόλος του φίλτρου είναι η εκκαθάριση της φέρουσας συχνότητας από το χρήσιμο σήμα. Καθώς στην πράξη προκύπτει πως η απόρριψη της φέρουσας συχνότητας έχει περιθώρια βελτίωσης, είναι μια ευκαιρία να δοκιμαστεί στην παρούσα εργασία η αντικατάσταση του φίλτρου πρώτης τάξης με ένα δεύτερης τάξης (40dB/dec).

Ας σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως το ολοκληρωμένο που εκτελεί την αποδιαμόρφωση είναι μια από τις πιο σπουδαίες πηγές θορύβου στο όλο κύκλωμα. Άλλες πηγές είναι κάποιες αντιστάσεις της τάξης των ολίγων MΩ (θερμικός θόρυβος), το πηνίο του ηλεκτρομαγνήτη (θερμικός θόρυβος και EMI που απορροφάται), καθώς και ο M/Σ που τροφοδοτεί τις πλάκες του αισθητήρα με υψίσυχο σήμα (εκπομπή EMI). Για τις δυο τελευταίες λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα, ήτοι αντιπαρασιτικός πυκνωτής για το πηνίο και μεταλλική θωράκιση για τον M/Σ (όπως είδαμε και στην εικόνα του Σχ. 3.6).

### 3.2.2.7. Κλάδος ανάδρασης

Ένα δίκτυο R-C αποτελούμενο από τα στοιχεία  $R_p$ ,  $R_d$ ,  $C_d$  και  $R_t$  (Σχ. 3.7) καθορίζει το ρεύμα ανάδρασης προς τον ηλεκτρομαγνήτη. Ο κλάδος ανάδρασης είναι ο παράλληλος συνδυασμός στοιχείων αναλογικού ( $R_t$ ,  $R_p$ ) και διαφορικού ( $R_d$ ,  $C_d$ ) ελέγχου (PD έλεγχος). Σύμφωνα με τις γνωστές μας αρχές από την ανάλυση των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου η απόσβεση του συστήματος σε βηματική είσοδο καθορίζεται από τα P στοιχεία, ενώ ο περιορισμός του overshoot από τα D στοιχεία. Το ρεύμα εξόδου του R-C δικτύωματος ενισχύεται από έναν ενισχυτή ρεύματος, ο οποίος οδηγεί τα δύο εν σειρά συνδεδεμένα πηνία του ηλεκτρομαγνήτη. Τα δύο πηνία αλληλεπιδρούν με δύο μόνιμους μαγνήτες υλικού N45 προσφέροντας μια συνολική σταθερά μετατροπής  $G_c=19\text{N/A}$ . Η μαγνητική διαδρομή στις δύο πλευρές κλείνει μέσα από δυο σιδερένιες πλάκες που πλαισιώνουν τον όλο μηχανισμό.

Το κάθε πηνίο έχει κάποιες εκατοντάδες σπείρες πολύ ψιλού σύρματος, ενώ εξετάζεται το ενδεχόμενο να χρησιμοποιηθεί πιο χονδρό, με παράλληλη μείωση των σπειρών όμως, ώστε να χωράει το όλο τύλιγμα στη μπομπίνα. Δεν πρέπει να ξεχνάμε πως αν θέλουμε να διατηρήσουμε την ίδια  $G_c$  [N/A] θα πρέπει μείωση των σπειρών να συνοδεύεται από αύξηση του κέρδους στον ενισχυτή ρεύματος. Το πιο χονδρό σύρμα προσφέρει ευκολία στην τύλιξη, καθώς αυτή γίνεται στο χέρι και το σύρμα συχνά κόβεται. Εταιρία που αναλαμβάνει να τυλίξει τόσο λεπτά σύρματα σε τόσο μικρές μπομπίνες και μάλιστα με ομοιόμορφη τύλιξη, σχεδόν σε στρώσεις, για μικρότερο πάχος τυλίγματος, κοστολογεί αυτή την εργασία με αρκετά ευρώ ανά τεμάχιο.

### 3.2.3. Συνάρτηση μεταφοράς

#### 3.2.3.1. Γενικά

Η συνάρτηση μεταφοράς (ΣΜ)  $G(s)$  του αξελερόμετρου στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας είναι πολύ σημαντική για την κατανόηση της εσωτερικής του δομής και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς λειτουργίας του υπό διάφορες συνθήκες. Για παράδειγμα, οι μιγαδικές συχνότητες των πόλων, αυτές δηλαδή για τις οποίες, θεωρητικά, η έξοδος λαμβάνει άπειρο πλάτος, μας βοηθούν να εξηγήσουμε κάποιους ανεπιθύμητους συντονισμούς που παρατηρούμε στην πράξη. Έτσι, αφού εντοπίσουμε το πρόβλημα, μπορούμε να φιλτράρουμε αυτές τις συχνότητες και να τις κρατήσουμε εκτός του κλειστού βρόχου, ενώ αν αυτό δεν είναι εφικτό ή δεν είναι επιθυμητό οι πόλοι λαμβάνονται υπόψιν στην επεξεργασία των δεδομένων εξόδου, όπως είδαμε π.χ. με τα .resp files στην §2.4.4.6. Όσον αφορά στα αξελερόμετρα, η ΣΜ (DC απόκριση, πόλοι και μηδενικά) χρησιμοποιούνται για να σχεδιαστεί το διάγραμμα μέτρου – φάσης της  $G(s)$  και για την ανασύνθεση της αληθινής δόνησης μέσω αποσυνέλιξης στα δεδομένα εξόδου [52].

Η ΣΜ  $G(s)$  μπορεί να προκύψει θεωρητικά αν έχουμε λεπτομερείς πληροφορίες για όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν το όργανο. Σε αυτή τη διεργασία πάντα υπάρχουν διάφορα μη γραμμικά ή μη ιδανικά στοιχεία τα οποία εσκεμμένα, προκειμένου να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς, θεωρούμε γραμμικά ή ιδανικά. Συνεπώς, η τελικώς εξαχθείσα ΣΜ πρέπει πάντα να επαληθεύεται πειραματικά. Αυστηρά ομιλώντας, η όποια ΣΜ θα ισχύει για συγκεκριμένο εύρος των πεδίων τιμών των διαφόρων παραμέτρων, όπως είναι π.χ. η θερμοκρασία. Αν η θερμοκρασία μεταβληθεί πέρα από κάποιο όριο, είναι τόσα πολλά τα χαρακτηριστικά που αλλάζουν στο μηχανικό και στο ηλεκτρονικό μέρος, που η συμπεριφορά του οργάνου αναμένεται αρκετά διαφορετική.

Σύμφωνα με μια κοινή προσέγγιση που συναντάμε συχνά στη βιβλιογραφία, όπως π.χ. στις [53] και [54], κρίνοντας από τη θέση κάποιων στοιχείων στις μαθηματικές εξισώσεις και από τις σχετικές τιμές αυτών ως προς άλλες ποσότητες, γίνονται διάφορες απλοποιήσεις πριν την εξαγωγή της τελικής έκφρασης για τη ΣΜ. Αντίθετα με αυτή την προσέγγιση, η μέθοδος που θα παρουσιαστεί στις επόμενες γραμμές λαμβάνει υπόψιν της όλες τις εμπλεκόμενες παραμέτρους και τυχόν απλοποιήσεις θα γίνουν επί τη βάση της τελικής έκφρασης που θα προκύψει.

### 3.2.3.2. Ανοιχτός βρόχος

Το μπλοκ διάγραμμα του αξελερόμετρου είναι αυτό που παρουσιάστηκε στο Σχ. 3.7. Το σύστημα μάζας ελατηρίου με την επιτάχυνση του εδάφους  $A_g$  [m/s<sup>2</sup>] ως είσοδο και τη μετατόπιση  $x$  [m] της σεισμικής μάζας από τη ΘΙ ως έξοδο, έχει ΣΜ  $G_m(s)$  της μορφής ([Παράρτημα II]):

$$G_m(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{B}{M}s + \frac{K}{M}} \quad (3.6)$$

όπου  $M=8.4\text{gr}$  το σύνολο της σεισμικής μάζας (πηνία συν μεσαίος οπλισμός αισθητήρα μετατόπισης συν παρελκόμενα),  $K=1131$  N/m η σταθερά ελατηρίου για το ζεύγος των δύο ελασμάτων στήριξης της σεισμικής μάζας και  $B=0.037$  N/(m/s) είναι ο συντελεστής ιξώδους τριβής (λέγεται και κολλώδης τριβή) για την κίνηση της σεισμικής μάζας στον αέρα.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ, πως ακόμα και το εμπορικό προϊόν που ενσωματώνει τον παραπάνω αισθητήρα, παρότι είναι ερμητικά σφραγισμένο μέσα στο κέλυφός του, δεν βρίσκεται σε θάλαμο κενού. Αντιστοίχως, για την συσκευή που θα αναπτυχθεί στο εργαστήριο, αν θέλουμε να καταγράψει αληθινές σεισμικές δονήσεις, σωστό θα είναι να καλύπτεται ο αισθητήρας με κάποιου είδους κάλυμμα, ώστε να μην επηρεάζεται από τις ανεπαίσθητες σε μας κινήσεις του αέρα.

Με τη μάζα  $M$  μετρημένη με ακρίβεια, τα  $K$  και  $B$  μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν με ένα πείραμα ελεύθερης ταλάντωσης (Παράρτημα II) αν καταγράψουμε την αποσβεννύμενη φυσική συχνότητα ( $\omega_d=58.4\text{Hz}$  για το εμπορικό προϊόν) και το ρυθμό μείωσης του πλάτους της ταλάντωσης, και εφόσον κάνουμε την προσέγγιση  $\omega_d=\omega_0$  (με  $\omega_0$  συμβολίζουμε τη φυσική συχνότητα άνευ απόσβεσης), μια σίγουρα καλή προσέγγιση όταν ο συντελεστής απόσβεσης είναι πάρα πολύ μικρός, όπως στην περίπτωση μας.

Η μετατόπιση  $x$  μετατρέπεται με τη βοήθεια του χωρητικού αισθητήρα σε σήμα τάσης. μαζί και με την ενισχυτική βαθμίδα που ακολουθεί έχει κέρδος  $A_s=A_t A_1=25500\text{V/m}$ . Ακόμα ένας ενισχυτής με κέρδος  $A_2$  τοποθετείται μετά τον αποδιαμορφωτή και σε αυτό το σημείο ο ανοιχτός βρόχος ουσιαστικά περατώνεται. Το γινόμενο  $A_s A_2$  καθορίζει το συνολικό κέρδος του συστήματος μέτρησης της μετατόπισης. Ας προσέξουμε ότι οι δύο ενισχυτές  $A_1$  και  $A_2$  λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες: ο  $A_1$  στη φέρουσα συχνότητα  $f_c$  (δεκάδες kHz) και ο  $A_2$  στη μπάνα των σεισμικών κυμάτων (από DC ως λίγες εκατοντάδες Hz) και συνεπώς πρέπει για αυτούς να επιλέγονται αντιστοίχως εξειδικευμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

### 3.2.3.3. Κλειστός βρόχος

Η τάση εξόδου  $V_{op}$  του ανοιχτού βρόχου εφαρμόζεται επί ενός R-C δικτυώματος το ρεύμα του οποίου αποτελεί το σήμα ανάδρασης του PD ελέγχου. Η αντίσταση  $R_p$  είναι για τον αναλογικό έλεγχο και ο πυκνωτής  $C_d$  για τον διαφορικό έλεγχο. Η αντίσταση  $R_d$  βοηθάει στη διαμόρφωση της απόκρισης στην περιοχή της συχνότητας αποκοπής, ενώ η  $R_t$  δρα ως στοιχείο ρύθμισης του κέρδους του συνολικού PD ελέγχου, αν και επί της ουσίας επηρεάζει περισσότερο τον P έλεγχο. Η τάση  $V_{op}$  που εφαρμόζεται πάνω στο PD κύκλωμα μετατρέπεται σε ένα ρεύμα  $I_f$  το οποίο μεταφέρει όλη την απαιτούμενη πληροφορία ανάδρασης. Η ΣΜ  $F_1(s)$  του PD κυκλώματος είναι:

$$F_1(s) = \frac{sC_d(R_p+R_d)+1}{sC_d(R_pR_t+R_dR_t+R_pR_d)+(R_p+R_t)} \quad (3.7)$$

Αυτό που ακολουθεί είναι ένας ενισχυτής ρεύματος αποτελούμενος από δύο βαθμίδες, μία βαθμίδα ρεύματος σε τάση και μία βαθμίδα τάσης σε ρεύμα, με το συνολικό κέρδος να καθορίζεται από το λόγο δύο αντιστάσεων ( $R_b$  και  $R_x$ ). Το ρεύμα εξόδου  $I_c$  αυτού του ενισχυτή τροφοδοτείται στον παράλληλο συνδυασμό του πηνίου του ηλεκτρομαγνήτη με έναν αντιπαρασιτικό πυκνωτή  $C_x$ , ο οποίος απαλείφει τα όποια προβλήματα θορύβου γεννώνται στο πηνίο (Johnson και EMI). Εάν  $L_c$  είναι η επαγωγή του πηνίου και  $R_c$  η ωμική του αντίσταση, η ΣΜ της όλης σύνδεσης είναι:

$$F_2(s) = \frac{1}{s^2L_cC_x+sR_cC_x+1} \quad (3.8)$$

όπου ως είσοδο θεωρούμε το ρεύμα  $I_c$  και έξοδο το ρεύμα  $I_o$  μέσα στο πηνίο. Η αντίσταση του πηνίου (εκατοντάδες  $\Omega$ ) μετριέται με ωμόμετρο, ενώ η επαγωγή του (δεκάδες mH) στη  $\Theta I$  (ουσιαστικά καθορίζεται από την ύπαρξη του μόνιμου μαγνήτη) βρίσκεται με πείραμα ελεύθερης ταλάντωσης ανάμεσα στο πηνίο και σε πυκνωτή γνωστής χωρητικότητας.

Το ρεύμα του πηνίου επιδρά στην κινητική κατάσταση της σεισμικής μάζας ως μία δύναμη που προσπαθεί να την επαναφέρει στη  $\Theta I$ , με μια σταθερά αναλογίας  $G_c=19N/A$ . Η δύναμη αυτή επί της μάζας  $M$  έχει ως αποτέλεσμα μια επιτάχυνση  $A_f$  η οποία υπερτίθεται στην επιτάχυνση του εδάφους  $A_g$ . Αποτέλεσμα είναι μια παραμένουσα επιτάχυνση  $A_e$  της μάζας ως προς το σταθερό πλαίσιο η οποία και αποτελεί το «σφάλμα» (error) του

συστήματος, την είσοδο δηλαδή του κλάδου ανοιχτού βρόχου σε λειτουργία κλειστού βρόχου. Η ΣΜ του κλειστού βρόχου είναι:

$$G(s) = \frac{K_a}{1+K_a K_f} \quad (3.9)$$

όπου

$$K_a(s) = A_t A_1 A_2 G(s) \quad (3.10)$$

είναι η ΣΜ του ανοιχτού βρόχου και

$$K_f = \frac{R_b G_c}{R_x M} \cdot F_1 F_2 \quad (3.11)$$

είναι αυτή του κλάδου ανάδρασης. Με αντικατάσταση των τιμών όλων των εμφανιζόμενων ποσοτήτων στην (3.9) καταλήγουμε σε μια ΣΜ της μορφής:

$$G(s) = \frac{\sum_{k=0}^m a_k s^k}{\sum_{\lambda=0}^n b_\lambda s^\lambda} = \frac{a_5 s^5 + a_4 s^4 + \dots + a_0}{b_7 s^7 + b_6 s^6 + \dots + b_0} \quad m=5, n=7 \quad (3.12)$$

με τους συντελεστές  $a_k, b_\lambda$  να είναι γνωστοί. Αυτό είναι ένα σύστημα 2ης τάξης και μπορεί να προσεγγιστεί με ένα άλλο, απλούστερο σύστημα 2ης τάξης (δηλαδή με  $n-m=2$ ). Αν απορρίψουμε τους μιγαδικούς πόλους και τα μηδενικά που συμπίπτουν (απολύτως ακριβές) ή που σχεδόν συμπίπτουν (μια αποδεκτή προσέγγιση) το σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως:

$$G(s) = \frac{\sum_{k=0}^{m'} a_k s^k}{\sum_{\lambda=0}^{n'} b_\lambda s^\lambda} \quad , \quad n'-m'=2, n' < 7 \quad (3.13)$$

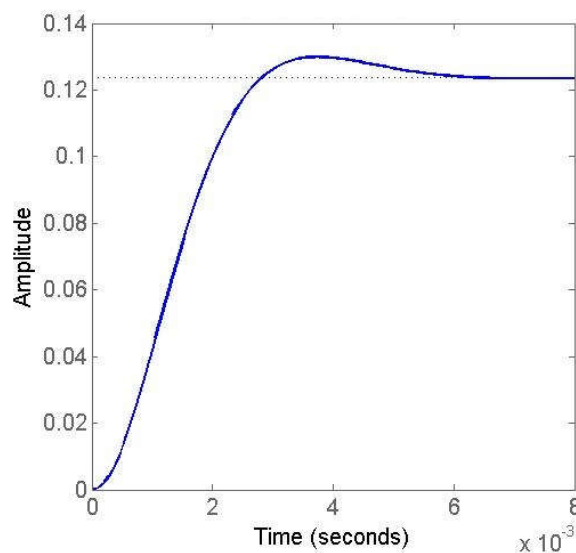
Αντί να επιλέξουμε ένα τυχαίο ζεύγος τιμών  $n'$  και  $m'$  ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη  $n'-m'=2$ , είναι πιο πρόσφορο (παρότι μπορεί να αποτελεί λιγότερο ικανοποιητική προσέγγιση), για μια πιο άμεση εικόνα της συμπεριφοράς του συστήματος, να επιλέξουμε  $n=2, m=0$  και  $b_2=1$ . Οπότε, σε μια ελαφρώς διαφορετική παρουσίαση, η απλοποιημένη ΣΜ έχει τη μορφή:

$$G(s) = \frac{ac}{s^2 + bs + a} \quad (3.14)$$

Προσδιορίζοντας τους συντελεστές  $a$ ,  $b$  και  $c$  με το Curve Fitting Tool του Matlab καταλήγουμε στην έκφραση:

$$G(s) = \frac{1.095 \cdot 10^6 \times 0.1238}{s^2 + 1359s + 1.095 \cdot 10^6} \quad (3.15)$$

η οποία δεν έχει μηδενικά, ενώ έχει ένα διπλό πόλο στη θέση  $-6.795e+02 \pm j7.9579e+02$  rad/s (πάντα αναφερόμαστε στο εμπορικό προϊόν). Ο συντελεστής απόσβεσης για την  $G(s)$  είναι  $\zeta=0.648$  και το overshoot σε βηματική απόκριση είναι 5.7%, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.14.



Σχ. 3.14 Βηματική απόκριση του συστήματος που περιγράφει η (3.15).

Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως κατά την ανάπτυξη των πρωτότυπων οργάνων, τόσο για τα αξελερόμετρα όσο και για τα σεισμόμετρα, το κέρδος ανοικτού βρόχου ρυθμίζεται από ένα τρίμερ σε μια ενισχυτική μονάδα με TE (την  $A_2$ ), ενώ όταν έχει πια καθοριστεί η επιθυμητή τιμή, στα προϊόντα προς πώληση δεν υπάρχει τρίμερ αλλά κανονική SMD αντίσταση. Η ρύθμιση του κέρδους γίνεται με κριτήριο το overshoot σε βηματική διέγερση, το οποίο επιδιώκεται να είναι περίπου 5%. Αυτό εξασφαλίζει πως και ο συντελεστής απόσβεσης  $\zeta$  θα είναι κοντά στο  $1/\sqrt{2} = 0.707$ , που είναι το θεωρητικά ιδανικό, σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία. Επίσης, αποδεικνύεται στην πράξη πως αν το μηχανικό μέρος δεν παρουσιάζει απρόβλεπτα προβλήματα, με αυτό το κέρδος ανοικτού βρόχου είμαστε σε απόσταση ασφαλείας από τις συνθήκες αστάθειας.



Η επιλογή μίας έκφρασης όπως η (3.14) για να περιγράψουμε τη ΣΜ δικαιολογείται πλήρως και από την πειραματικά επιβεβαιωμένη συμπεριφορά του οργάνου, σύμφωνα με την οποία έχει σταθερή απόκριση πλάτους στις χαμηλές συχνότητες, χωρίς διακυμάνσεις, ενώ μετά τη συχνότητα αποκοπής η απόκριση πλάτους παρουσιάζει σταθερή μείωση με  $-40\text{dB/dec}$ , μια συμπεριφορά που καταδεικνύει πως δεν υπάρχουν κρυφοί πόλοι που να πρέπει να ληφθούν υπόψιν, τουλάχιστο όχι στην περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Από την (3.15) συνάγεται το συμπέρασμα πως η φυσική συχνότητα του αξελερόμετρου σε λειτουργία κλειστού βρόχου αναμένεται να είναι:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1.095 \cdot 10^6} = 167 \text{ Hz} \quad (3.16)$$

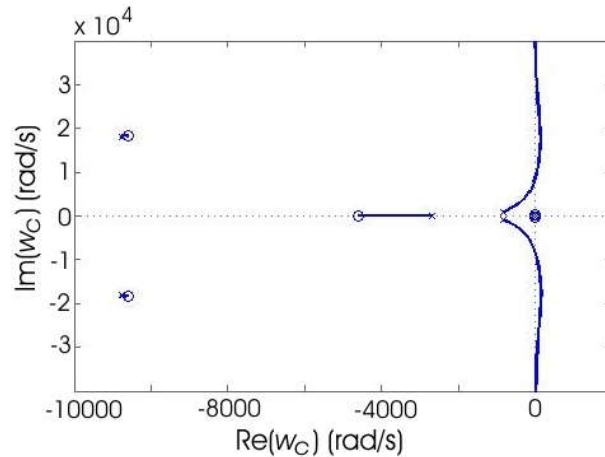
Η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στην πειραματική (160Hz) την οποία μετράμε στον παλμογράφο [58], εισάγοντας στον κλειστό βρόχο παλμικό σήμα τάσης το οποίο προσομοιάζει τη βηματική διέγερση (βλ. και §3.2.4). Επίσης από την (3.15) προκύπτει πως το DC κέρδος είναι:

$$E_{dc} = 0.1238 \text{ V}/(\text{m/s}^2) = 1.21 \text{ V/g} \quad (3.17)$$

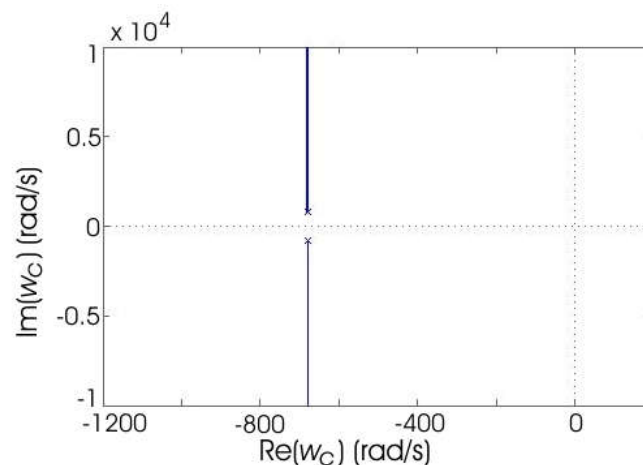
μια τιμή που επίσης επαληθεύτηκε εύκολα πειραματικά (μετράμε την έξοδο του κλειστού βρόχου με το αισθητήριο σε κλίση  $90^\circ$ , οπότε  $A_g=1\text{g}$ ). Σε αυτό το σημείο της διάταξης, παρεμβάλλεται ο ενισχυτής  $A_o$ , πριν την τελική έξοδο του οργάνου, για να ρυθμιστεί το συνολικό κέρδος στην επιθυμητή τιμή (2.5V/g για το εμπορικό προϊόν).

Ας παρατηρήσουμε σε αυτό το σημείο πως η (3.15) δεν ταυτίζεται (ασφαλώς) με την (3.12) και παραμένει απλώς μια προσέγγισή της. Παρόλα αυτά, οι διαφορές είναι σχεδόν αμελητέες αν αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η απόκριση του οργάνου για συχνότητες μέχρι λίγες εκατοντάδες Hz. Από αμφότερες τις εκφράσεις προκύπτει το ίδιο DC κέρδος και η ίδια συχνότητα αποκοπής ( $-3\text{dB}$ ) στα 200Hz. Στο Σχ. 2.20 είδαμε το διάγραμμα πλάτους για τις δύο εκφράσεις. Παρατηρούμε εκεί πως οι διαφορές είναι αμελητέες. Η απόκριση στο πεδίο συχνότητας και η βηματική απόκριση εξετάστηκαν πειραματικά και επαληθεύτηκε η ταύτισή τους με το θεωρητικό αποτέλεσμα. Όμως, θέματα ευστάθειας και επίδρασης του θορύβου υψηλής συχνότητας δε μπορούν να μελετηθούν μέσα από την απλοποιημένη έκφραση. Για παράδειγμα, η διερεύνηση της πλήρους έκφρασης (3.12) αποκαλύπτει κάποιον κρυφό συντονισμό στα 3kHz περίπου, ο οποίος, με ένα εσφαλμένα υψηλό κέρδος ανοιχτού βρόχου

οδηγεί σε αστάθεια λόγω υπαρκτών συνιστωσών σήματος (π.χ. λευκός θόρυβος) σε πολύ χαμηλότερες συχνότητες (1kHz), κάτι το οποίο είδαμε και πειραματικά. Στο Σχ. 3.15 βρίσκεται το διάγραμμα γεωμετρικού τόπου ριζών της (3.12) ενώ στο Σχ. 3.16 είναι ο γεωμετρικός τόπος ριζών της απλοποιημένης έκφρασης (3.15).



Σχ. 3.15 Γεωμετρικός τόπος ριζών για την πλήρη έκφραση για τη ΣΜ (3.12).



Σχ. 3.16 Γεωμετρικός τόπος ριζών για την απλοποιημένη έκφραση για τη ΣΜ (3.15).

Παρατηρούμε πως η απλοποιημένη έκφραση περιγράφει ένα σύστημα που είναι πάντα ευσταθές, ενώ η πλήρης κάποιο που είναι ευσταθές υπό συνθήκη. Εάν το κέρδος ανοιχτού βρόχου αυξηθεί ένα ζεύγος πόλων εισέρχεται στο δεξί ημιεπίπεδο και το σύστημα περιέρχεται σε ασταθή κατάσταση. Στην πράξη, με αύξηση του κέρδους πέραν κάποιας τιμής, η σεισμική μάζα του αξελερόμετρου εκτελεί ταλάντωση στα όρια του clip level με συχνότητα περίπου 1kHz, την οποία αφενός παρατηρούμε στην έξοδο μέσω του παλμογράφου, αφ' ετέρου την ακούμε χάρη στο χαρακτηριστικό οξύ ήχο που παράγεται.

Κατά την εργοστασιακή ρύθμιση το κέρδος ανοιχτού βρόχου φροντίζεται να είναι λίγο κάτω από αυτό το όριο, αρκετά κάτω από αυτό όμως, ώστε να εξασφαλίζεται πως το όργανο δε θα περιέλθει σε αστάθεια με μια σημαντική μεταβολή της θερμοκρασίας (για παράδειγμα). Επίσης, στο Σχ. 3.15 μπορούμε να δούμε ένα ζεύγος μηδενικού και πόλου στο μηδέν που ταυτίζονται και κάποια άλλα ζεύγη στο αριστερό ημιεπίπεδο που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, τα οποία βέβαια στην απλοποιημένη έκφραση έχουν απαλειφθεί.

### **3.2.4. Προσομοίωση του συνολικού μηχανισμού με το LTspice**

#### **3.2.4.1. Γενικά για τη χρήση H/Y στη σχεδίαση σεισμολογικών οργάνων**

Στην όλη προσπάθεια της έρευνας πάνω στα σεισμολογικά όργανα και της ανάπτυξης νέων προϊόντων οι υπολογιστές παίζουν κεντρικό ρόλο. Ως είναι αναμενόμενο, υπάρχει πληθώρα εφαρμογών που υποστηρίζουν τις ανάγκες έρευνας, ανάπτυξης και παραγωγής σεισμολογικών οργάνων και δεν είναι εφικτό να απαριθμήσει κανείς όλα τα προγράμματα που ενδεχομένως υπάρχουν εγκατεστημένα στον υπολογιστή κάποιου που ασχολείται με το αντικείμενο, μπορούμε όμως να αναφέρουμε μερικά εξ' αυτών.

Το Matlab της MathWorks μας βγάζει από τον κόπο να κάνουμε συνεχείς διαδοχικές δοκιμές αλλάζοντας τις τιμές διαφόρων στοιχείων στο μηχανικό ή στο ηλεκτρονικό μέρος, ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή συμπεριφορά. Με τη συνάρτηση μεταφοράς και την απεικόνιση των διαγραμμάτων μέτρου – φάσης, βηματικής απόκρισης και γεωμετρικού τόπου ριζών, μπορούμε μέσα σε μια – δυο μέρες να κάνουμε τη σωστή επιλογή στοιχείων, που αλλιώς ίσως και να μας έπαιρνε αρκετές εβδομάδες. Το open source λογισμικό Octave το οποίο υφίστατο στο πρόγραμμα σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του πρώην ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, δεν αποτελεί υποκατάστατο, καθώς δε διαθέτει την πληθώρα των χρήσιμων toolboxes του Matlab.

Πολύ σπουδαία είναι και η συμβολή της χρήσης του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων SolidWorks της Dassault για το σχεδιασμό των εξαρτημάτων του μηχανικού μέρους και τις μελέτης των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Υπάρχουν και άλλα τέτοια λογισμικά, αλλά το SolidWorks φαίνεται να είναι ένα από τα ευρύτερα διαδεδομένα, τόσο στον ακαδημαϊκό όσο και στο βιομηχανικό χώρο. Με αυτό μπορούμε να έχουμε επακριβώς τη μάζα ενός εξαρτήματος με περίπλοκη γεωμετρία, τις συχνότητες συντονισμού, τις μέγιστες παραμορφώσεις όταν ληφθεί υπόψη η δύναμη της βαρύτητας ή η μεταβολή της θερμοκρασίας και οι συστολές – διαστολές που προκαλούνται, όπως και η δύναμη τριβής για κίνηση μέσα σε ρευστό ή αέριο. Διαθέτει μια εξαιρετικά πλούσια βιβλιοθήκη με υλικά, των

οποίων οι ιδιότητες λαμβάνονται υπόψη στην εξομοίωση. Επιπλέον, το λογισμικό είναι συμβατό με όλα τα λογισμικά ελέγχου μηχανημάτων CNC και 3D printers, οπότε τα 3D σχέδια από αυτό μπορούν απευθείας να εισαχθούν εκεί για τη δημιουργία των εξαρτημάτων.

Απαραίτητα εργαλεία είναι επίσης τα λογισμικά σχεδίασης PCB. Σε αυτό τον τομέα υπάρχουν freeware λογισμικά με πολύ αξιόλογες επιδόσεις (KiCad, Circuit Maker – TraxMaker κλπ), αλλά και εμπορικά πακέτα όπως το Protel παλιότερα και το πιο πρόσφατο Altium του ιδίου εκδότη. Ένα σπουδαίο πρόβλημα με αυτά τα λογισμικά δημιουργείται όταν μετά από χρόνια χρήσης ενός εξ αυτών έρχεται η ώρα να εγκαταλειφθεί προς χάριν κάποιου νεότερου, κυρίως λόγω του ότι τα νέα λειτουργικά συστήματα δεν υποστηρίζουν την παλιά εφαρμογή. Αν το νέο πρόγραμμα δε μπορεί να δεχτεί απευθείας σχέδια από το παλιό και να τα σώσει με το δικό του φορμάτ, η εκ νέου σχεδίαση των (πολλών) παλιών πλακετών στο νέο πρόγραμμα αποδεικνύεται πρακτικά αδύνατη. Τότε, είτε πρέπει να διατηρούνται κάποια PC με παλιό λειτουργικό (π.χ. Windows XP), πράγμα δύσκολο και επικίνδυνο λόγω μη υποστήριξης του παλιού λογισμικού σε θέματα ασφαλείας, είτε να υπάρχουν κάποια PC που να τρέχουν το παλιό λειτουργικό σε περιβάλλον VirtualBox της Orcad.

Το VirtualBox της Orcad αποδεικνύεται επίσης πολύ χρήσιμο. Πέραν της περίπτωσης που μόλις προαναφέρθηκε, έχουμε και περιπτώσεις που θέλουμε λειτουργίες σε λειτουργικό Linux (όταν π.χ. θέλουμε να τρέξουμε κάποια scripts σε γλώσσα Python για να δημιουργήσουμε τα NPSD διαγράμματα που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο). Επειδή γενικά δεν είναι αποδοτικό να διατηρούνται διάφορα PC με το δικό του λειτουργικό το καθένα, το VirtualBox δίνει μια εύκολη λύση, αρκεί το PC να έχει αρκετά μεγάλη μνήμη RAM, αλλά και ρύθμιση για μεγάλη virtual memory, ώστε να μπορεί να υποστηρίξει τη λειτουργία (μπορεί να χρειαστεί να τρέχουμε πολλά virtual machines ταυτόχρονα).

Το SapWin (freeware utility) είναι επίσης ένα χρήσιμο εργαλείο για να λάβουμε τη ΣΜ κυκλωμάτων με εξαιρετικά περίπλοκη δομή. Σε μια περίπτωση που αντιμετωπίστηκε επιτυχώς από το γράφοντα έπρεπε να εξαχθεί η ΣΜ ενεργού φίλτρου το οποίο ενσωμάτωνε πυκνωτή κλασματικής τάξης (fractional order capacitor), που καθιστούσε έτσι και το όλο κύκλωμα ως ένα φίλτρο κλασματικής τάξης. Καθώς δεν υπάρχει στη θεωρία των ΣΑΕ ή στα εργαλεία του Matlab πρόβλεψη για ΣΜ με μη ακέραιες τιμές για τους εκθέτες της μιγαδικής συχνότητας  $s$  το πρόβλημα έμοιαζε να μην έχει λύση. Με τη βοήθεια του SapWin η ΣΜ του κυκλώματος που σχεδιάστηκε εκφράστηκε ως λόγος πολυωνύμων του  $s$  και δόθηκε έτσι διέξοδος στην περαιτέρω μελέτη του συστήματος.

Μαζί με όλα τα προαναφερθέντα λογισμικά ένα πάρα πολύ χρήσιμο εργαλείο είναι το όποιο λογισμικό εξομοίωσης κυκλωμάτων επιλέγει ένας χρήστης ή μια εταιρία. Δύο ευρέως

χρησιμοποιούμενα είναι το PSpice της Orcad και το toolbox Simulink του Matlab της MathWorks. Το Simulink είναι ένα λογισμικό με ευρύτερες δυνατότητες (μπορεί να συμπεριλάβει και μηχανικά μεγέθη, ηλεκτρικές μηχανές, εξαρτήσεις μεγεθών από τη θερμοκρασία ή άλλες εξωτερικές παραμέτρους κλπ.) χάρη στα έτοιμα μπλοκ που διαθέτει, αλλά και τη δυνατότητα που δίνεται στο χρήστη να δημιουργήσει τα δικά του μπλοκ. Παρόλα αυτά, για συνήθη αναλογικά ή ψηφιακά κυκλώματα της μικροηλεκτρονικής το PSpice αποδεικνύεται πιο ευέλικτο, πιο εύχρηστο και πιο φιλικό προς το χρήστη. Το πρόβλημα με το PSpice είναι πως αποτελεί εμπορικό πακέτο και προστατεύεται από πνευματικά δικαιώματα. Έτσι, μεγάλο μέρος των ηλεκτρονικών μηχανικών καταφεύγει στη χρήση του freeware λογισμικού LTspice, που έχει αντίστοιχες δυνατότητες με το PSpice με το σπουδαίο περιορισμό όμως ότι στις βιβλιοθήκες του υπάρχουν μόνο στοιχεία της Analogue Devices, καθώς είναι η εταιρία που διανέμει το λογισμικό και φροντίζει για τυχόν updates εντελώς δωρεάν. Αυτό το μειονέκτημα όμως πολλές φορές είναι άνευ ουσιαστικής σημασίας, καθώς η Analogue Devices είναι ένα γίγαντας τη παγκόσμιας βιομηχανίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και διαθέτει σχεδόν τα πάντα, ώστε μέσω cross-reference πινάκων να μπορεί κανείς να αντιστοιχίσει το οποιοδήποτε τσιπ οποιασδήποτε εταιρίας με ένα δικό της.

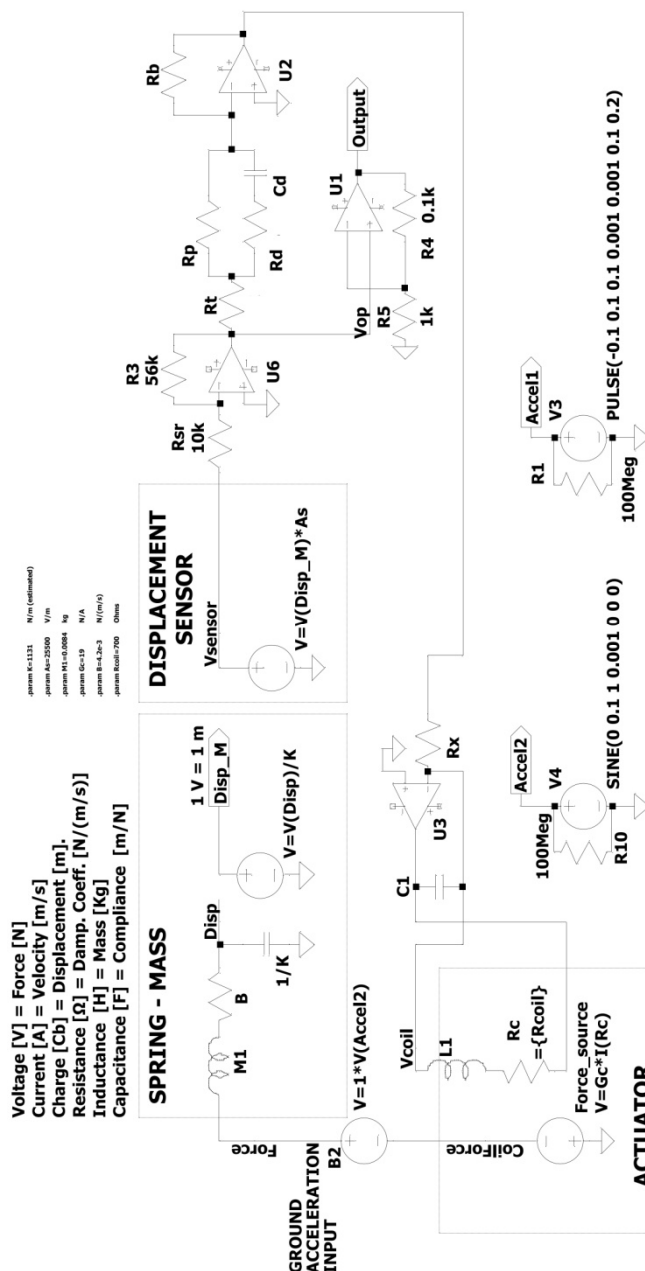
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το LTspice όχι απλώς μόνο για να ελέγξει τη λειτουργία κάποιων κυκλωμάτων, αλλά και για να εξομοιώσει τη συμπεριφορά του αξελερόμετρου συνολικά. Αυτό επιτυγχάνεται με το μηχανικό μέρος να εισάγεται στον κλειστό βρόχο μέσω του ηλεκτρικού του αναλόγου. Δυστυχώς, ενώ η περιγραφή του συστήματος μέσα από τη συνάρτηση μεταφοράς του και τα διαγράμματα που βλέπουμε στο Matlab αποτελούν μια όχι πιστή, αλλά σχετικά καλή εικόνα της πραγματικότητας, η εξομοίωση του συστήματος με το LTspice για άγνωστο λόγο δεν καταφέρνει να αναπαραγάγει ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες καταστάσεις λειτουργίας, παρά μόνο αν στο ηλεκτρικό ανάλογο δώσουμε μεγαλύτερες τιμές για τη μάζα  $M$  ή/και μικρότερες για τη σταθερά ελατηρίου  $K$  ή/και μικρότερες τιμές για το συντελεστή ιξώδους τριβής  $B$ . ή/και μικρότερες τιμές για την σταθερά μετατροπής  $G_c$  του ηλεκτρομαγνήτη (επέμβαση σε κάποια από αυτά ή μόνο σε ένα, όχι απαραίτητα σε όλα, αν και μπορεί να γίνει και αυτό). Η όλη κατάσταση παραπέμπει σε λάθος προσδιορισμό της  $G_c$  (να είναι δηλαδή η πραγματική τιμή της μικρότερη από 19N/A), κάτι το οποίο όμως έχει αποκλειστεί ως ενδεχόμενο. Με αυτή την πεποίθηση συνηγορούν τόσο η ταύτιση της συμπεριφοράς της ΣΜ με την πειραματική συμπεριφορά, όσο και το ότι οι μέθοδοι με τις οποίες προσδιορίζουμε τα  $M$ ,  $K$ ,  $B$ ,  $G_c$  είναι τόσο απλοϊκές που είναι απίθανο να έχει γίνει κάποιο λάθος. Το γεγονός αυτό μειώνει την

αξία της εξομοίωσης ως βοηθητικού εργαλείου, αλλά δεν την ακυρώνει εντελώς, αρκεί να διαθέτουμε ένα σετ πειραματικών παρατηρήσεων ( $\omega_0$ ,  $\zeta$ , step response overshoot) για κάποιο σετ τιμών όλων των μεγεθών στο ηλεκτρονικό και το μηχανικό μέρος. Αν αυτό ισχύει, τότε μπορούμε να ρυθμίσουμε τα  $M$ ,  $K$ ,  $G_c$  και  $B$  στο LTspice έτσι ώστε η έξοδος της εξομοίωσης να πλησιάζει την πραγματική και από κει και πέρα να κάνουμε την όποια διερεύνηση θέλουμε, π.χ. να εξετάσουμε τι θα συμβεί αν η τάδε παράμετρος αλλάξει κατά ένα ποσοστό, ενώ μια άλλη αλλάξει κατά ένα άλλο ποσοστό. Επίσης, με Noise Analysis μπορούμε να εντοπίσουμε τις πιο σημαντικές πηγές θορύβου και να δούμε σε ποια σημεία του κυκλώματος τυχόν απορρόφηση EMI μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα κλπ, αντικείμενο το οποίο π.χ. δε μπορούμε να μελετήσουμε με τη ΣΜ στο Matlab.

#### 3.2.4.2. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν

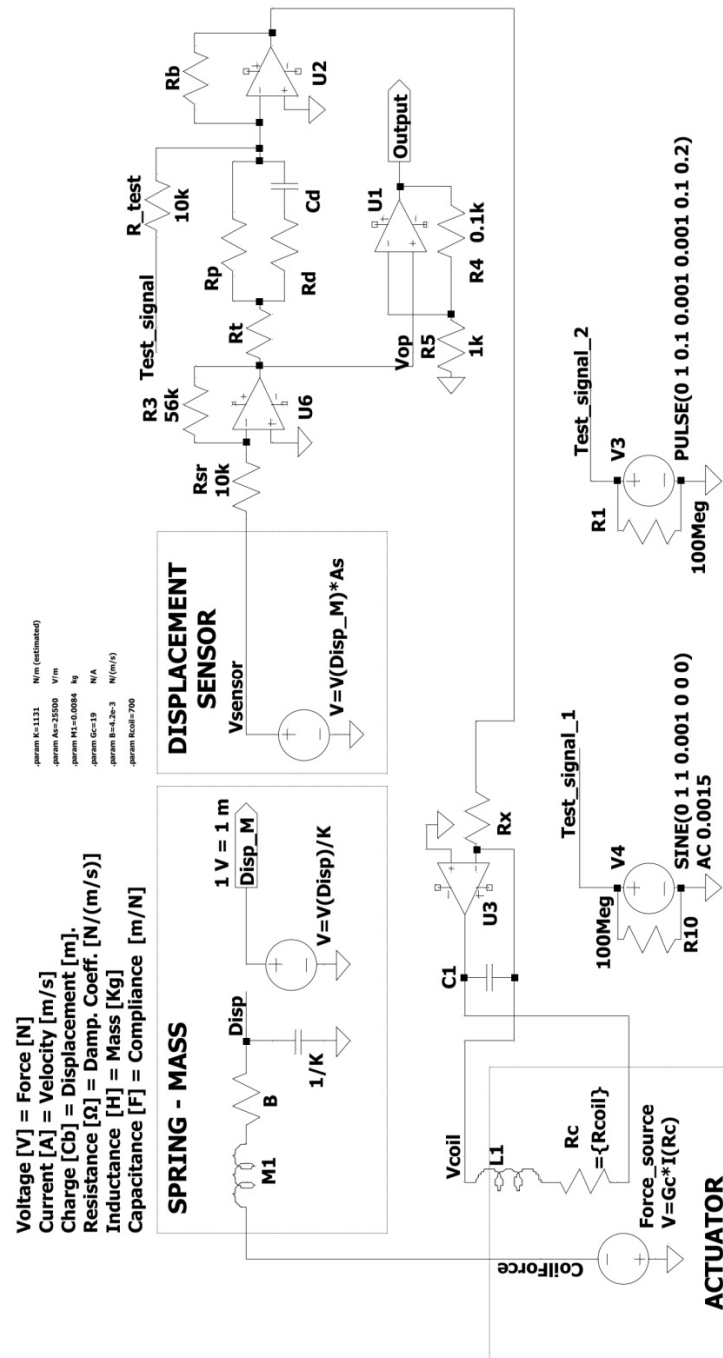
Η ιδέα της χρήσης του ηλεκτρικού αναλόγου του μηχανικού μέρους για τη μελέτη σε περιβάλλον Spice του συνολικού μηχανισμού αντλήθηκε από την [40], ενώ εδώ έχουν γίνει οι κατάλληλες τροποποιήσεις, ώστε η μέθοδος να προσαρμοστεί στις ανάγκες της έρευνας για το δικό μας αξελερόμετρο. Για την υποβοήθηση της μελέτης του υπό ανάπτυξη αξελερόμετρου χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα τα οποία βλέπουμε στα σχήματα Σχ. 3.17 και Σχ. 3.18 αντίστοιχα. Η διαφοροποίηση ανάμεσα στα δύο είναι το πού βρίσκεται η είσοδος σήματος. Σε εκείνο του Σχ. 3.17 η είσοδος εφαρμόζεται στο μηχανικό μέρος (επιτάχυνση εδάφους), ενώ σε εκείνο του Σχ. 3.18 η είσοδος εφαρμόζεται στο βρόχο ανάδρασης. Η πρώτη περίπτωση προσομοιώνει την πραγματική λειτουργία του οργάνου, ενώ η δεύτερη προσομοιώνει τα test δοκιμής που γίνονται στο εργαστήριο.

Σε παλαιότερες δεκαετίες υπήρχαν μηχανισμοί πρόκλησης δονήσεων (vibration tables) για τη μελέτη απόκρισης ενός σεισμολογικού οργάνου. Με την τοπολογία force-balance όμως δεν υπάρχει πια τέτοια απαίτηση, καθώς η είσοδος ενός ηλεκτρικού σήματος στο βρόχο ανάδρασης μπορεί να έχει, μέσω της επίδρασης του actuator, την ίδια επίδραση επί της σεισμικής μάζας όπως και μια αληθινή εξωτερική δόνηση, ενώ τα υπόλοιπα αφήνουμε να τα κάνει ο κλειστός βρόχος. Όταν μελετάμε αξελερόμετρο εφαρμόζουμε μία τάση μέσω μιας αντίστασης (πηγή ρεύματος) και εγχέουμε αυτό το ρεύμα στην είσοδο του current-to-current ενισχυτή (το σημείο στο Σχ. 3.7 όπου σημειώνεται το ρεύμα  $I_f$ ), προσομοιώνοντας έτσι είσοδο επιτάχυνσης εδάφους. Όταν όμως μελετάμε σεισμόμετρο εφαρμόζουμε τάση μέσω ενός πυκνωτή προσομοιώνοντας είσοδο ταχύτητας εδάφους (στα σεισμόμετρα μας ενδιαφέρει η απόκριση ταχύτητας). Εδώ δημιουργείται ένα πρόβλημα, καθώς για μικρές συχνότητες ο πυκνωτής αυτός πρέπει να πάρει πολύ μεγάλες τιμές, πράγμα πρακτικά



Σχ. 3.17 Μοντέλο προσομοίωσης του αξελερόμετρου στο περιβάλλον του LTSpice με σήμα εισόδου πριν το ηλεκτρικό ανάλογο του συστήματος μάζας – ελατηρίου.

αδύνατον. Έτσι, στη μελέτη επί του πάγκου ενός σεισμόμετρου για μικρές συχνότητες, διεγείρουμε το σύστημα με αντίσταση εν σειρά (διέγερση με επιτάχυνση) και από την απόκριση επιτάχυνσης προσπαθούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την απόκριση ταχύτητας. Με το Spice όμως δεν έχουμε περιορισμό στην τιμή του πυκνωτή και έτσι διευκολύνεται το έργο μας.



Σχ. 3.18 Μοντέλο προσομοίωσης του αξελερόμετρου στο περιβάλλον του LTspice με σήμα εισόδου στον κλάδο ανάδρασης.

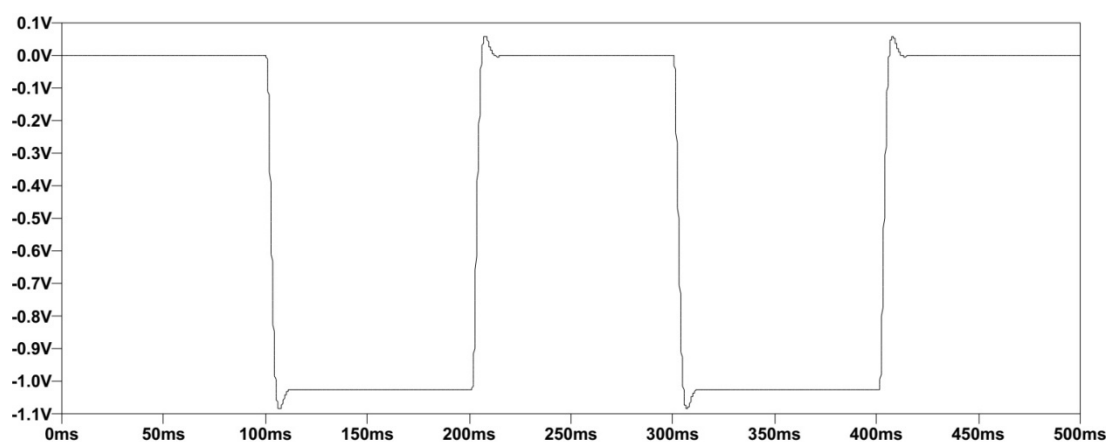
### 3.2.4.3. Ενδεικτικά αποτελέσματα των εξομοιώσεων

Στα δύο παραπάνω σχηματικά, προκειμένου να γίνουν πιο ευανάγνωστα, έχει παραλειφθεί η διαφορική τροφοδοσία  $\pm 15V$  των ΤΕ και ομοίως έχουν διαγραφεί τα labels με τον τύπο των ΤΕ. Για τις ανάγκες της εξομοίωσης δεν έχει και ιδιαίτερη σημασία ο τύπος του ΤΕ που χρησιμοποιείται εφόσον οι συχνότητες ενδιαφέροντος είναι μικρές και εξασφαλίζεται και η



επάρκεια ρεύματος οδήγησης του πηνίου και ο συγκεκριμένος αποτέλεσε εν ολίγοις μια τυχαία επιλογή. Για την AC ανάλυση (απόκριση στο πεδίο συχνότητας) χρησιμοποιούμε την ημιτονοειδή πηγή, ενώ για transient ανάλυση (απόκριση στο πεδίο του χρόνου) χρησιμοποιούμε κάποια πηγή παλμών. Τελικά, προκύπτει πως τα δύο μοντέλα δίνουν αντίστοιχα αποτελέσματα μόνο στο πεδίο του χρόνου, ενώ στο πεδίο συχνότητας δίνουν εντελώς διαφορετικά τα οποία μάλιστα απέχουν αρκετά από αυτά που βλέπουμε μέσα από το πείραμα και τη μελέτη της ΣΜ.

Στο Σχ. 3.19 βλέπουμε το αποτέλεσμα της transient analysis για παλμική είσοδο έχοντας δώσει στο μοντέλο όλες τις τιμές έτσι όπως ισχύουν στην πραγματικότητα (για το εμπορικό προϊόν), εκτός από τη μάζα, για την οποία έχουμε δώσει τιμή 2.6 φορές μεγαλύτερη (22gr), ώστε να έχουμε το ίδιο περίπου overshoot (5.5%) με αυτό που μας δίνουν η ΣΜ (βλ. Σχ. 3.14) αλλά και το πείραμα για το εμπορικό προϊόν. Ομοίως «αποδεκτό» αποτέλεσμα προκύπτει αν μειώσουμε τη  $C_d$  χαλαρώνοντας δηλαδή το διαφορικό έλεγχο ή αν αυξήσουμε την  $R_x$ , μειώνοντας δηλαδή συνολικά τη δύναμη επαναφοράς στο μισό. Παρατηρούμε μια ακόμα διαφοροποίηση ως προς την εικόνα του Σχ. 3.14, καθώς εδώ ο χρόνος ανόδου είναι



Σχ. 3.19 Βηματική απόκριση του αξελερόμετρου (με αλλοιωμένη τιμή για τη σεισμική μάζα) από το LTspice.

περίπου 5ms εν αντιθέσει με τα περίπου 3ms που προκύπτουν από τη ΣΜ. Το αποτέλεσμα αυτό της transient analysis είναι ακριβώς το ίδιο χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τα δύο μοντέλα των σχημάτων Σχ. 3.17 και Σχ. 3.18.

Σε αντίθεση με τα «λογικά» αποτελέσματα της transient analysis (λογικά, με τον αστερίσκο της κατάλληλης τροποποίησης για να προκύψουν έτσι) η AC analysis δε δείχνει να προσαρμόζεται στην πραγματικότητα. Εξετάστηκαν τα αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου του Σχ. 3.17 (είσοδος πριν το μηχανικό μέρος), καθώς και με χρήση του μοντέλου του Σχ. 3.18 (είσοδος από το Test Input pin). Το πρώτο μας δίνει μια flat απόκριση από το DC ως τα περίπου 10Hz, ένα συντονισμό (πόλος με ελάχιστη απόσβεση) στα περίπου 40Hz και τέλος ζώνη αποκοπής με μείωση 40dB/dec. Το δεύτερο μας δίνει μια αύξηση του πλάτους για συχνότητες από 1Hz και πάνω με περίπου 40dB/dec. Παρότι η πρώτη περίπτωση θυμίζει κάπως περισσότερο την αληθινή συμπεριφορά, οφείλουμε να απορρίψουμε αμφότερα τα αποτελέσματα ως εντελώς απαράδεκτα (τα διαγράμματα δεν παρατίθενται καν εδώ για να μη δημιουργηθεί σύγχυση στο βιαστικό αναγνώστη). Να σημειωθεί πάντως σε αυτό το σημείο πως η αντίστοιχη προσέγγιση στο LTspice μέσω του ηλεκτρικού αναλόγου του μηχανικού μέρους για τα σεισμόμετρα (είτε με ολοκληρωτή στην έξοδο, είτε με ολοκληρωτή στην ανάδραση) δίνει στις χαμηλές συχνότητες ικανοποιητικά αποτελέσματα στην AC ανάλυση, παραπλήσια με τα πειραματικά παρατηρούμενα, αλλά στις υψηλές συχνότητες και πάλι δεν καταφέρνει να περιγράψει έστω προσεγγιστικά την πραγματικότητα.

### **3.3. Κατασκευή force-balance αξιλερόμετρου στο εργαστήριο**

#### **3.3.1. Επιλογή υλικών ηλεκτρονικού κυκλώματος**

##### **3.3.1.1. Εισαγωγή**

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους το ηλεκτρονικό κύκλωμα που θα υλοποιηθεί στα πλαίσια της εργασίας δε μπορεί να είναι πιστό αντίγραφο εκείνου που κατασκευάζεται για εμπορικούς σκοπούς. Ένας λόγος είναι το γεγονός ότι τα υλικά (κυρίως τα ολοκληρωμένα) SMD που χρησιμοποιούνται στο εμπορικό προϊόν δεν υπάρχουν απαραίτητα και σε DIP package, οπότε για καθένα από αυτά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάτι άλλο αντίστοιχο. Ακόμα όμως και αν υπάρχει το ίδιο σε DIP μπορεί να μην υπάρχει η δυνατότητα για παραγγελία λίγων μόνο τεμαχίων ή το κόστος να είναι απαγορευτικό, τόσο ώστε να στοχεύσουμε σε κάτι υποδεέστερο με την ελπίδα πως θα εξυπηρετήσει το σκοπό μας. Επιπλέον, την τρέχουσα περίοδο (φθινόπωρο 2021), λόγω της παγκόσμιας οικονομικής ανάκαμψης μετά την ύφεση λόγω πανδημίας, παρατηρούνται μεγάλες ελλείψεις στην αγορά

ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, που οδηγούν σε αυξημένα κόστη και μεγάλους χρόνους παράδοσης. Το γεγονός αυτό αποτελεί για εμάς κίνητρο να δοκιμάσουμε τη χρήση κάποιων στοιχείων που υπάρχουν ήδη σε στοκ, παρά να παραγγείλουμε κάποια άλλα, πιθανώς καταλληλότερα. Μια ακόμα δυσκολία στην αναζήτηση υλικών προκύπτει από το γεγονός ότι η εταιρία, μέσω της οποίας έγινε η παραγγελία όσων κρίθηκε σκόπιμο να αγοραστούν, συνεργάζεται μόνο με δύο προμηθεύτριες εταιρίες. Άρα, αν κάποιο προϊόν δεν περιλαμβάνεται στους καταλόγους των δύο αυτών προμηθευτών, οφείλουμε να το ξεχάσουμε και να αναζητήσουμε κάποια άλλη παρεμφερή λύση.

Τέλος, από τη συγγραφή των [58] και [59] πριν οχτώ μήνες ως την ώρα που γράφονταν αυτές οι γραμμές, έχουν προκύψει κάποιες χρήσιμες βελτιώσεις – τροποποιήσεις, που θα επιχειρηθεί να υιοθετηθούν και στην παρούσα εργασία. Για παράδειγμα, στο υψίσυχο τμήμα του κυκλώματος, το οποίο φαίνεται και στο Σχ. 3.6 πως έχει δύο μετασχηματιστές, θα χρησιμοποιηθεί μόνο ένας, ενώ στη θέση του δεύτερου θα μπει ένα κατάλληλα συνδεδεμένο τρίμερ.

Παρότι η επιλογή ενός TE μοιάζει απλή υπόθεση, αποδεικνύεται στην πράξη πως ανάλογα με την λειτουργία που πρέπει να επιτελεί και ανάλογα με τη θέση του στο κύκλωμα και την επίδραση σε αυτό το σημείο των διαφόρων θορύβων, μέσα από μια πληθώρα φαινομενικά κατάλληλων διαθέσιμων επιλογών στον πύργο, τελικά μόνο ένας ταιριάζει. Οι υπόλοιποι μπορεί να οδηγούν σε ακατάληπτη λειτουργία για την οποία δεν προσπαθούμε πάντα να δώσουμε εξήγηση... απλώς δοκιμάζουμε άλλον τελεστικό!

Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως στο εμπορικό προϊόν υπάρχει μια σειρά λειτουργιών που δε θα υλοποιηθούν στην παρούσα εργασία (π.χ. calibration test) και συνεπώς δε θα είναι ίδια ούτε η τοπολογία, ούτε τα χρησιμοποιούμενα ICs. Άλλες διαφοροποιήσεις θα προκύψουν αν υιοθετήσουμε διαφορετική φέρουσα συχνότητα, βελτιωμένα φίλτρα κλπ.

### **3.3.1.2. Τελεστικοί ενισχυτές**

Όπως έχει προαναφερθεί, για την επιλογή TE πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη το κριτήριο της συχνότητας λειτουργίας. Εφόσον πρόκειται για στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στο τμήμα του κυκλώματος όπου τα σήματα μεταβάλλονται με τη φέρουσα συχνότητα αναζητάμε «γρήγορα» στοιχεία με οπωσδήποτε ικανοποιητικές επιδόσεις σε συχνότητες μερικών δεκάδων kHz. Σε κάποιο σημείο του κυκλώματος χρησιμοποιείται ένας TE σε συνδεσμολογία συγκριτή, προκειμένου από το ημίτονο της φέρουσας συχνότητας να δημιουργηθεί παλμός συγχρονισμού για τον decoder. Και για αυτή την εφαρμογή οφείλουμε

να επιλέξουμε έναν γρήγορο ΤΕ, εφόσον δε διαθέτουμε κάποιον ΤΕ υψηλού κόστους ειδικά για λειτουργία σύγκρισης υψηλής συχνότητας.

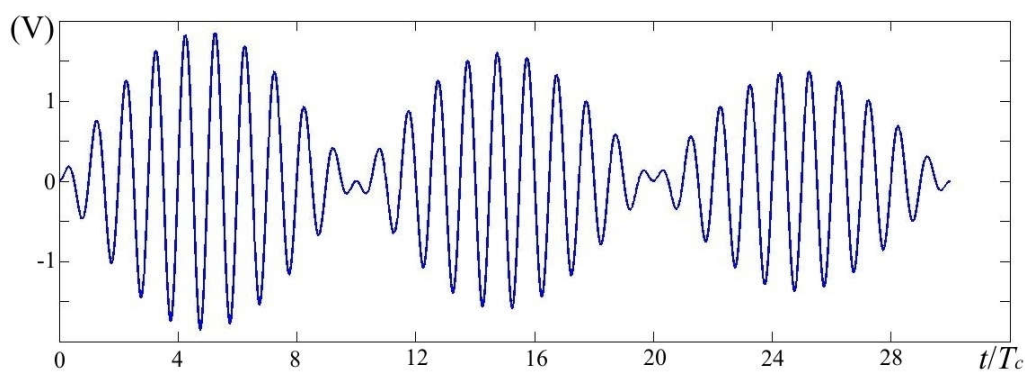
Στα data sheet εκτός από τα διαγράμματα συχνότητας – πλάτους, πολύ σημαντική φαίνεται πως είναι η πληροφορία που προκύπτει από το Slew Rate. Στα δικά μας επί του παρόντος διαθέσιμα στοιχεία το Slew Rate κυμαίνεται στα περίπου 2.5 - 3V/μs για τα πιο γρήγορα από αυτά (OP27 και OP270), 12 - 16V/ms στα πιο αργά (OP29 και OP290), ενώ για τον ΤΕ που χρησιμοποιείται στη μονάδα σύγκρισης (LM7171) είναι 4000V/μs (κατάλληλος για εφαρμογές video ως 100MHz). Ειδικά για το συγκριτή σημαντικό είναι και το propagation delay, το οποίο εν προκειμένω είναι πρακτικά αμελητέο (5ns).

Έχοντας πρώτα ικανοποιήσει το κριτήριο της ταχύτητας για έναν ΤΕ εξετάζουμε και τα υπόλοιπα κριτήρια (noise rejection, DC offset, temperature drift κλπ) προσπαθώντας να επιλέξουμε τον καλύτερο δυνατό για την πρώτη μας δοκιμή, με την ελπίδα πως δε θα χρειαστεί να κάνουμε δεύτερη. Προσοχή χρειάζεται και στις αποδεκτές τάσεις εισόδου, καθώς για κάποια από τα διαθέσιμα στοιχεία μπορεί μεν οι αποδεκτές τιμές για την τάση εισόδου να βρίσκονται στην περιοχή  $\pm V_s$  ( $V_s$  είναι η τάση της διαφορικής τροφοδοσίας), αλλά η επιτρεπτή διαφορική τάση εισόδου δεν επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερη από  $\pm 0.7V$  ή  $\pm 1V$  (για τον LM7171 όμως είναι  $\pm 10V$ ).

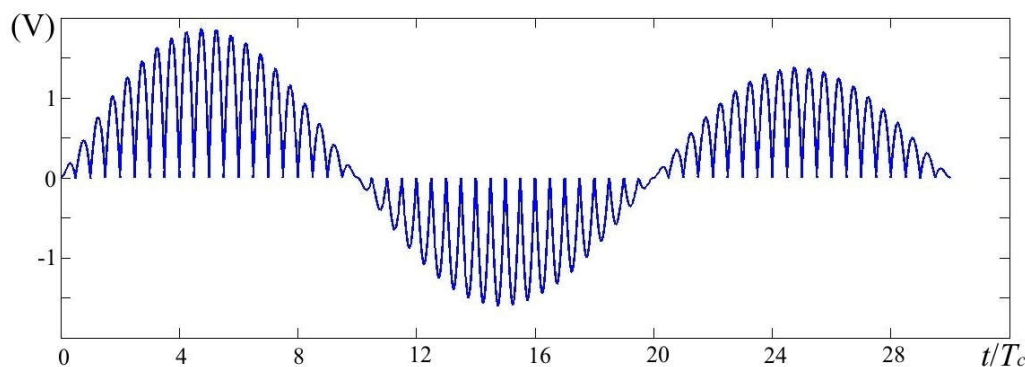
### 3.3.1.3. Αποδιαμορφωτής

Πριν δούμε τον αποδιαμορφωτή που επελέγη θα δούμε πρώτα τη λειτουργία που επιθυμούμε να επιτύχουμε με αυτόν. Η φέρουσα συχνότητα  $f_c$  πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να διέρχεται μέσα από τις μεταβλητές χωρητικότητες του αισθητήρα μετατόπισης, ενώ επίσης πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την μέγιστη συχνότητα χρήσιμου σήματος  $f_{us,max}$ , ώστε η «δειγματοληψία» να είναι ικανοποιητική και η πιστότητα σήματος να είναι υψηλή. Όπως θα γίνει αντιληπτό λίγο πιο κάτω, ουσιαστικά, μέσα από τη διαδικασία διαμόρφωσης – αποδιαμόρφωσης λαμβάνονται για το χρήσιμο σήμα δύο σημεία σε κάθε περίοδο  $T_c=1/f_c$  του φέροντος σήματος, δηλαδή έχουμε μια συχνότητα δειγματοληψίας  $f_{sa}=2f_c$  (προσοχή, ο όρος δειγματοληψία χρησιμοποιείται εδώ καταχρηστικά, δεν υπάρχει καμία ψηφιακή μετατροπή, αναφερόμαστε στη δημιουργία αναλογικού σήματος). Στο A200 είναι  $f_c/f_{us,max}=50$ .

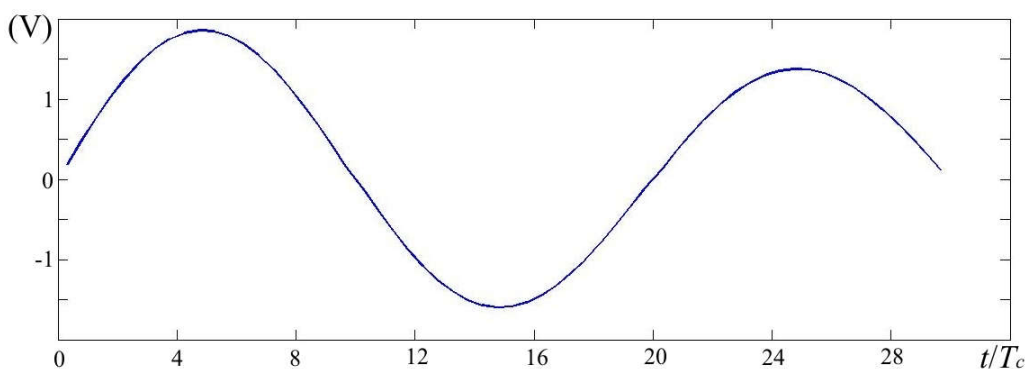
Γράφοντας λίγες γραμμές κώδικα στο Matlab (Παράρτημα III) μπορούμε να προσομοιάσουμε τη διαμόρφωση του φέροντος σήματος από το χωρητικό αισθητήρα μετατόπισης, όπως και τη λειτουργία του αποδιαμορφωτή και μεταξύ άλλων να σχεδιάσουμε τα σήματα εισόδου και εξόδου του για να καταλάβουμε τι ακριβώς κάνει. Στο Σχ. 3.20 βλέπουμε το διαμορφωμένο σήμα, όπως προκύπτει από τον αισθητήρα μετατόπισης, σε μια



Σχ. 3.20 Σήμα του αισθητήρα μετατόπισης σε μια υποτιθέμενη φυσική, αποσβεννύμενη ταλάντωση του μηχανικού συστήματος



Σχ. 3.21 Η έξοδος του αποδιαμορφωτή όταν στην είσοδό του φτάνει το σήμα του Σχ. 3.20.



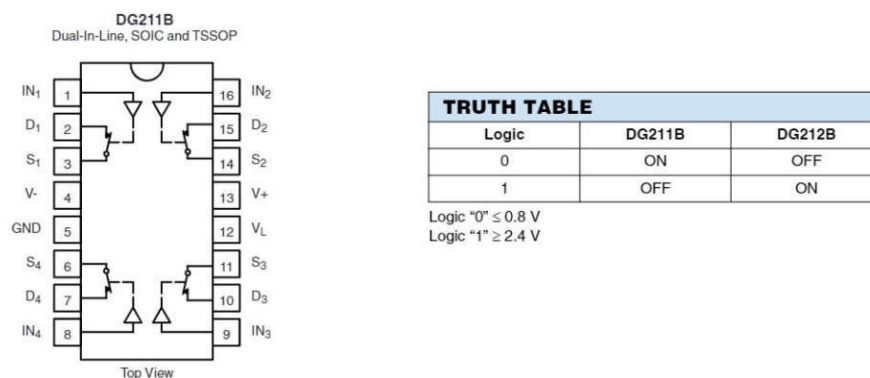
Σχ. 3.22 Τελικό, αποδιαμορφωμένο σήμα εξόδου, μετά και από το καταδιαβατό φίλτρο που συνδέεται στην έξοδο του αποδιαμορφωτή.

υποτιθέμενη περίπτωση φυσικά αποσβεννύμενης ταλάντωσης της σεισμικής μάζας. Η φέρουσα συχνότητα εδώ έχει επιλεγεί πάρα πολύ μικρή ( $f_c/f_{us}=20$ ), ώστε να επιτελέσει η εικόνα το σκοπό της και να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τη λειτουργία του τσιπ, στην πράξη ποτέ ο λόγος  $f_c/f_{us,max}$  δε θα είναι τόσο μικρός. Αν δηλαδή θέλουμε να είναι π.χ.  $f_{us,max}=300\text{Hz}$ , ίσως δοκιμάσουμε χαμηλές φέρουσες συχνότητες ως και  $10\text{kHz}$  ή  $8\text{kHz}$  (προσπαθώντας π.χ. να μειώσουμε την κατανάλωση στο κύκλωμά μας), αλλά μάλλον δε θα είναι καλή ιδέα να προσπαθήσουμε να τη μειώσουμε περισσότερο. Επιπλέον, ας μην ξεχνάμε πως με μείωση της συχνότητας μεγαλώνει το ρεύμα στο μετασχηματιστή που τροφοδοτεί τον αισθητήρα με υψίσυχη εναλλασσόμενη τάση.

Στο Σχ. 3.21 βλέπουμε την έξοδο του αποδιαμορφωτή, ενώ στο Σχ. 3.22 βλέπουμε το τελικό σήμα για τη μετατόπιση της σεισμικής μάζας, όταν η έξοδος του αποδιαμορφωτή διέλθει μέσα από κατάλληλο low pass φίλτρο. Σημειωτέον πως το φίλτρο αυτό πρέπει να τοποθετηθεί όσο πιο κοντά γίνεται στον αποδιαμορφωτή.

Στο εμπορικό προϊόν χρησιμοποιείται το 16pin CMOS ολοκληρωμένο DG211B της Vishay. Περιέχει 4 επαφές/διακόπτες (δύο ακροδέκτες καθ' εκάστη) και έναν ακροδέκτη συγχρονισμού για την κάθε μια. Η κατάσταση της επαφής (open – closed) καθορίζεται από την ψηφιακή στάθμη στο pin συγχρονισμού. Στο Σχ. 3.23 φαίνεται απόσπασμα από το data sheet του DG211B με τους ακροδέκτες και τις λειτουργίες τους. Από τις τέσσερις επαφές οι δύο χρησιμοποιούνται για την αποδιαμόρφωση και ακόμα μία για τη λειτουργία calibration.

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM AND PIN CONFIGURATION

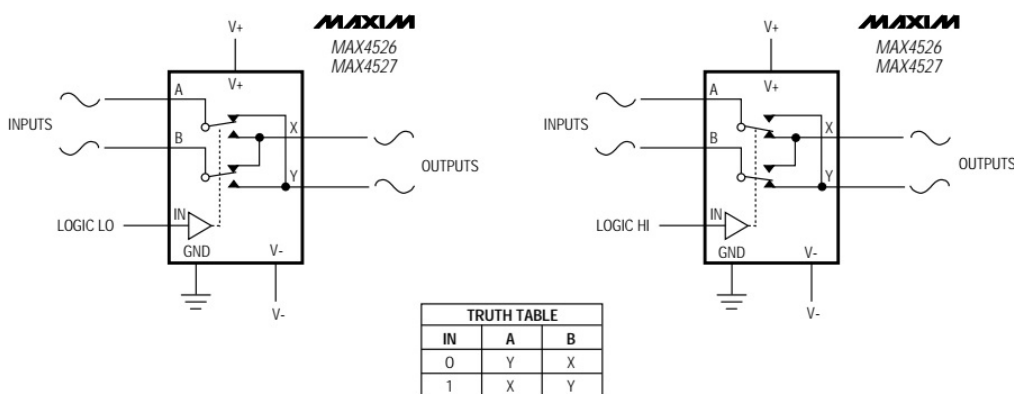


Σχ. 3.23 Απόσπασμα από το data sheet του ολοκληρωμένου DG211B

Η αποδιαμόρφωση επιτυγχάνεται αν στον ένα ακροδέκτη της μιας επαφής βάλουμε το διαμορφωμένο σήμα και κάνουμε το ίδιο στην άλλη επαφή με το ανάστροφο όμως σήμα. Τους δύο ελεύθερους ακροδέκτες των δύο επαφών τους βραχυκυκλώνουμε και ο κόμβος

αυτός αποτελεί την έξοδο του τσιπ. Τις δυο επαφές τις συγχρονίζουμε τη μία με έναν παλμό συχνότητας  $f_c$  και την άλλη με το ανάστροφο αυτού. Έχοντας κάνει τα προηγούμενα, στην έξοδο παίρνουμε σε μια ημιπερίοδο του φέροντος σήματος το διαμορφωμένο σήμα και στην επόμενη ημιπερίοδο το ανάστροφό του, σύμφωνα και με αυτά που είδαμε στο Σχ. 3.21. Αυτό το σήμα εξόδου περνάει μέσα από ένα παθητικό low pass φίλτρο με συχνότητα αποκοπής περί τα 350Hz κι έτσι προκύπτει το τελικό σήμα για τη μετατόπιση της σεισμικής μάζας.

Στη δική μας περίπτωση δεν υπάρχει λειτουργία calibration και συνεπώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα μικρότερο IC (δε χρειαζόμαστε τέσσερις επαφές, μόλις δύο αρκούν). Έτσι, αγοράστηκε το 8pin CMOS κύκλωμα MAX4526 της Maxim, το οποίο λειτουργεί διαφορετικά. Σε αυτό υπάρχουν δύο ακροδέκτες εισόδου (A και B), δύο ακροδέκτες εξόδου (X και Y) και ένα pin συγχρονισμού. Στις θέσεις A και B συνδέουμε και πάλι το διαμορφωμένο σήμα και το ανάστροφό του αντιστοίχως και στο pin συγχρονισμού παλμό συχνότητας  $f_c$ . Η εσωτερική λειτουργία του κυκλώματος είναι, ανάλογα με τη στάθμη του παλμού, να επιλέγεται ποια από τις εισόδους A και B θα συνδεθεί με ποια από τις εξόδους X και Y. Έτσι, στη μία ημιπερίοδο έχουμε συνδεδεμένα τα A-X και B-Y, ενώ στην επόμενη ημιπερίοδο θα είναι συνδεδεμένα τα A-Y και B-X. Ως έξοδο συνδέουμε (π.χ.) το X και το σήμα αυτό το οδηγούμε στο low pass φίλτρο για να προκύψει το σήμα της μετατόπισης της μάζας. Αν πάρουμε το Y θα προκύψει το ίδιο σήμα με πριν αλλά ανεστραμμένο. Στο Σχ. 3.24 βλέπουμε απόσπασμα από το data sheet του MAX4526, στο οποίο αποτυπώνονται οι διάφοροι ακροδέκτες και οι λειτουργίες τους.



Σχ. 3.24 Απόσπασμα από το data sheet του ολοκληρωμένου MAX4526.

Ένα σημαντικό θέμα σχετικά με τον αποδιαμορφωτή είναι ο σωστός χρονισμός έλευσης του σήματος συγχρονισμού: Πρέπει η μετάβαση των επαφών από τη μια κατάσταση στην άλλη να γίνεται ακριβώς κατά τη στιγμή μηδενισμού του διαμορφωμένου σήματος. Σύμφωνα και με τις υποδείξεις του κατασκευαστή αυτό σημαίνει πως ίσως απαιτηθούν κάποιες δοκιμές, κατά τις οποίες ο χρονισμός έλευσης του παλμού μπορεί να τριμαριστεί με τη βοήθεια ενός απλού RC κυκλώματος, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις τιμές των στοιχείων R και C, αν και υπάρχουν και άλλες μέθοδοι. Ένα άλλο θέμα, στο οποίο ήδη αναφερθήκαμε, είναι ο θόρυβος που δημιουργείται, τόσο επί του σήματος εξόδου όσο και προς τις γραμμές τροφοδοσίας, από την υψίσυχη διακοπτική λειτουργία του αποδιαμορφωτή.

#### **3.3.1.4. Άλλα στοιχεία**

Άλλα στοιχεία που παραγγέλθηκαν πριν την έναρξη της υλοποίησης της διάταξης είναι κάποια διακριτά στοιχεία (PNP διπολικά τρανζίστορ, N-Channel JFET), ενώ ένας audio transformer που απαιτείται αντλήθηκε από το στοκ της εταιρίας. Για τα τρανζίστορ έγινε προσπάθεια να αποκτηθούν στοιχεία παραπλήσια σε επιδόσεις με τα SMD που χρησιμοποιούνται για το εμπορικό προϊόν, με βασικά κριτήρια τα ratings τάσης και ρεύματος, τα οποία διαμορφώνουν και τους χρόνους απόκρισης, αλλά και το  $Q$ .

### **3.3.2. Υλοποίηση της διάταξης**

#### **3.3.2.1. Η αρχή είναι το ήμισυ του παντός**

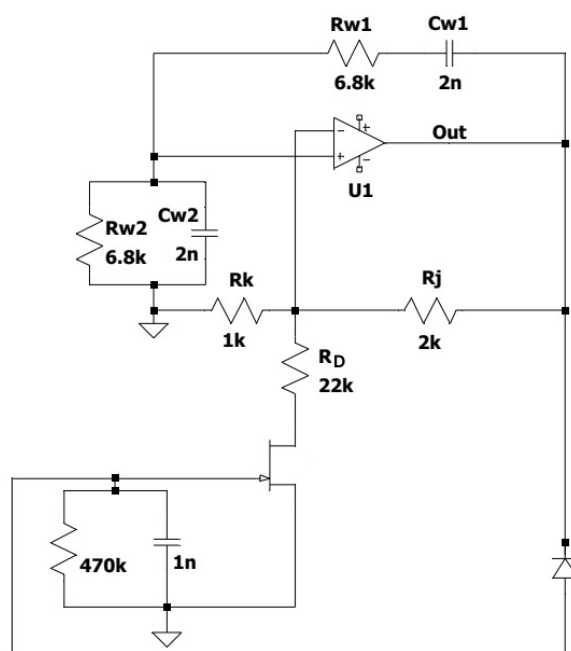
Αφού πρώτα έγινε έλεγχος στα ράφια της εταιρίας και σε εκείνα του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών για οτιδήποτε υπήρχε ήδη διαθέσιμο από τα απαιτούμενα υλικά, ακολούθησε παραγγελία όσων έλειπαν (τρανζίστορς, αποδιαμορφωτής). Breadboard βρέθηκε διαθέσιμο στο Εργαστήριο ΕΗΕ & Αυτοματισμών, το οποίο, αν και πολυκαιρισμένο, προέκυψε, μετά από λεπτομερή έλεγχο, ότι δεν έχει ελαττώματα (βραχυκυκλώματα – ανοιχτοκυκλώματα). Στήθηκε ο πάγκος με dc τροφοδοτικά, πολύμετρο και συχνογεννήτρια. Κάποια εργαλεία αγοράστηκαν και κάποια άλλα βρέθηκαν στην εργαλειοθήκη του σπιτιού. Ο χώρος καθαρίστηκε και τοποθετήθηκε πολύπριζο, ώστε η τροφοδοσία να είναι ανεξάρτητη από εκείνη του γειτονικού πάγκου και να μπορεί να διακόπτεται με ένα κουμπί. Μια και ο χώρος είναι βορινός και δεν κλιματίζεται, ήρθε από το σπίτι αερόθερμο για τις δύσκολες χειμωνιάτικες μέρες. Τέλος, μια και δεν υπήρχε η δυνατότητα για απρόσκοπτη πρόσβαση στους χώρους όπου βρίσκονται τα διάφορα χρήσιμα υλικά (κυρίως πυκνωτές και αντιστάσεις), φροντίστηκε να υπάρχει δυνατότητα για απρόσκοπτη πρόσβαση στα υλικά της



εταιρίας, αλλά και του Εργαστηρίου Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας στο Παν/μιο Πατρών, πολύ χρήσιμες εναλλακτικές, ώστε να είναι εφικτή η εργασία στην περίοδο των χειμερινών εορτών χωρίς να υπάρχει το άγχος «και τώρα;... πού θα βρω οκτάπινη επίχρυση βάση;». Βέβαια, μια σημαντική διέξοδο σε τέτοια προβλήματα, μόνο τις εργάσιμες μέρες όμως, δίνουν και τα καταστήματα ηλεκτρονικών ειδών (έχουμε δύο σε απόσταση πέντε λεπτών οδήγησης).

### 3.3.2.2. Ταλαντωτής

Στην §3.2.2.3 είδαμε μια ενδεικτική τοπολογία γέφυρας Wien με αυτόματη ρύθμιση κέρδους, όπως παρατίθεται στη βιβλιογραφία. Στο Σχ. 3.25 βλέπουμε την τοπολογία που υλοποιήθηκε στην περίπτωση μας. Παρατηρούμε πως το βασικό κύκλωμα είναι το ίδιο: στην



Σχ. 3.25 Η τοπολογία γέφυρας Wien, για τη δημιουργία ημιτονοειδούς τάσης ελεγχόμενου πλάτους, που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

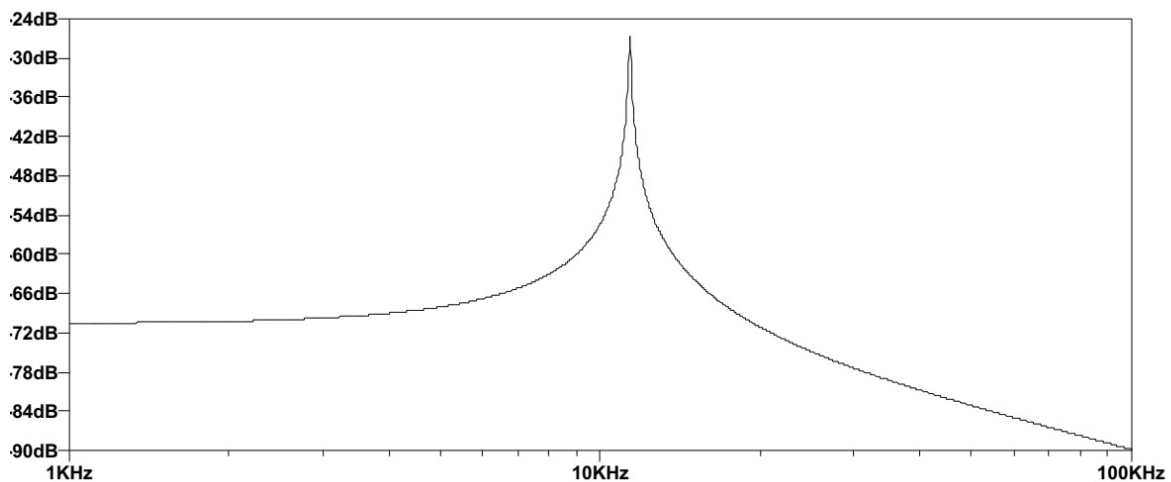
είσοδο σήματος του ΤΕ υπάρχει ένα LPF, ενώ στον κλάδο θετικής ανάδρασης ένα HPF. Με τις τιμές των στοιχείων R-C σε αυτά τα δύο κυκλώματα να είναι ίδιες ( $R_{w1}=R_{w2}=R_w$ ,  $C_{w1}=C_{w2}=C_w$ ), είναι ίδιες και οι συχνότητες αποκοπής τους κι έτσι η προκύπτουσα τοπολογία παρουσιάζει μια πολύ στενή ζώνη διέλευσης ακριβώς στη συχνότητα

$$f_{res} = 1/2\pi R_w C_w \quad (3.18)$$

όπως βλέπουμε και στο Σχ. 3.26. Το κέρδος του δικτύωματος που ορίζουν τα δύο φίλτρα είναι  $A_{fr}=1/3$ , ενώ για να υπάρξει ταλάντωση πρέπει το κέρδος του ΤΕ να είναι  $A_{op}=3$  (ώστε  $A_{fr}A_{op}=1$ ) και επειδή

$$A_{op} = 1 + R_j/R_k \quad (3.19)$$

φροντίζουμε ώστε να είναι  $R_j/R_k=2$  (εδώ είναι 2k/1k). Στο Σχ. 3.10 προτείνεται η χρήση ενός trimmer προκειμένου να επιτύχουμε επακριβώς την τιμή 2 για αυτό το λόγο (εκεί είναι 40k/20k).

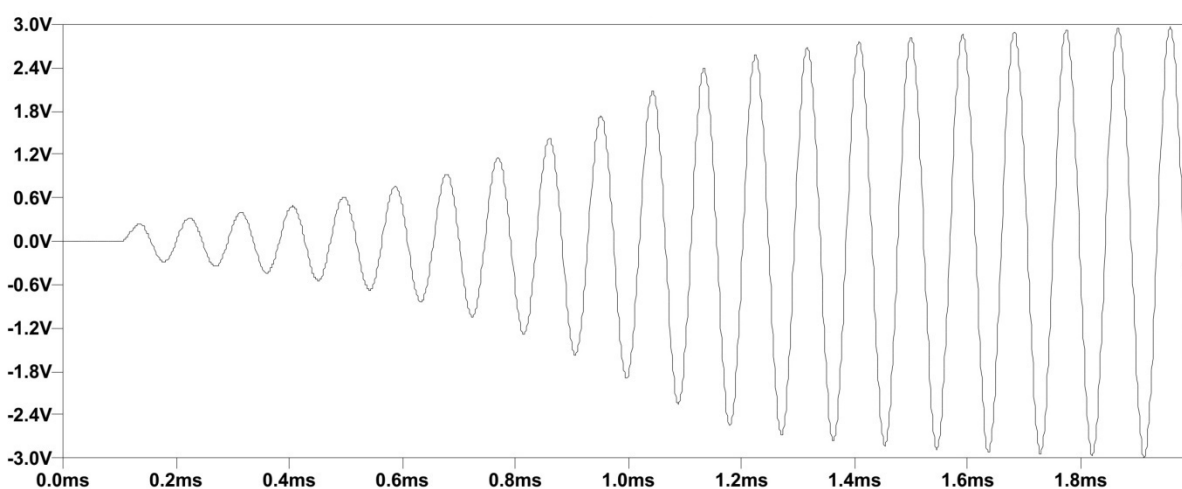


Σχ. 3.26 Απόκριση στο πεδίο συχνότητας της γέφυρας Wien που υλοποιήθηκε (εξομοίωση).

Η γέφυρα με τον ΤΕ και τα στοιχεία R-C γύρω της, αν και θεωρητικά μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, έδειξε στην εξομοίωση πως δεν ανταποκρίνεται σε μια τέτοια προσδοκία (στον πάγκο δε δοκιμάστηκε καν). Το συμπληρωματικό κύκλωμα αυτόματης ρύθμισης του κέρδους φαίνεται πως είναι εντελώς απαραίτητο. Στο κύκλωμα αυτό, με κεντρικό στοιχείο ένα N-channel JFET η ρύθμιση του κέρδους γίνεται με την αντίσταση  $R_D$ , που είναι συνδεδεμένη στο Drain του στοιχείου. Όσο μεγαλύτερη η  $R_D$  τόσο μικρότερο το πλάτος της ταλάντωσης και τόσο μεγαλύτερος ο χρόνος αποκατάστασης ισορροπίας (που, εν πάσει περιπτώσει, είναι ίσος με μερικές περιόδους της ημιτονοειδούς ταλάντωσης). Αυτό όμως που είδαμε πρώτα στην πράξη και μετά επαληθεύσαμε και στην εξομοίωση, είναι πως

η αντίσταση  $R_D$  δε μπορεί να πάρει οσοδήποτε μεγάλες τιμές. Εν προκειμένω, προέκυψε πειραματικά πως μπορούσε να φτάσει ως 47k με την τάση εξόδου να περιορίζεται τότε στο 1.2V<sub>p</sub> περίπου. Σύνδεση μεγαλύτερης  $R_D$  (50k ή μεγαλύτερη) είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη κατάπνιξη της ταλάντωσης. Στην εξομοίωση μπορούσε κανείς να φτάσει έως  $R_D=115k$  και πλάτος εξόδου 0.5V, αλλά δεν πρέπει να ξεχνάμε πως το JFET στο LTspice πιθανότατα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από το χρησιμοποιηθέν.

Στο Σχ. 3.27 βλέπουμε την τάση εξόδου της γέφυρας (εξομοίωση) για τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα, ήτοι  $R_w=6.8k\Omega$ ,  $C_w=2nF$ ,  $R_D=22k\Omega$ . Με αυτές τις τιμές προκύπτει από την (3.18) ότι  $f_{res}=11.7kHz$  (όπως και στην εξομοίωση), ενώ πειραματικά προκύπτει πως είναι 11.2kHz. Αυτή είναι λοιπόν και η φέρουσα συχνότητα  $f_c$  της διάταξης. Πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο πως αν δεν οριστεί στο μοντέλο της εξομοίωσης κάποια είσοδος θορύβου, δεν προκύπτει καμία ταλάντωση. Στο συγκεκριμένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε εφαρμόζεται στην αρχή ένας σύντομος παλμός στην είσοδο (διάρκειας λίγων μs), που δρα ως triggering event για την έναρξη της ταλάντωσης.



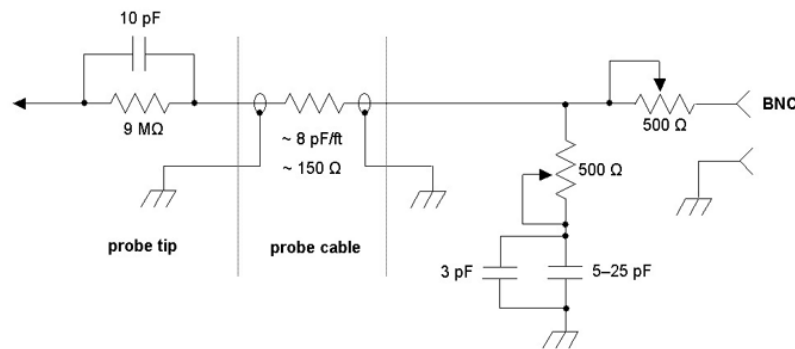
Σχ. 3.27 Η έξοδος της γέφυρας Wien όταν κατά τη στιγμή  $t=0.1ms$  εφαρμόζεται στην είσοδό της ένας σύντομος παλμός διάρκειας λίγων μs (εξομοίωση).

Για τη δίοδο που εμφανίζεται στο κύκλωμα, μια και δεν υπήρχε διαθέσιμη μια μικρή, γρήγορη δίοδος σήματος (π.χ. 1N4148, 200mA, 75V, 4ns), αλλά μόνον δίοδοι ισχύος για ρεύματα 1A ή 2A και τάσεις πολλών εκατοντάδων Volt (κατάλληλες κυρίως για εφαρμογές

50 ως 500Hz), τοποθετήθηκαν σε σειρά δύο μικρές Zener των 10V (4ns), που ξηλώθηκαν από άλλο κύκλωμα.

Ακόμα, να σημειωθεί πως, αν και τα σήματα εισόδου του TE κυμαίνονται περίπου στο 1/3 ως 1/2 της τάσης εξόδου, η μεταξύ τους διαφορά είναι μόλις λίγα mV (κατά τα γνωστά μας από την ανάλυση λειτουργίας ενός TE και τα περί «πλασματικού βραχυκυκλώματος» των δύο εισόδων του) και έτσι δεν παραβιάζεται ο περιορισμός για διαφορική τάση εισόδου μέχρι 0.7V στον OP27 και το ίδιο ισχύει και για επόμενες βαθμίδες με TE. Στη μονάδα σύγκρισης, αν και επιτρέπεται μεγαλύτερη διαφορική τάση εισόδου, μας ενδιαφέρει μόνο το zero crossing αυτής, οπότε με ένα ζεύγος αντιπαράλληλων διόδων την κρατάμε στο εύρος  $\pm 0.6V$ , αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο τη διαίρεση τάσης, μια ενδεχομένως προβληματική επιλογή όταν το σήμα εισόδου είναι ήδη πολύ μικρό.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι αν πάει κανείς να παλμογραφήσει την είσοδο IN(-) του TE θα δει το σήμα εισόδου εκεί (ημίτονο  $0.8V_p$ ), αν όμως πάει να παλμογραφήσει την IN(+), δε θα δει τίποτα. Αυτό συμβαίνει διότι η χωρητικότητα του probe ως προς τη γη (τυπικά κάποιες δεκάδες pF) προστίθεται σε εκείνη του LPF και έτσι το γόνατό του μετατίθεται ελαφρώς αριστερά και πλέον δεν υπάρχει κοινή περιοχή διέλευσης για τα δυο φίλτρα, οπότε η ταλάντωση διακόπτεται. Αντίστοιχα προβλήματα (χωρίς μάλιστα να γίνει αμέσως αντιληπτή η αιτία τους) προκλήθηκαν όταν επιχειρήθηκε η παλμογράφιση της εξόδου της μονάδας σύγκρισης που υπάρχει στο κύκλωμα για το συγχρονισμό του αποδιαμορφωτή. Γενικά, καλό είναι να θυμόμαστε πάντα πως προβλήματα λόγω της χωρητικότητας των probes μπορούν να ανακύψουν σε διάφορες περιστάσεις και ειδικότερα παλμογραφώντας σήματα εξόδου από μονάδες με μικρή ικανότητα οδήγησης χωρητικών φορτίων ή σε κυκλώματα με υψίσυχνα σήματα και ευαίσθητα σε αλλαγή φάσης λόγω παρασιτικών χωρητικότητων (βλ. π.χ [60], [61]). Καταγραφή αυτών των σημάτων είναι συνήθως δυνατή με ένα voltage active differential probe (π.χ. κάποιο από τα μοντέλα HZ100/109/115 της Hameg), που έχει συγκριτικά πολύ μικρή χωρητικότητα εισόδου (τυπικά κυμαίνεται από 1 ως 5pF [57]). Στο Σχ. 3.28 βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα ενός passive voltage probe που ο γράφων έχει χρησιμοποιήσει στις εργασίες [60], [61], το οποίο παρουσιάζει μεν αρκετά μικρότερη παρασιτική χωρητικότητα σε σχέση με τα συνηθισμένα χαμηλού κόστους – γενικής χρήσης probes που διατίθενται στα πανεπιστημιακά εργαστήρια, αλλά αρκετή για να δημιουργήσει τα γνωστά προβλήματα.



Agilent 1161A equivalent circuit

Σχ. 3.28 Ισοδύναμο κύκλωμα του passive voltage probe 1161A της Agilent.

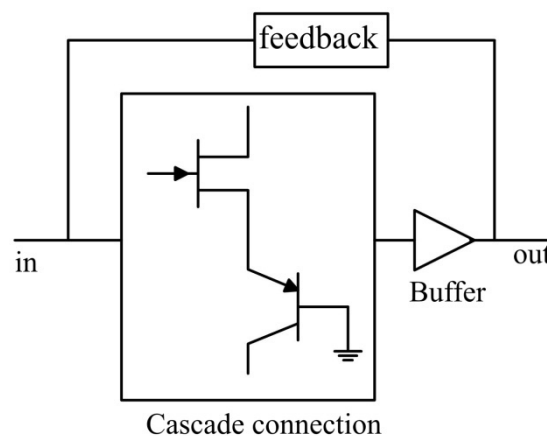
### 3.3.2.3. Μετασχηματιστής και χωρητικός αισθητήρας μετατόπισης

Το σήμα εξόδου του ταλαντωτή οδηγείται σε δυο buffers, ο ένας σε αναστρέφουσα και άλλος σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία. Με κατάλληλη ρύθμιση του κέρδους έχουμε δύο ημιτονοειδείς τάσεις  $15V_{pp}$  με διαφορά φάσης  $180^\circ$  τις οποίες εφαρμόζουμε στους δύο ακροδέκτες του πρωτεύοντος ενός audio Μ/Σ με λόγο μετασχηματισμού 1:1 και οι δύο ακροδέκτες εξόδου του Μ/Σ συνδέονται στους σταθερούς οπλισμούς του χωρητικού αισθητήρα μετατόπισης (Σχ. 3.11). Ακριβώς στην έξοδο του Μ/Σ τοποθετείται ένα trimmer με τη μεσαία του λήψη να συνδέεται στη γη μέσω αντιστάσεως. Με αυτό το trimmer μπορούμε να διορθώσουμε τυχόν ασυμμετρία στο παραγόμενο ημίτονο και να εξασφαλίσουμε πως οι peak τιμές και στις δύο ημιπεριόδους είναι απολύτως ίσες. Λίγη προσοχή χρειάζεται στην τιμή αυτού του trimmer, καθόσον η ωμική αντίσταση σε κάθε τύλιγμα του Μ/Σ είναι  $600\Omega$  και μαζί και με την όποια σκέδαση υπάρχει έχουμε μια εμπέδηση από το πρωτεύον ως το δευτερεύον περίπου  $1.5k\Omega - 2k\Omega$  και συνεπώς trimmer συγκρίσιμης τιμής προκαλεί μια απαράδεκτη πτώση τάσης. Ενδεικτικά, με 28V στην είσοδο παίρνουμε 25V εν κενώ στην έξοδο και αν συνδέσουμε αντίσταση  $1k\Omega$  προκύπτουν τελικά 20V. Εμείς προτιμήσαμε ένα συνδυασμό δύο αντιστάσεων  $1.5k\Omega$  με trimmer  $1k\Omega$  στη μέση (δηλαδή  $4k\Omega$  σύνολο) εξασφαλίζοντας αμελητέα πτώση τάσης.

### 3.3.2.4. Audio preamplifier υψηλής εμπέδησης εισόδου

Αυτό το οποίο στα Σχ. 3.1 και Σχ. 3.11 αναφέρεται ως ενισχυτής  $A_1$  περιλαμβάνει δύο τρανζίστορ σε κασκαδική σύνδεση ακολουθούμενα από έναν buffer, καθώς και κατάλληλη

ανάδραση (Σχ. 3.29). Κρίσιμης σημασίας σε αυτή τη σύνδεση αποδεικνύεται η ακριβής τιμή της ανάδρασης ώστε να αποκόψει τον common mode ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Στις δικές μας δοκιμές, με λάθος ανάδραση είχαμε έναν απαράδεκτα μεγάλο θόρυβο στο διαμορφωμένο σήμα, της τάξης του 0.5V, σε συχνότητα 50Hz. Υπενθυμίζεται πως σε όλη τη διαδικασία υλοποίησης του κυκλώματος η διάταξη είναι εντελώς απροστάτευτη από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, χωρίς μεταλλικό περίβλημα (όπως έχει για παράδειγμα το εμπορικό προϊόν), ενώ ακόμη και τα probes του παλμογράφου, αν είναι ασύνδετα, δίνουν από μόνα τους μια καταγραφή 0.1V<sub>pp</sub> στα 50Hz η οποία διπλασιάζεται αν τα ακουμπήσουμε στο κύκλωμα χωρίς όμως να το έχουμε θέσει σε λειτουργία. Δηλαδή τελικά, μια ανεπαίσθητη κυμάτωση στα 50Hz που βλέπουμε στο τελικό χρήσιμο σήμα μας, ενδέχεται σε μεγάλο βαθμό να οφείλεται στα καλώδια του μετρητικού μας συστήματος και να μην είναι αληθινός θόρυβος στο κύκλωμα.



Σχ. 3.29 Γενική μορφή του audio preamplifier που δέχεται το διαμορφωμένο από τον αισθητήρα υψίσυχο σήμα.

Το σήμα εξόδου του preamplifier έχει μια σταθερή dc συνιστώσα 1.5V. Με διαδοχικές δοκιμές προέκυψε πως για να κλιπάρει αυτό το σήμα, να φτάσει δηλαδή στα 15V (στη μία μόνο πλευρά του λόγω της dc μετατόπισης) πρέπει οι δύο χωρητικότητες του σένσορα να έχουν λόγο 13:1. Με λίγες πράξεις βρίσκουμε πως αυτό θα συνέβαινε αν η σεισμική μάζα εκτρεπόταν από τη θέση ισορροπίας της κατά 0.43mm, κάτι το οποίο έχουμε ήδη αναφέρει πως ουδέποτε θα συμβεί σε λειτουργία κλειστού βρόχου (§ 3.2.2.5).

Σε όλες τις βαθμίδες με TE του ανοιχτού βρόχου τα κέρδη είναι μεγαλύτερα της μονάδας και τέτοια ώστε το σήμα ΠPIN τον ενισχυτή που υπάρχει ακριβώς στην έξοδο να είναι

μικρότερο από 2.5V/g σε λειτουργία κλειστού βρόχου. Με ρύθμιση του κέρδους αυτού του τελευταίου ενισχυτή (επίσης μεγαλύτερου της μονάδας) φροντίζουμε για τα V/g τελικού σήματος και κατόπιν τούτου έχουμε εξασφαλίσει πως σε διέγερση ίση ή μεγαλύτερη από 4g η πρώτη μονάδα που θα κλιπάρει είναι ο ενισχυτής εξόδου.

### **3.3.2.5. Φίλτρο και έξοδος**

Η έξοδος του audio preamplifier συνδέεται σε ένα ζεύγος TE εκ των οποίων ο ένας εκτελεί ενίσχυση του σήματος και ο άλλος αναστροφή του ενισχυμένου σήματος και τα δύο αυτά σήματα οδηγούνται στις εισόδους A και B του αποδιαμορφωτή. Στην έξοδο του αποδιαμορφωτή (χρησιμοποιείται η μία έξοδος, ενώ η άλλη συνδέθηκε μέσω αντιστάσεως στη γη) τοποθετήθηκε παθητικό βαθυπερατό φίλτρο 2ης τάξης με συχνότητα αποκοπής 484Hz, το οποίο ακολουθείται από ενισχυτή με TE. Σε αυτόν τον τελευταίο ενισχυτή η ενίσχυση ρυθμίζεται με τρίμερ και μέσω αυτής της ρύθμισης επεμβαίνουμε στο κέρδος ανοιχτού βρόχου. Η έξοδος αυτού του ενισχυτή είναι και το σήμα ενδιαφέροντος το οποίο βγάζουμε έξω περνώντας από μία τελευταία ενισχυτική μονάδα, της οποίας ρόλος, όπως προαναφέρθη, είναι να καθορίζει επακριβώς τα V/g της διάταξής μας, οπότε και σε αυτή χρησιμοποιούμε ένα τρίμερ για να πετύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η πράξη έδειξε πως τα δύο αυτά τρίμερ αποτελούν σημαντικές πηγές θορύβου για το τελικό μας σήμα και έτσι, μετά τις τελικές ρυθμίσεις και τον προσδιορισμό της τιμής τους για τη σωστή λειτουργία του αξελερόμετρου αντικαταστάθηκαν από κανονικές αντιστάσεις 0.25W παραπλήσιας τιμής.

### **3.3.2.6. Κλάδος ανάδρασης**

Στον κλάδο ανάδρασης αρχικά υλοποιήθηκε το σχέδιο του εμπορικού προϊόντος, αλλά γρήγορα έγινε σαφές ότι το αξελερόμετρο δε μπορεί να λειτουργήσει και πως χρειάζεται λίγο περισσότερη προσπάθεια από μια απλή μεταφορά του πρωτότυπου σχεδίου στο breadboard.

Με την ολοκλήρωση του κλειστού βρόχου, οι πρώτες δοκιμές (απαλά χτυπήματα του σένσορα με ένα στυλό) έδειξαν πως η σεισμική μάζα ταλαντωνόταν στη φυσική της συχνότητα (περίπου 50Hz) κάνοντας μια αργά αποσβεννύμενη ταλάντωση παρά στη φυσική συχνότητα του κλειστού βρόχου (αναμέναμε κάτι περισσότερο από 100Hz). Αυτό υποδείκνυε ότι ο ηλεκτρομαγνήτης δεν ασκούσε επαρκή δύναμη επαναφοράς στο μηχανικό μέρος. Προσπάθειες για ρύθμιση του κέρδους στον κλάδο ανάδρασης απέτυχαν να βελτιώσουν την κατάσταση. Η όλη συμπεριφορά μελετήθηκε ακόμα καλύτερα με την παλμική διέγερση του συστήματος σε συχνότητα 10Hz από τον ακροδέκτη test input και τη χρήση συχνογεννήτριας. Ήταν σχεδόν προφανές ότι ο TE ενισχυτής στην έξοδο της μονάδας

ενίσχυσης του ρεύματος ανατροφοδότησης δεν ήταν ικανός να οδηγήσει τα πηνία του ηλεκτρομαγνήτη. Παρότι οι υπολογισμοί έδειχναν πως το απαιτούμενο ρεύμα δε αναμενόταν να υπερβαίνει τα 20mA και παρότι ο συγκεκριμένος TE (OP270) είχε προδιαγραφές για ρεύμα εξόδου έως και 20mA, η όλη εικόνα έδειχνε πως λειτουργούσε στα όριά του και δεν κατάφερε να κινήσει σωστά τη σεισμική μάζα. Λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι στο βιομηχανικό σχέδιο χρησιμοποιείται εκεί ένας TE με maximum output drive ίσο με αρκετές δεκάδες mA, τοποθετήθηκε τελικά ο LM7171 (ο ίδιος που λόγω υψηλού slew rate χρησιμοποιήθηκε και ως comparator), με ικανότητα ρεύματος εξόδου 100mA. Αυτή η τροποποίηση επέφερε άμεσα βελτίωση της κίνησης της μάζας, που έδειχνε πλέον να αποκρίνεται καλύτερα τόσο στην εξωτερική παλμική διέγερση όσο και στη λειτουργία του κλειστού βρόχου και στις ρυθμίσεις κέρδους του feedback.

Το νέο πρόβλημα που προέκυψε με την τοποθέτηση «δυνατού» TE στο τέλος του κλάδου ανάδρασης ήταν η εμφάνιση ενός υψίσυχνου θορύβου σε όλο τον κλειστό βρόχο και η συνεπακόλουθη υπερθέρμανση αυτού του TE οδήγησης των πηνίων. Η λύση δόθηκε με δραστική μείωση της τιμής του αντιπαρασιτικού πυκνωτή παράλληλα στο πηνίο (9pF από αρκετά nF που προτεινόταν στο αρχικό σχέδιο) και τοποθέτηση αντίστασης 100Ω πριν από αυτόν, υλοποιώντας έτσι ένα υποτυπώδες φίλτρο και περιορίζοντας ταυτόχρονα το ρεύμα προς αυτόν τον πυκνωτή. Η εικόνα στο παλμογράφο «καθάρισε» για τα καλά!...

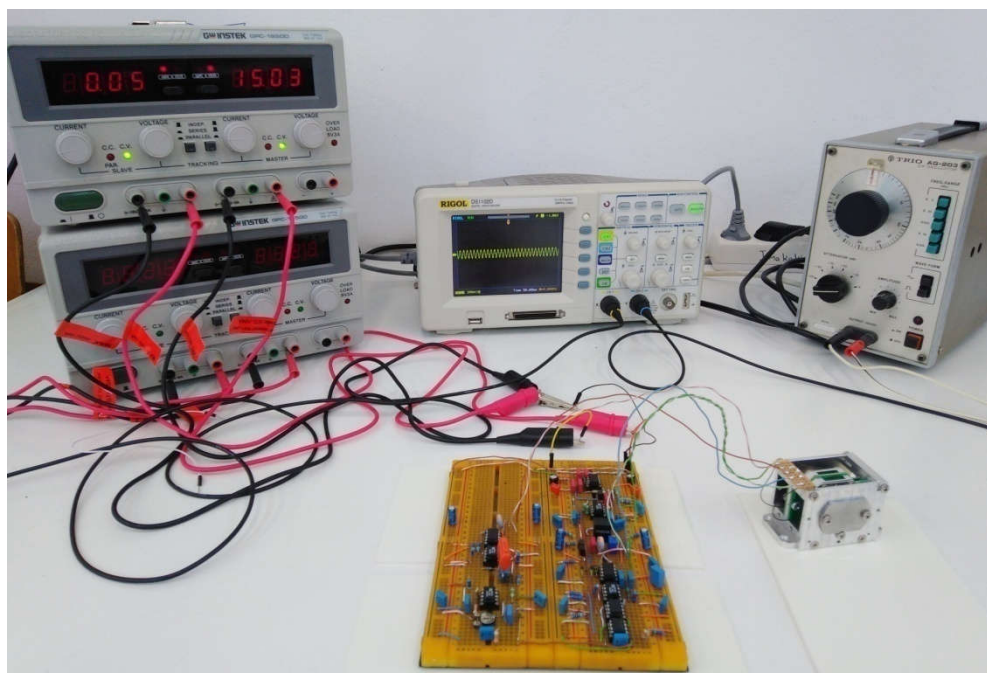
Τελικό βήμα υπήρξε η ρύθμιση των παραμέτρων του PD ελέγχου. Στη βηματική απόκριση υπήρχε ένα απαράδεκτα μεγάλο overshoot και μια απαράδεκτα αργή απόσβεση της ταλάντωσης. Έτσι, αντί για τα προτεινόμενα  $C_d$  και  $R_p$ , συνδέθηκαν στοιχεία με τιμές 1.2μF και 39kΩ αντίστοιχα, με το αποτέλεσμα να αποτυπώνεται σε όσα θα δούμε στην επόμενη παράγραφο.

### **3.3.3. Δοκιμές λειτουργίας, αποτελέσματα – κυματομορφές.**

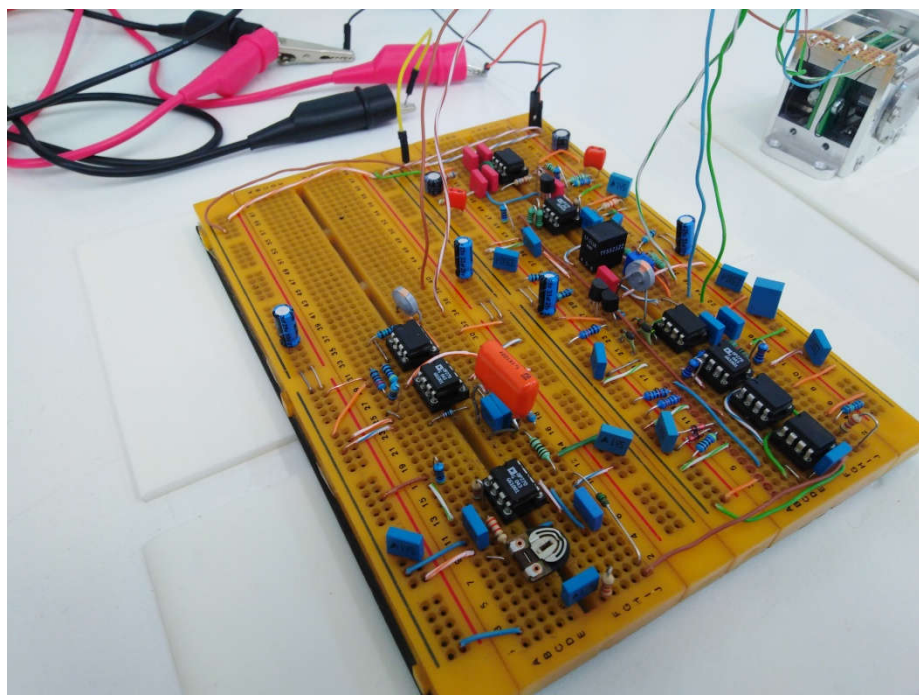
Στο Σχ. 3.30 βρίσκεται μια φωτογραφία της όλης πειραματικής διάταξης, στο Σχ. 3.31 ένα πιο κοντινό πλάνο του κυκλώματος, ενώ στο Σχ. 3.32 είναι μια ακόμα πιο κοντινή λήψη του σένσορα, στην οποία διακρίνονται τα πολύ λεπτά σύρματα που έρχονται από την κινούμενη πλάκα (οι δύο ακροδέκτες του πηνίου και ο αγωγός από τον κινητό σπλισμό του αισθητήρα). Η διάτρητη που υπάρχει εκεί κολλήθηκε πρόσθετα, ώστε να μη ρισκάρουμε καταστροφή των λεπτών αυτών αγωγών σε περίπτωση που χρειάζονταν κάποιες επεμβάσεις αργότερα. Τα δυο πιο χοντρά, μονωμένα σύρματα που καταλήγουν σε αυτή συνδέονται με τους ακίνητους σπλισμούς του αισθητήρα. Η αντίσταση του πηνίου μετρήθηκε και βρέθηκε ίση με 736Ω. Η κατανάλωση σε κατάσταση ηρεμίας είναι 50mA και σε κατάσταση λειτουργίας του



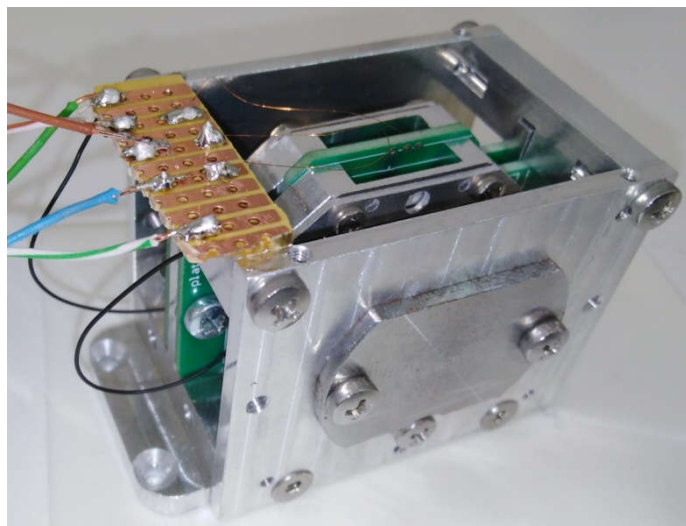
ηλεκτρομαγνήτη 60mA, δηλαδή 1.5W και 1.8W αντίστοιχα (έχουμε 30V διαφορικής τροφοδοσίας).



Σχ. 3.30 Η πειραματική διάταξη. Διακρίνονται το breadboard με το σένσορα, τα τροφοδοτικά, ο παλμογράφος και η συχνογεννήτρια.

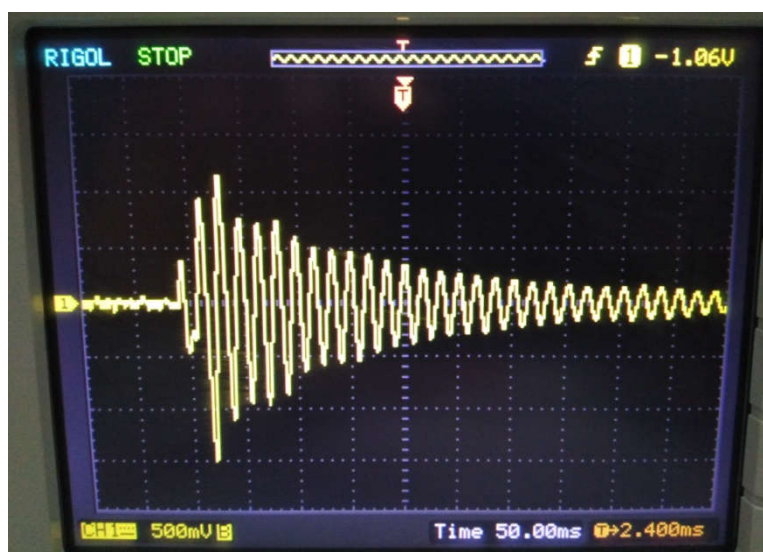


Σχ. 3.31 Κοντινή λήψη του κυκλώματος. Όλες οι υψίσυχνες λειτουργίες στη φέρουσα συχνότητα βρίσκονται στη δεξιά πλευρά, ενώ όσες σχετίζονται με το σεισμικό σήμα στην αριστερή.



Σχ. 3.32 Ο χωρητικός σένσορας μετατόπισης.

Στο Σχ. 3.33 βλέπουμε την έξοδο, σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου, μετά από ένα ελαφρύ χτύπημα του σένσορα με ένα στυλό. Αυτό που καταγράφεται είναι η ελεύθερη ταλάντωση του συστήματος μάζας – ελατηρίου. Η συχνότητα αυτής της ταλάντωσης είναι 55Hz.



Σχ. 3.33 Ελεύθερη ταλάντωση του συστήματος μάζας – ελατηρίου.

Στο Σχ. 3.34 βρίσκεται το παλμογράφημα με την απόκριση του συστήματος σε βηματική διέγερση (παλμός ρεύματος, συχνότητας περίπου 10Hz, μέσω του ακροδέκτη test input). Το overshoot βεβαίως και δεν είναι 7% όπως στο βιομηχανικό προϊόν, αλλά περίπου 70%, ό,τι καλύτερο μπορούσαμε να πετύχουμε μετά από σειρά δοκιμών για το κέρδος του feedback και

για τις PD παραμέτρους. Από αυτό το παλμογράφημα μπορούμε να προσδιορίσουμε τη φυσική συχνότητα του κλειστού βρόχου την οποία και βρίσκουμε ίση με 83Hz, η μισή από την αντίστοιχη του εμπορικού προϊόντος.



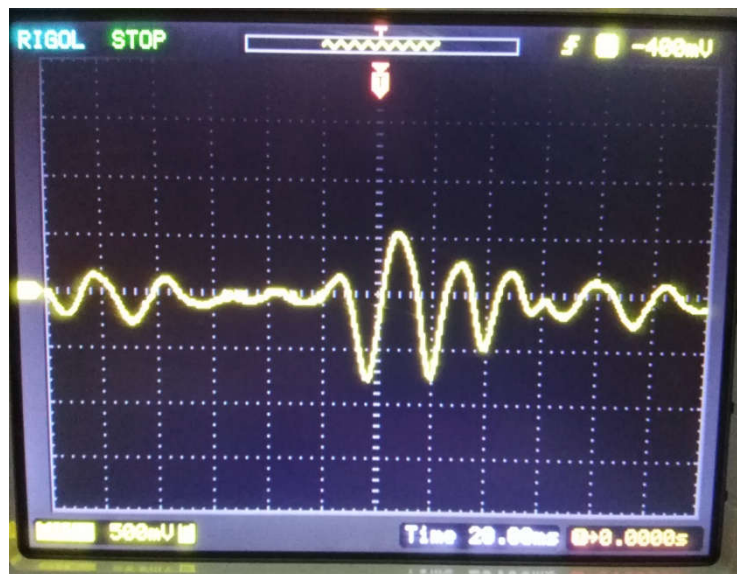
Σχ. 3.34 Βηματική απόκριση.



Σχ. 3.35 Καταγραφή ελαφρού χτυπήματος του σένσορα.

Στα σχήματα Σχ. 3.35 και Σχ. 3.36 βλέπουμε δυο δοκιμαστικές καταγραφές. Η πρώτη προκύπτει από ένα απαλό, κοφτό χτύπημα στο σένσορα με ένα κατσαβίδι (περίοδος περίπου 12ms) και η δεύτερη από ένα χτύπημα στο τραπέζι (περίοδος περίπου 20ms). Παρότι ο

μηχανισμός φαίνεται να παρακολουθεί ικανοποιητικά τις δονήσεις που επιβάλλουμε στο μεταλλικό πλαίσιο, εμείς, με δεδομένο το 70% overshoot της βηματικής απόκρισης,



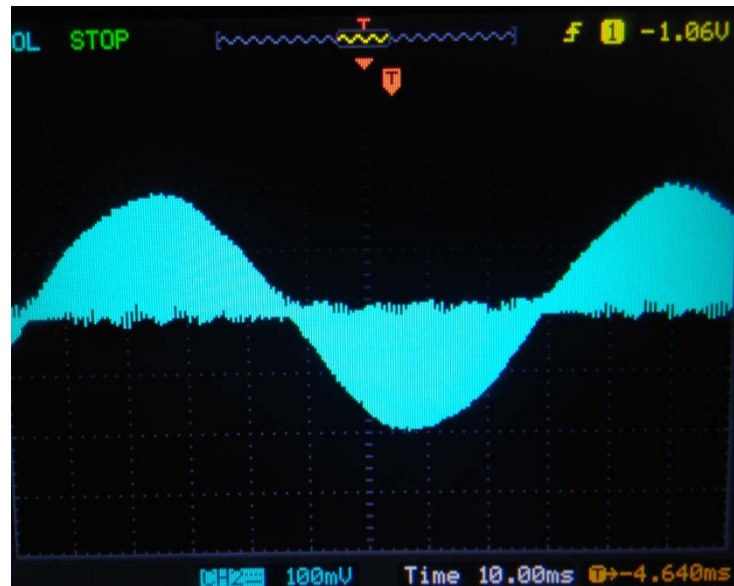
Σχ. 3.36 Καταγραφή χτυπήματος στο τραπέζι.

μπορούμε να είμαστε βέβαιοι ότι δεν πρόκειται για πιστή καταγραφή της πραγματικότητας. Μετά από σειρά άλλων δοκιμών στο βιομηχανικό προϊόν, το τελικό τεστ πριν μπει στο κουτί για να αποσταλεί στον παραλήπτη, δεν είναι κάτι περισσότερο από ένα χτύπημα σαν αυτό που απεικονίζεται στο Σχ. 3.35. Με το χτύπημα σε κάθε σένσορα που δοκιμάζεται να γίνεται σε συγκεκριμένη διεύθυνση και με προσεγγιστικά δεδομένη ένταση περιμένουμε να δούμε την ίδια περίπου εικόνα. Έτσι, με αυτόν τον έλεγχο της τελευταίας στιγμής, μπορεί να αποφευχθεί κάποιο τυχόν σημαντικό λάθος στη ρύθμιση του κέρδους του σένσορα (ή και του digitizer αν δοκιμάζονται ως ζεύγος) ή στην πολικότητα της τάσης εξόδου (πρέπει το αρχικό μέτωπο της δόνησης να εκτείνεται προς την ίδια κατεύθυνση στο σήμα εξόδου).

Στο Σχ. 3.37 βλέπουμε την τάση στην έξοδο του αποδιαμορφωτή όταν το σύστημα διεγείρεται με ημιτονοειδές σήμα περίπου 12Hz μέσω του ακροδέκτη test input, ενώ στο Σχ. 3.38 όταν ασκείται παλμική διέγερση ίδιας συχνότητας.

Στη συνέχεια έγινε μια προσπάθεια να αποτυπώσουμε το θόρυβο στην έξοδο της διάταξης. Στο παλμογράφημα του Σχ. 3.39 αποτυπώνεται μια κυμάτωση στα περίπου 50Hz πλάτους περίπου  $7.5mV_p$ , πάνω στην οποία υπερτίθεται ένας υψίσυχνος θόρυβος πλάτους περίπου  $3mV_p$ , τον οποίο με αλλαγή της κλίμακας χρόνου βλέπουμε καλύτερα στο Σχ. 3.40. Αν κλίνουμε το σένσορα κατά  $90^\circ$  διαπιστώνουμε πως με τις υπάρχουσες ρυθμίσεις κέρδους η συνολική διάταξη έχει ευαισθησία  $1V/g$ . Αν λοιπόν περιορίσουμε τις μέγιστες απαιτήσεις

μας για τις μετρήσιμες επιταχύνσεις στα 4g τότε η σχέση μέγιστης τάσης εξόδου σήματος και θορύβου (dynamic range) είναι στα 54dB (4V/7.5mV), πολύ μακριά από τα εμπορικά 150dB, χωρίς μάλιστα να είναι βέβαιο πως με αύξηση του κέρδους, ώστε τα 4g να αντιστοιχούν σε π.χ. 10V στην έξοδο, αυτή η σχέση θα παραμείνει ίδια.



Σχ. 3.37 Η έξοδος του αποδιαμορφωτή με ημιτονική διέγερση.



Σχ. 3.38 Η έξοδος του αποδιαμορφωτή με παλμική διέγερση.

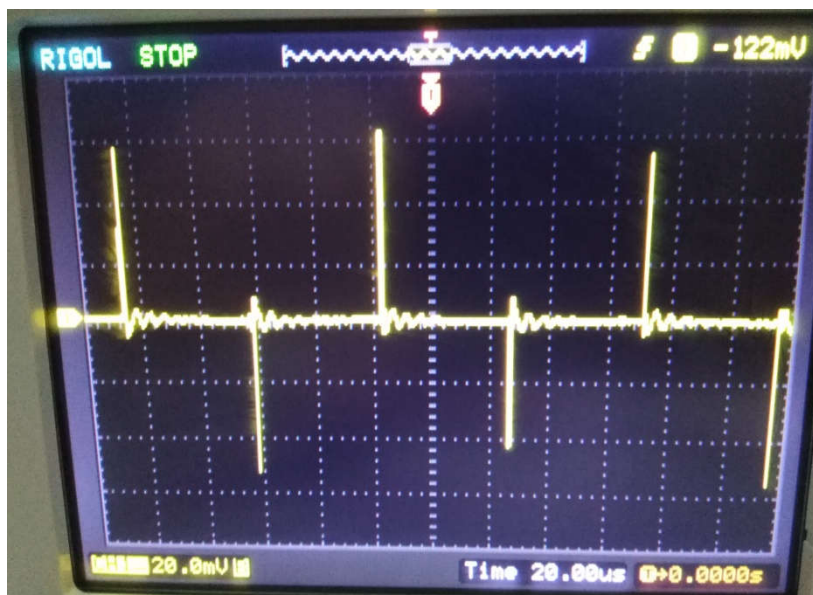
Δεν πρέπει βέβαια να ξεχνάμε πως ο θόρυβος των 50Hz ίσως είναι EMI από τις γύρω συσκευές, ίσως όμως και να είναι μηχανικός θόρυβος, καθώς ο σένσορας βρίσκεται πάνω στον ίδιο πάγκο με τα εν λειτουργία μηχανήματα (δονήσεις του πάγκου και ήχος) και τίποτα από αυτά να μην υφίστατο σε σωστές συνθήκες δοκιμής. Κανονικά ο πάγκος δεν πρέπει να φιλοξενεί τίποτα άλλο εκτός από το υπό δοκιμή σύστημα (τροφοδοτικά – παλμογράφος κλπ. να βρίσκονται σε ράφι επί του τοίχου), ενώ ιδανικά πρέπει να έχουμε τον σένσορα μαζί με τον digitizer σε μια ήσυχη γωνιά της εγκατάστασης (π.χ. κάπου στο υπόγειο ή σε μια αποθήκη στην άλλη άκρη του κτήματος) και να παρακολουθούμε την έξοδο σε έναν υπολογιστή στο γραφείο μας.



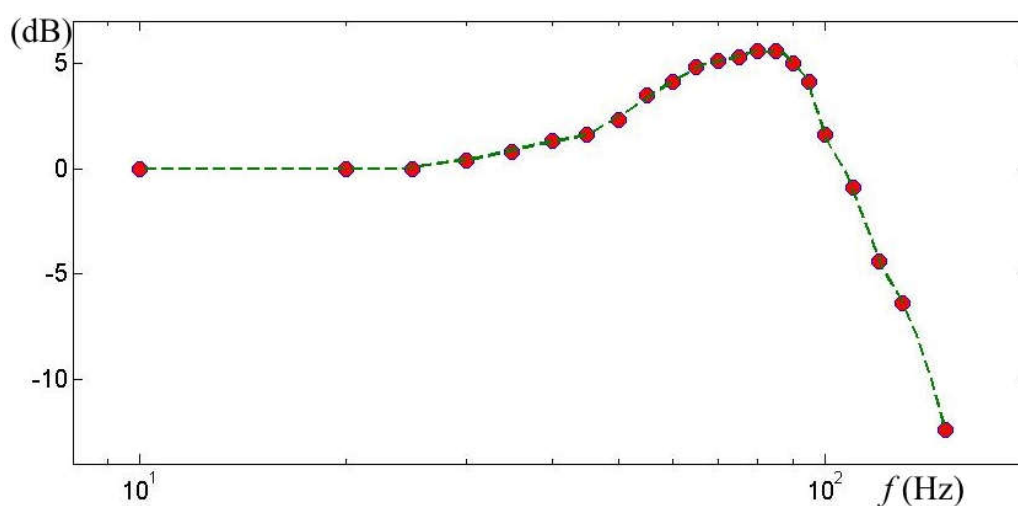
Σχ. 3.39 Θόρυβος 50Hz πάνω στον οποίο υπερτίθεται υψίσυχνος θόρυβος από τη λειτουργία 11kHz της διάταξης.

Στο Σχ. 3.40 βλέπουμε καλύτερα τον υψίσυχνο θόρυβο. Έρχεται στη φέρουσα συχνότητα και είναι πλέον του προφανούς πως σχετίζεται είτε με τη λειτουργία του comparator, είτε με τη διακοπτική λειτουργία του αποδιαμορφωτή, είτε και των δύο. Τα spikes έχουν τιμή ως και 60mV ενώ η ταλάντωση αντιστοιχεί σε αυτά τα περίπου 3mV<sub>p</sub> που αναφέρθηκαν και παραπάνω. Τα spikes αυτά είναι σκέτη καταστροφή για το σήμα εξόδου αν θέλαμε να έχουμε ένα αξιόπιστο αξελερόμετρο, θεωρητικά όμως θα μπορούσαμε εύκολα να τα απαλείψουμε. Αν τα spikes απαλείφονταν και αποδεικνυόταν πως ο θόρυβος των 50Hz είναι μια πλασματική ένδειξη στον παλμογράφο λόγω κακού στησίματος της δοκιμής, θα μέναμε με τα 3mV<sub>p</sub> και ένα dynamic range περί τα 62dB, και πάλι πάρα πολύ μακριά από τα 150dB του εμπορικού προϊόντος. Μην ξεχνάμε πάντως πως ο παραπάνω υπολογισμός είναι εξαιρετικά προσεγγιστικός, καθώς για τον προσδιορισμό του dynamic range δεν αρκεί να δούμε στο σήμα το πλάτος του θορύβου, αλλά να προσδιορίσουμε την ενέργειά του μέσα από

διάγραμμα φάσματος. Στην προκειμένη περίπτωση το πλάτος θορύβου θα προέκυπτε αρκετά μικρότερο από  $3\text{mV}_p$  διότι η ταλάντωση αυτή υφίσταται μόνο σε τμήμα της φέρουσας περιόδου  $T_c$ .



Σχ. 3.40 Ζουμάρισμα στον υψίσυχο θόρυβο.



Σχ. 3.41 Απόκριση πλάτους της τάσης εξόδου στο πεδίο συχνότητας.

Η τελευταία δοκιμή επί του κατασκευασθέντος αξελερόμετρου αφορά στον προσδιορισμό της απόκρισης πλάτους στο πεδίο συχνότητας. Εφαρμόζοντας ημιτονικό σήμα σταθερού πλάτους μέσω της συχνογεννήτριας, σαρώνουμε τις συχνότητες από 10 ως 150Hz και σημειώνουμε το πλάτος της τάσης εξόδου.

Στο διάγραμμα του Σχ. 3.41 οι μετρήσεις παρουσιάζονται ως πειραματικά σημεία και είναι απευθείας εκπεφρασμένες σε dB, με αναφορά τη μέτρηση που έγινε στα 10Hz. Λαμβάνοντας και αυτό το διάγραμμα υπόψιν μπορούμε να πούμε πως για να πλησιάσει η κατασκευή μας σε επιδόσεις το αντίστοιχο τυποποιημένο, βιομηχανικό προϊόν απαιτείται σειρά βελτιώσεων. Παραδείγματα τέτοιων βελτιώσεων είναι η απαλοιφή των εσωτερικών και εξωτερικών θορύβων (π.χ. με θωράκιση της συσκευής, καλύτερα φίλτρα κλπ), η σωστότερη επιλογή των παραμέτρων του PD ελέγχου, καθώς και η χρήση καταλληλότερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ενώ οποιαδήποτε τέτοια βελτιωμένη διάταξη θα πρέπει οπωσδήποτε να υλοποιηθεί σε PCB.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας ολοκληρώσει το έργο της πτυχιακής εργασίας, ένα χρόνο από την ανάθεση του θέματος και εννέα μήνες αφότου ξεκίνησε η ουσιαστική ενασχόληση με αυτή μπορούμε να πούμε πως προκύπτουν τρεις κατηγορίες συμπερασμάτων: Περί του τεχνικού μέρους του σχετιζόμενου με τη συσκευή που κατασκευάστηκε, σχετικά με τη γενικότερη εμπειρία που αποκτήθηκε και σχετικά με το τελικό αποτέλεσμα που είναι η πτυχιακή εργασία που τώρα διαβάσετε.

### Όσον αφορά στη συσκευή:

- Η υλοποίηση στο breadboard μόνο κοντινή συγγένεια μπορεί να έχει με την βιομηχανική υλοποίηση σε SMT PCBs. Θα ήταν μεγάλη έκπληξη αν πετυχαίναμε παραπλήσιες επιδόσεις με αυτές του βιομηχανικού προϊόντος. Πάντως, ακόμα και αυτή (η υλοποίηση σε breadboard) επιδέχεται βελτιώσεων που ενδεχομένως να ανεβάζουν και τις επιδόσεις σε υψηλότερο επίπεδο.
- Ο θόρυβος ήταν ένα ενοχλητικό ζήτημα το οποίο μας συνόδευε σε κάθε βήμα της κατασκευής. Στο τελικό αποτέλεσμα δεν έγινε κάποια εις βάθος μελέτη του, όπως θα γινόταν για ένα βιομηχανικό προϊόν (όπως π.χ. γίνεται στην [59]) και απλά αρκεστήκαμε στο να δούμε το πλάτος του στον παλμογράφο, χωρίς μάλιστα να γνωρίζουμε σε τι ποσοστό αυτός ο θόρυβος οφείλεται στα καλώδια των probe του παλμογράφου. Ίσως είναι μια καλή ιδέα, κάποια επόμενη πτυχιακή εργασία να έχει ως αντικείμενο τη σχεδίαση του όλου κυκλώματος σε PCB έστω δύο όψεων (through hole), με τοποθέτησή του σε κατάλληλο μεταλλικό κουτί και η έξοδος να οδηγείται σε έναν ADC converter, ώστε η όλη διάταξη να προσομοιάζει καλύτερα έναν εμπορικό αξελερογράφο, ακόμα και όσον αφορά στα επίπεδα θορύβου.

### Η γενικότερη εμπειρία που αποκτήθηκε:

- Οι αστάθμητοι παράγοντες και τα απρόοπτα για άλλη μια φορά καθόρισαν το χρονοδιάγραμμα και ανέτρεψαν κάθε αρχικό προγραμματισμό. Παραλείψεις στην αρχική αναζήτηση και παραγγελία υλικών κόστισαν σε πολλές ημέρες απραγίας και άσκοπης αναμονής, έκτακτοι περιορισμοί λόγω πανδημίας και κρούσματα της νόσου στο κοντινό περιβάλλον επέφεραν νέες καθυστερήσεις ολόκληρων

εβδομάδων, ενώ το καλοκαίρι που προηγήθηκε ουσιαστικά αφέθηκε να περάσει ανεκμετάλλευτο. Τελικά ναι, σίγουρα ισχύει: κάτι που μπορείς να κάνεις σήμερα μην το αφήνεις για αύριο!

- Αν αγαπάς κάτι το κάνεις ευχάριστα και γεμίζει τη μέρα σου σαν να είναι το καλύτερό σου χόμπι, ακόμα και αν δεν είναι. Δεν ενόχλησε στιγμή η ανάγκη για ξενύχτι μπροστά στον υπολογιστή ή το κλείσιμο μέσα στο σπίτι μια πανέμορφη ηλιόλουστη μέρα ή η ολοήμερη παραμονή στο εργαστήριο αγκαλιά με το αερόθερμο... αρκεί να υπήρχε δίπλα ραδιοφανάκι για να παίζει χαμηλά μουσική. Αν στο τέλος την ημέρας όλα δούλευαν σωστά και όλα είχαν γραφτεί όμορφα στον υπολογιστή, ακόμα καλύτερα!
- Τέσσερα μάτια είναι πάντα καλύτερα από δύο. Μια σύντομη επίσκεψη του επιβλέποντα καθηγητή για μια καλημέρα, μια ιδέα που μπορεί να πέσει στο τραπέζι, ίσως σημαίνει και το τέλος ενός προβληματισμού που κράτησε ώρες (μα γιατί δε δουλεύει πια αυτό;... αφού τα κοίταξα όλα!).

#### Η πτυχιακή εργασία (γιατί αν δεν παινέψεις το σπίτι σου...):

Προσωπική εκτίμηση του γράφοντος είναι πως ικανοποιεί τους αρχικούς της στόχους. Είναι δομημένη κλιμακωτά με αρχή, μέση, τέλος εύκολη στην ανάγνωση, κατάλληλη ακόμα και για ανήσυχους αναγνώστες μη ειδικούς στο θέμα των σεισμολογικών οργάνων ή των ηλεκτρονικών. Διεύρυνε τους ορίζοντες του συντάκτη της, αλλά ανοίγει και ένα παράθυρο στο χώρο της εφαρμογής των αναλογικών ηλεκτρονικών σε όποιον θελήσει να τον ερευνήσει. Μέσα από την εργασία δεν ανακαλύπτεται ο τροχός, αλλά δίνονται οι κατευθυντήριες γραμμές για όποιον θελήσει μεθαύριο να στήσει ένα δικό του αξελερόμετρο στο υπόγειο του σπιτιού του.

Τέλος καλό, όλα καλά!....

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] ebooks/edu.gr/, Γεωγραφία Β΄ Γυμνασίου.
- [2] I. Δουδούμης, «The Development of the anti-seismic regulations and the role of Thessaloniki earthquake 1978», *16th European Conference on Earthquake Engineering*, Thessaloniki, June 2018.
- [3] YA 6019/86, ΦΕΚ 29B'/11.02.1986.
- [4] <http://www.gein.noa.gr>
- [5] <https://geobit-instruments.com>
- [6] <https://www.usgs.gov>
- [7] J. Santos et al., “Understanding the Fundamentals of Earthquake Signal Sensing Networks”, *Analog Dialog*, vol. 53, No 3, 2019.
- [8] C. Cauzzi et al., “Seismic response of the Acropolis of Athens (Greece) through recorded earthquake data and numerical simulations”, *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE'15)*, 1-4 November, 2015, Christchurch, New Zealand.
- [9] <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/shakealert>
- [10] E. Isik et al., “The effect of site-specific design spectrum on earthquake-building parameters: a case study from the Marmara region (NW Turkey)”, *Applied Sciences*, Oct. 2020.
- [11] G. Housner, “Spectrum intensities of strong motion earthquakes”, Division of Engineering, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1958.
- [12] <https://www.solidworks.com>
- [13] Γ. Παπαδόπουλος κ.α., «Οι σεισμοί του Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου του 2014 στην Κεφαλονιά: μια πρώτη έκθεση», Γεωδυναμικό Ινστιτούτο Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, Φεβρ. 2014.
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/Richter\\_magnitude\\_scale](https://en.wikipedia.org/wiki/Richter_magnitude_scale)
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/Shadow\\_zone](https://en.wikipedia.org/wiki/Shadow_zone)
- [16] <https://scihub.copernicus.eu/>
- [17] A. Ringler, et al., “Observations of rotational motions from local earthquakes using two temporary portable sensors in Waynoka”, *Bulletin of the SSA*, vol. 108, No 6, 2018, pp. 3562-3575.
- [18] C. Guralp, US4280206A, US Patent Office.

- [19] Nanometrics Inc., CA2569295, Canadian Intellectual Property Office.
- [20] G. Streckeisen AG, Portable very broadband triaxial seismometer STS-2 Low Power, device manual, Switzerland, 1995.
- [21] N. Ackerley, “Principles of broadband seismometry”, *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Nanometrics Inc., 2014.
- [22] [https://en.wikipedia.org/wiki/Peak\\_ground\\_acceleration](https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_ground_acceleration)
- [23] E. Sokos et al., “Towards earthquake early warning for the Rion-Antirion bridge, Greece”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, March 2016, pp. 2531 – 2542.
- [24] R. Abbott et al., “Seismic isolation for advanced LIGO”, *Classical and Quantum Gravity*, vol. 19, No 7, 2002, p. 1591.
- [25] E. Hauksson et al., “Results from a 1500m deep, three-level downhole seismometer array: site response, low Q values and  $f_{max}$ ”, *Bulleting of the SSA*, vol. 77, No 6, Dec. 1987, pp. 1883-1904.
- [26] J. Peteson, “Observations and modeling of seismic background noise”, US Geological Survey, Open-file Report 93-322, New Mexico, 1993.
- [27] D. McNamara and R. Boaz, “Seismic noise analysis system using power spectral density probability density functions: a stand-alone software package”, US Geological Survey, Open-file Report 2005-1438, Virginia, 2006.
- [28] <https://www.nanometrics.ca>
- [29] <https://www.cem.utexas.edu/content/vibroseis-research>
- [30] [https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Vibroseis\\_or\\_vibroseis](https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Vibroseis_or_vibroseis)
- [31] «Ειδικό σχέδιο αντιμετώπισης καταστροφών από την εκδήλωση σεισμού, Περιφέρεια Αττικής», Αυτοτελής Διεύθυνση Πολιτικής Προστασίας Περιφέρειας Αττικής, Αθήνα, Ιούλ. 2020.
- [32] Εμμανουηλίδου Παρθένα, «Ανθεκτικότητα έργων υποδομής στον τομέα της ενέργειας έναντι φυσικών κινδύνων», Διπλ. Εργασία για το ΠΜΣ Ειδίκευσης *Τεχνολογίες Διαχείρισης και Αξιοποίησης Ενεργειακών Πόρων*, Τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπ. Δυτ. Μακεδονίας, Κοζάνη, Απρ. 2019.
- [33] E. Preiswer, F. Walter, “Monitoring unstable glaciers with seismic noise interferometry”, *American Geophysical Union*, Dec. 2016.
- [34] P. Richards, “Building the global seismographic network for nuclear test ban monitoring”, Lamont – Doherty Earth Observatory of Columbia University, 1999.
- [35] [https://el.wikipedia.org/wiki/Πρόγνωση\\_σεισμών](https://el.wikipedia.org/wiki/Πρόγνωση_σεισμών)
- [36] [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus)

- [37] “Choosing the right type of accelerometer”, (white paper), TE Connectivity ([www.te.com](http://www.te.com))
- [38] J. Lally, “Accelerometer selection considerations, charge and ICP® integrated circuit piezoelectric”, PCB Piezotronics, Inc.
- [39] M. Usher et al., “A miniature wideband horizontal-component feedback seismometer”, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 10, pp. 1253-1260, June 1977.
- [40] D. Nelson, B. Nordgren, “Yuma-2 force balance vertical seismometer project”, [www.groundmotion.org](http://www.groundmotion.org)
- [41] A. Ringler et al., “Self-noise models of five commercial strong-motion accelerometers”, *Seismological Research Letters*, vol. 86, No 4, pp. 1143-1147, July 2015.
- [42] Α. Υφαντής, Γ. Οικονόμου, *Ανάλυση και Επεξεργασία Σημάτων*, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2010.
- [43] A. Ringler et al., “Seismometer self-noise and measuring methods”, *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, SpringerLink, Oct. 2015.
- [44] P. Welch, “The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms”, *IEEE Trans. Audio*, AU-15, pp. 70–73, 1967.
- [45] E. Wielandt, “The force-balance principle”, <http://jclahr.com>
- [46] <https://ds.iris.edu/NRL/sensors/>
- [47] [https://el.wikipedia.org/wiki/Σεισμός\\_της\\_Πάρνηθας\\_το\\_1999](https://el.wikipedia.org/wiki/Σεισμός_της_Πάρνηθας_το_1999)
- [48] A. Coleman, “An amateur vertical component broadband seismometer (model MkXX)”, July 2005 (<http://physics.mercer.edu/petepag/mkxx.pdf>).
- [49] E. Habbak et al., “Design and simulation of a vertical broadband seismometer”, *Arabian Journal of Geosciences*, Springer, May 2026, doi:10.1007/s12517-016-2422-x.
- [50] A. Belendez et al., “Exact solution for the non-linear pendulum”, *Revista Brasileira de Ensino de Fisica*, vol. 29, No 4, pp. 645 – 648, 2007.
- [51] B. Boser, “Electronics for micromachined inertial sensors”, *Proc. of International Conf. on Solid State Sensors and Actuators*, Chicago, June 1997, pp. 1169-1172.
- [52] J. Tague and K. Schutz, “Seismic transient deconvolution with model-based signal processing”, *Geophysics*, vol. 62, No 4, pp. 1321–1330, 1997.
- [53] W. Che and J. Oh, “Development of force-balance accelerometer with high accuracy for precision motion measurement”, *Measurement Science and Technology*, vol. 7, pp. 1001-1011, 1996.
- [54] W. Rihn, et al., “Analysis and testing of the FBA-11 force-balance accelerometer”, *Earthquake Spectra*, vol. 6, No 4, pp. 797-809, 1990.

- [55] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wien\\_bridge\\_oscillator](https://en.wikipedia.org/wiki/Wien_bridge_oscillator)
- [56] Guralp 3T – Operator’s Guide, Doc. No. MAN-030-0001, Sept. 2021.
- [57] Hameg Instruments, Product Catalogue 2007.

**Με τη συμβολή του συγγραφέα της παρούσας πτυχιακής εργασίας:**

- [58] N. Germenis, G. Dimitrakakis, E. Sokos, P. Nikolakopoulos, “Design, modeling and evaluation of a class-A triaxial force-balance accelerometer of linear based geometry”, *Seismological Research Letters* (revision sent, Sept. 2021).
- [59] N. Germenis, E. Sokos, P. Nikolakopoulos, G. Dimitrakakis, “Design, Modeling and Performance Evaluation of a Class-A Triaxial Force-balance Accelerometer for earthquake monitoring”, *18th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2021)*, 1 – 6 Aug. 2021.
- [60] G. Dimitrakakis, E. Tatakis, “Analysis and design of a current fed resonant inverter for sinusoidal excitation of magnetic components in the MHz range”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, No 12, pp. 5411–5423, Dec. 2011.
- [61] G. Dimitrakakis, E. Tatakis, “Measurement issues related to high frequency sinusoidal excitation of magnetic coils”, *Proc. IEEE 35<sup>th</sup> Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC04)*, 21–25 June 2004, Aachen, Germany, vol. 3, pp. 1841–1847.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: IRIS .resp files

Παράδειγμα .resp file (για το αξελερόμετρο A200 της Geobit). Οι λίγες πρώτες γραμμές (έως την B053F15-18) αφορούν στο σένσορα, ενώ όλες οι υπόλοιπες σχετίζονται με τη λειτουργία του digitizer.

```
#          << RESP_VER RESP.XX.GBT1.HNZ.A200.4g.250.LIN   >>
#          << IRIS SEED Reader, Release 4.6 >>
#
#          REF: 4g, GAIN_SET=4g
#
#          ===== CHANNEL RESPONSE DATA =====
B050F03  Station:  GBT1
B050F16  Network:  XX
B052F03  Location:  ??
B052F04  Channel:  HNZ
B052F22  Start date: 2006,001,00:00:00.0000
B052F23  End date:  2999,365,23:59:59.0000
#
#          +-----+
#          + | Response (Poles & Zeros), GBT1 ch HNZ | +
#          +-----+
#
B053F03  Transfer function type:          A [Laplace Transform (Rad/sec)]
B053F04  Stage sequence number:          1
B053F05  Response in units lookup:       M/S**2 - Acceleration in Meters Per Second Per Second
B053F06  Response out units lookup:      V - Volts
B053F07  A0 normalization factor:       1.063E+06
B053F08  Normalization frequency:       1
B053F09  Number of zeroes:               0
B053F14  Number of poles:                2
#          Complex zeroes:
#          i real    imag    real_error  imag_error
#          Complex poles:
#          i real    imag    real_error  imag_error
B053F15-18  0 -6.845000e+02 +7.716600e+02 0.000000E+00 0.000000E+00
B053F15-18  1 -6.845000e+02 -7.716600e+02 0.000000E+00 0.000000E+00
#          +-----+
#          + | Channel Gain, GBT1 ch HNZ | +
#          +-----+
#
B058F03  Stage sequence number:          1
B058F04  Gain:                          5.0984e-01
B058F05  Frequency of gain:              1.000000E+00 HZ
B058F06  Number of calibrations:         0
#          +-----+
#          + | Channel Gain, GBT1 ch HNZ | +
#          +-----+
#
B058F03  Stage sequence number:          2
B058F04  Gain:                          1.00E+00
```

```

B058F05 Frequency of gain:          1.000000E+00 HZ
B058F06 Number of calibrations:      0
#
#
#      +      +-----+
#      +      | Response (Coefficients), GB001 ch HNZ |      +
#      +      +-----+
#
B054F03 Transfer function type:      D
B054F04 Stage sequence number:      3
B054F05 Response in units lookup:    V - Volts
B054F06 Response out units lookup:   COUNTS - Digital Counts
B054F07 Number of numerators:        1
B054F10 Number of denominators:      0
#      Numerator coefficients:
#      i, coefficient, error
B054F08-09 0 1.000000e+00 0.000000E+00
#
#      +      +-----+
#      +      | Decimation, GB001 ch HNZ |      +
#      +      +-----+
#
B057F03 Stage sequence number:      3
B057F04 Input sample rate:           8.00000e+03
B057F05 Decimation factor:           1
B057F06 Decimation offset:           0
B057F07 Estimated delay (seconds):    0.000000E+00
B057F08 Correction applied (seconds): 0.000000E+00
#
#      +      +-----+
#      +      | Channel Gain, GBT1 ch HNZ |      +
#      +      +-----+
#
B058F03 Stage sequence number:      3
B058F04 Gain:                        4.165980E+5
B058F05 Frequency of gain:           1.000000E-00 HZ
B058F06 Number of calibrations:      0
#
#      +      +-----+
#      +      | Response (Coefficients), GBT1 ch HNZ |      +
#      +      +-----+
#
B054F03 Transfer function type:      D
B054F04 Stage sequence number:      4
B054F05 Response in units lookup:    COUNTS - Digital Counts
B054F06 Response out units lookup:   COUNTS - Digital Counts
B054F07 Number of numerators:        11
B054F10 Number of denominators:      0
#      Numerator coefficients:
#      i, coefficient, error
B054F08-09 0 5.859375E-03 0.000000E+00
B054F08-09 1 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09 2 -4.882813E-02 0.000000E+00
B054F08-09 3 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09 4 2.929688E-01 0.000000E+00
B054F08-09 5 5.000000E-01 0.000000E+00
B054F08-09 6 2.929688E-01 0.000000E+00
B054F08-09 7 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09 8 -4.882813E-02 0.000000E+00
B054F08-09 9 0.000000E+00 0.000000E+00

```



```

B054F08-09  10 5.859375E-03 0.000000E+00
#
#           +           +-----+
#           +           | Decimation, GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
B057F03  Stage sequence number:           4
B057F04  Input sample rate:           8.0E+03
B057F05  Decimation factor:           2
B057F06  Decimation offset:           0
B057F07  Estimated delay (seconds):           6.25E-04
B057F08  Correction applied (seconds):           6.25E-04
#
#           +           +-----+
#           +           | Channel Gain, GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
B058F03  Stage sequence number:           4
B058F04  Gain:           1.000000E+00
B058F05  Frequency of gain:           1.000000E-02 HZ
B058F06  Number of calibrations:           0
#
#           +           +-----+
#           +           | Response (Coefficients), GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
B054F03  Transfer function type:           D
B054F04  Stage sequence number:           5
B054F05  Response in units lookup:           COUNTS - Digital Counts
B054F06  Response out units lookup:           COUNTS - Digital Counts
B054F07  Number of numerators:           15
B054F10  Number of denominators:           0
#           Numerator coefficients:
#           i, coefficient, error
B054F08-09  0 -1.304626E-03 0.000000E+00
B054F08-09  1 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09  2 1.237476E-02 0.000000E+00
B054F08-09  3 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09  4 -6.054676E-02 0.000000E+00
B054F08-09  5 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09  6 2.994766E-01 0.000000E+00
B054F08-09  7 5.000000E-01 0.000000E+00
B054F08-09  8 2.994766E-01 0.000000E+00
B054F08-09  9 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09 10 -6.054676E-02 0.000000E+00
B054F08-09 11 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09 12 1.237476E-02 0.000000E+00
B054F08-09 13 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09 14 -1.304626E-03 0.000000E+00
#
#           +           +-----+
#           +           | Decimation, GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
B057F03  Stage sequence number:           5
B057F04  Input sample rate:           4.0E+03
B057F05  Decimation factor:           2
B057F06  Decimation offset:           0
B057F07  Estimated delay (seconds):           1.75E-03
B057F08  Correction applied (seconds):           1.75E-03

```

```

#
#          +          +-----+          +
#          +          | Channel Gain, GBT1 ch HNZ |          +
#          +          +-----+          +
#
B058F03  Stage sequence number:          5
B058F04  Gain:                          1.000000E+00
B058F05  Frequency of gain:              1.000000E+00 HZ
B058F06  Number of calibrations:         0
#
#          +          +-----+          +
#          +          | Response (Coefficients), GBT1 ch HNZ |          +
#          +          +-----+          +
#
B054F03  Transfer function type:         D
B054F04  Stage sequence number:          6
B054F05  Response in units lookup:       COUNTS - Digital Counts
B054F06  Response out units lookup:      COUNTS - Digital Counts
B054F07  Number of numerators:           52
B054F10  Number of denominators:         0
#          Numerator coefficients:
#          i, coefficient, error
B054F08-09  0 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09  1 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09  2 -5.438924E-07 0.000000E+00
B054F08-09  3 -6.511807E-06 0.000000E+00
B054F08-09  4 -3.463030E-05 0.000000E+00
B054F08-09  5 -1.203045E-04 0.000000E+00
B054F08-09  6 -3.075600E-04 0.000000E+00
B054F08-09  7 -6.030053E-04 0.000000E+00
B054F08-09  8 -8.945465E-04 0.000000E+00
B054F08-09  9 -8.843094E-04 0.000000E+00
B054F08-09 10 -1.356229E-04 0.000000E+00
B054F08-09 11 1.674525E-03 0.000000E+00
B054F08-09 12 4.322797E-03 0.000000E+00
B054F08-09 13 6.655328E-03 0.000000E+00
B054F08-09 14 6.641418E-03 0.000000E+00
B054F08-09 15 2.187476E-03 0.000000E+00
B054F08-09 16 -7.355608E-03 0.000000E+00
B054F08-09 17 -1.963808E-02 0.000000E+00
B054F08-09 18 -2.876164E-02 0.000000E+00
B054F08-09 19 -2.661729E-02 0.000000E+00
B054F08-09 20 -6.128646E-03 0.000000E+00
B054F08-09 21 3.478716E-02 0.000000E+00
B054F08-09 22 9.055211E-02 0.000000E+00
B054F08-09 23 1.483493E-01 0.000000E+00
B054F08-09 24 1.920714E-01 0.000000E+00
B054F08-09 25 2.083694E-01 0.000000E+00
B054F08-09 26 1.920714E-01 0.000000E+00
B054F08-09 27 1.483493E-01 0.000000E+00
B054F08-09 28 9.055211E-02 0.000000E+00
B054F08-09 29 3.478716E-02 0.000000E+00
B054F08-09 30 -6.128646E-03 0.000000E+00
B054F08-09 31 -2.661729E-02 0.000000E+00
B054F08-09 32 -2.876164E-02 0.000000E+00
B054F08-09 33 -1.963808E-02 0.000000E+00
B054F08-09 34 -7.355608E-03 0.000000E+00
B054F08-09 35 2.187476E-03 0.000000E+00
B054F08-09 36 6.641418E-03 0.000000E+00
B054F08-09 37 6.655328E-03 0.000000E+00

```

```

B054F08-09 38 4.322797E-03 0.000000E+00
B054F08-09 39 1.674525E-03 0.000000E+00
B054F08-09 40 -1.356229E-04 0.000000E+00
B054F08-09 41 -8.843094E-04 0.000000E+00
B054F08-09 42 -8.945465E-04 0.000000E+00
B054F08-09 43 -6.030053E-04 0.000000E+00
B054F08-09 44 -3.075600E-04 0.000000E+00
B054F08-09 45 -1.203045E-04 0.000000E+00
B054F08-09 46 -3.463030E-05 0.000000E+00
B054F08-09 47 -6.511807E-06 0.000000E+00
B054F08-09 48 -5.438924E-07 0.000000E+00
B054F08-09 49 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09 50 0.000000E+00 0.000000E+00
B054F08-09 51 0.000000E+00 0.000000E+00
#
#           +           +-----+
#           +           | Decimation, GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
B057F03 Stage sequence number:           6
B057F04 Input sample rate:           2.0E+03
B057F05 Decimation factor:           4
B057F06 Decimation offset:           0
B057F07 Estimated delay (seconds):           1.275E-02
B057F08 Correction applied (seconds):           1.275E-02
#
#           +           +-----+
#           +           | Channel Gain, GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
B058F03 Stage sequence number:           6
B058F04 Gain:           1.000000E+00
B058F05 Frequency of gain:           5.000000E-00 HZ
B058F06 Number of calibrations:           0
#
#           +           +-----+
#           +           | Response (Coefficients), GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
B054F03 Transfer function type:           D
B054F04 Stage sequence number:           7
B054F05 Response in units lookup:           COUNTS - Digital Counts
B054F06 Response out units lookup:           COUNTS - Digital Counts
B054F07 Number of numerators:           110
B054F10 Number of denominators:           0
#           Numerator coefficients:
#           i, coefficient, error
B054F08-09 0 -9.834766E-07 0.000000E+00
B054F08-09 1 -3.218651E-06 0.000000E+00
B054F08-09 2 -5.587935E-07 0.000000E+00
B054F08-09 3 1.848489E-05 0.000000E+00
B054F08-09 4 4.985929E-05 0.000000E+00
B054F08-09 5 5.527586E-05 0.000000E+00
B054F08-09 6 -1.981854E-06 0.000000E+00
B054F08-09 7 -7.944554E-05 0.000000E+00
B054F08-09 8 -6.169081E-05 0.000000E+00
B054F08-09 9 7.912517E-05 0.000000E+00
B054F08-09 10 1.639724E-04 0.000000E+00
B054F08-09 11 2.592802E-06 0.000000E+00
B054F08-09 12 -2.542362E-04 0.000000E+00

```

B054F08-09 13 -1.903549E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 14 2.492964E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 15 4.573688E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 16 -5.622208E-05 0.000000E+00  
B054F08-09 17 -7.017851E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 18 -3.772154E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 19 7.535145E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 20 1.004532E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 21 -4.218966E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 22 -1.639903E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 23 -4.178435E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 24 1.965150E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 25 1.722805E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 26 -1.603596E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 27 -3.205076E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 28 2.586469E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 29 4.324496E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 30 2.115056E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 31 -4.383788E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 32 -5.164810E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 33 2.727792E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 34 8.082286E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 35 9.901300E-04 0.000000E+00  
B054F08-09 36 -9.686403E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 37 -6.546393E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 38 8.658983E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 39 1.297567E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 40 -3.893174E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 41 -1.855489E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 42 -5.133040E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 43 2.094908E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 44 1.807134E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 45 -1.742017E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 46 -3.361043E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 47 4.779957E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 48 4.963376E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 49 2.198526E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 50 -6.361348E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 51 -7.850899E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 52 7.315335E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 53 3.086505E-01 0.000000E+00  
B054F08-09 54 4.234595E-01 0.000000E+00  
B054F08-09 55 3.086505E-01 0.000000E+00  
B054F08-09 56 7.315335E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 57 -7.850899E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 58 -6.361348E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 59 2.198526E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 60 4.963376E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 61 4.779957E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 62 -3.361043E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 63 -1.742017E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 64 1.807134E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 65 2.094908E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 66 -5.133040E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 67 -1.855489E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 68 -3.893174E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 69 1.297567E-02 0.000000E+00  
B054F08-09 70 8.658983E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 71 -6.546393E-03 0.000000E+00  
B054F08-09 72 -9.686403E-03 0.000000E+00

B054F08-09 73 9.901300E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 74 8.082286E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 75 2.727792E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 76 -5.164810E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 77 -4.383788E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 78 2.115056E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 79 4.324496E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 80 2.586469E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 81 -3.205076E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 82 -1.603596E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 83 1.722805E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 84 1.965150E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 85 -4.178435E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 86 -1.639903E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 87 -4.218966E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 88 1.004532E-03 0.000000E+00  
 B054F08-09 89 7.535145E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 90 -3.772154E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 91 -7.017851E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 92 -5.622208E-05 0.000000E+00  
 B054F08-09 93 4.573688E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 94 2.492964E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 95 -1.903549E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 96 -2.542362E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 97 2.592802E-06 0.000000E+00  
 B054F08-09 98 1.639724E-04 0.000000E+00  
 B054F08-09 99 7.912517E-05 0.000000E+00  
 B054F08-09 100 -6.169081E-05 0.000000E+00  
 B054F08-09 101 -7.944554E-05 0.000000E+00  
 B054F08-09 102 -1.981854E-06 0.000000E+00  
 B054F08-09 103 5.527586E-05 0.000000E+00  
 B054F08-09 104 4.985929E-05 0.000000E+00  
 B054F08-09 105 1.848489E-05 0.000000E+00  
 B054F08-09 106 -5.587935E-07 0.000000E+00  
 B054F08-09 107 -3.218651E-06 0.000000E+00  
 B054F08-09 108 -9.834766E-07 0.000000E+00  
 B054F08-09 109 0.000000E+00 0.000000E+00

```
#
#           +           +-----+
#           +           | Decimation, GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
```

B057F03 Stage sequence number: 7  
 B057F04 Input sample rate: 5.0E+02  
 B057F05 Decimation factor: 2  
 B057F06 Decimation offset: 0  
 B057F07 Estimated delay (seconds): 1.09E-01  
 B057F08 Correction applied (seconds): 1.09E-01

```
#
#           +           +-----+
#           +           | Channel Gain, GBT1 ch HNZ |           +
#           +           +-----+
#
```

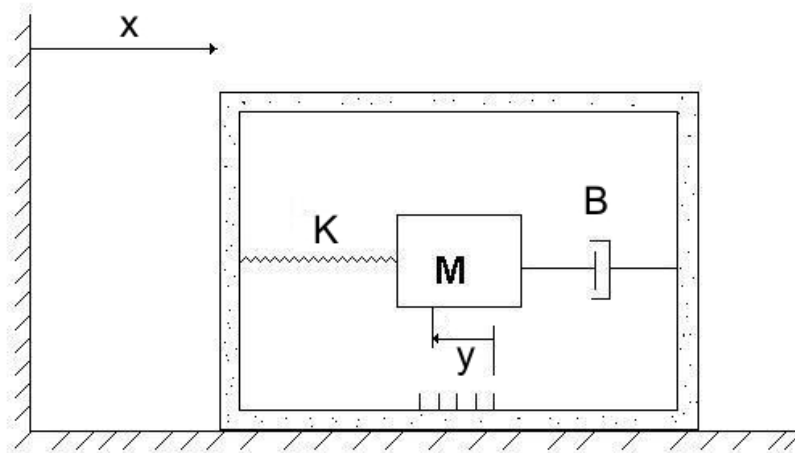
B058F03 Stage sequence number: 7  
 B058F04 Gain: 1.000000E+00  
 B058F05 Frequency of gain: 5.000000E+00 HZ  
 B058F06 Number of calibrations: 0

```
#
#           +           +-----+
#           +           | Channel Gain, GBT1 ch HNZ |           +
```

```
#           +           +-----+           +
#
B058F03  Stage sequence number:           0
B058F04  Sensitivity:                     2.12398E+5
B058F05  Frequency of sensitivity:        1.000000e-00 HZ
B058F06  Number of calibrations:          0
#
```

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Σύστημα μάζας - ελατηρίου**

Έστω το σύστημα μάζας – ελατηρίου που απεικονίζεται στο Σχ. Π2.1. Ορίζουμε:



Σχ. Π2.1 Σύστημα μάζας ελατηρίου με απόσβεση.

$x$  = μετατόπιση του εδάφους [m]

$y$  = μετατόπιση της μάζας από τη θέση ισορροπίας (σχετικής ως προς το πλαίσιο) [m]

$M$  = σεισμική μάζα [kg]

$K$  = σταθερά ελατηρίου [N/m]

$B$  = viscous damping coefficient (συντελεστής κολλώδους ή ιξώδους τριβής) [N/(m/s)]

Για την κίνηση της μάζας  $M$  ισχύει:

$$M(y-x)'' = -ky -By' \tag{Π2.1}$$

Αν αντικαταστήσουμε τη χρονική παράγωγο με τη μιγαδική συχνότητα  $s=j\omega$  η παραπάνω διαφορική εξίσωση μετατρέπεται σε αλγεβρική στο πεδίο των συχνοτήτων ως εξής:

$$d/dt \rightarrow s, \quad d^2/dt^2 \rightarrow s^2 \tag{Π2.2}$$

οπότε:

$$Ms^2(Y-X) + KY + BsY = 0 \Rightarrow Y(s) = \{1 / [s^2 + (B/M)s + (K/M)]\} \cdot s^2 X(s) \tag{Π2.3}$$

Μια σταθερή ταχύτητα ή μια σταθερή μετατόπιση όμως δε μπορούν να οδηγήσουν τη μάζα εκτός ΘΙ, οπότε είσοδος του συστήματος οφείλει να είναι η επιτάχυνση  $A(s) = s^2 X(s)$ . Άρα το μηχανικό μέρος σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου μετατρέπει την επιτάχυνση σε μετατόπιση της μάζας από τη ΘΙ με συνάρτησης μεταφοράς

$$H(s) = 1 / [s^2 + (B/M)s + (K/M)] \quad (\text{Π2.4})$$

Ο παρονομαστής μπορεί να γραφτεί ως:

$$s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2 \quad (\text{Π2.5})$$

όπου

$$\omega_0 = \sqrt{K/M} \text{ η φυσική γωνιακή συχνότητα του μηχανικού συστήματος άνευ απόσβεσης} \quad (\text{Π2.6})$$

$$\zeta = B / [2\sqrt{KM}] \text{ ο συντελεστής φυσικής απόσβεσης} \quad (\text{Π2.7})$$

Αν έχουμε το  $M$ , με ένα πείραμα φυσικής ταλάντωσης προσδιορίζουμε τα  $\omega_0$  και  $\zeta$  και από κει τα  $K$  και  $B$ :

$$y(t) = y_{max} \cdot \exp(-\zeta\omega_0 t) \cdot \sin[\sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_0 t + \varphi] \quad (\text{Π2.8})$$

Το  $\zeta$  προσδιορίζεται μέσω της παραμέτρου  $\delta$ . Το  $\delta$  συναρτήσκει κορυφών που απέχουν μεταξύ τους  $n$  περιόδους είναι:

$$\delta = (1/n) \cdot \ln(y_0 / y_n) \quad (\text{Π2.9})$$

Η σχέση που συνδέει το  $\zeta$  με το  $\delta$ :

$$\delta = 2\pi\zeta / \sqrt{1 - \zeta^2} \Rightarrow \zeta = \delta / \sqrt{4\pi^2 + \delta^2} \quad (\text{Π2.10})$$

Αν είναι  $\delta^2 \ll 4\pi^2$  τότε:



$$\zeta = \delta/2\pi \tag{Π2.11}$$

Στην πραγματικότητα, με ένα πείραμα φυσικής ταλάντωσης δεν προσδιορίζουμε την  $\omega_0$  όπως προαναφέρθηκε, αλλά την  $\omega_d$ , τη φυσική συχνότητα με απόσβεση. Αν όμως ισχύει η ανισότητα  $\delta^2 \ll 4\pi^2$ , τότε χωρίς σπουδαίο σφάλμα, μπορούμε να πούμε ότι  $\omega_d \approx \omega_0$ .



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: Προσομοίωση διαμόρφωσης – αποδιαμόρφωσης  
σήματος στο Matlab (κώδικας)**

```

clear
clear figures

fc = 0.2e3;
wc = 2*pi*fc;
Tc = 1/fc;
Ts = Tc/1200;
s_depth = 30;

t = [0 : Ts : s_depth*Tc];
l = length(t);

S1 = sin(wc*t); S2 = -sin(wc*t);
X = exp(-3*t) .* sin(2*pi*10*t);

V1 = [(1+X) .* S1 + (1-X) .* S2];
V2 = [(1+X) .* S2 + (1-X) .* S1];

figure(1)
plot(t, V1);

for i = 1:l
V3(i) = sign(S1(i)) * 0.5 * (V1(i) - V2(i));
end

V4 = -V3;

figure(2)
plot(t, V3, 'g');

[pks3, locs3] = localmax(V3);
[pks4, locs4] = localmax(V4);

locs_p = [locs3, locs4];
locs = sort(locs_p);
a = length(locs);

for k = 1:a;
    if V3(locs(k)) > 0;
        Vo(k) = V3(locs(k));
    else
        Vo(k) = -V4(locs(k));
    end
end
end

```

```
locs = Ts * locs;
```

```
figure(3)
```

```
plot(locs, Vo)
```

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σεισμολογία ως αντικείμενο αποτελεί υποσύνολο της επιστήμης της γεωλογίας και περιλαμβάνει την καταγραφή και ανάλυση των πάσης φύσεως σεισμικών και μικροσεισμικών δονήσεων, την εξαγωγή συμπερασμάτων για τους μηχανισμούς γένεσης των σεισμών και για τη σύσταση του εσωτερικού της γης, καθώς και την εφαρμογή όλης αυτής της γνώσης για σκοπούς πολιτικής προστασίας, αναζήτησης φυσικών πόρων κλπ. Βασικό της εργαλείο είναι τα διάφορα όργανα για την καταγραφή της σεισμικής δραστηριότητας και οι διάφορες σύγχρονες τεχνολογίες για τη διακίνηση και επεξεργασία αυτής της πληροφορίας (δίκτυα επικοινωνιών – ηλεκτρονικοί υπολογιστές).

Τα σύγχρονα σεισμολογικά όργανα ενσωματώνουν συμπυκνωμένα πληθώρα τεχνολογιών αιχμής, ενώ ταυτόχρονα οφείλουν να είναι αξιόπιστα, εύχρηστα, στιβαρά και ανθεκτικά σε καταπονήσεις, αλλά και κατά το δυνατόν αποδεκτού κόστους για τον προϋπολογισμό του μέσου πανεπιστημιακού εργαστηρίου, γεωδυναμικού ινστιτούτου ή εταιρίας γεωφυσικών ερευνών. Η κατασκευή τους, αλλά και το λανσάρισμά τους στην αγορά στηρίζεται στη βελτιστοποίηση μιας σειράς τεχνικών χαρακτηριστικών, όπως είναι το εύρος συχνοτήτων καλής λειτουργίας, ο εσωτερικός τους θόρυβος κλπ.

Η υλοποίηση ενός force – balance αδρανειακού επιταχυνσιόμετρου περιλαμβάνει την κατασκευή του μηχανικού μέρους του αισθητήρα καθώς και του ηλεκτρονικού κυκλώματος ελέγχου. Στα πλαίσια της εργασίας, με δεδομένο τον αισθητήρα, υλοποιείται το ηλεκτρονικό μέρος και στη συνέχεια μελετάται και δοκιμάζεται το προκύπτον όργανο. Διαπιστώνεται πως οι επιδόσεις του απέχουν από εκείνες των αντίστοιχων βιομηχανικών προϊόντων, αλλά και πως υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης, ακόμα και αν πρόκειται για μια τέτοια εργαστηριακή διάταξη, που εξυπηρετεί αποκλειστικά σκοπούς εκπαίδευσης και επίδειξης.





