

**ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ & ΔΟΝΗΤΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΙΑΣ ΚΙΘΑΡΑΣ**

ΟΝ/ΜΟ : ΜΑΝΟΣ ΤΗΛΕΜΑΧΟΣ

ΑΜ: 7

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΤΑΔΑΚΗΣ
ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**

ΡΕΘΥΜΝΟ 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

A. Θεωρία και μηχανισμός παραγωγής του ήχου

1. Ορισμός και παραγωγή του ήχου
2. Διάκριση ήχων διαφορετικής ακουστότητας
3. Ένταση και χρόνος-Περιβάλλουσα
4. Φάσμα συχνοτήτων
5. Αρμονικό περιεχόμενο
6. Αρμονικό φάσμα
7. Το φάσμα του πριονωτού κύματος
8. Το αρμονικό φάσμα των μουσικών οργάνων
9. Η έννοια της χροιάς
10. Το αρμονικό περιεχόμενο-Η χροιά σε σχέση με το χρόνο
11. Η πραγματική φύση των αρμονικών

B. Η κιθάρα

1. Τα μέρη της κιθάρας
2. Η λειτουργία της κιθάρας
3. Η χορδή στην κιθάρα
4. Η ακαμψία της χορδής
5. Μή γραμμικότητα της χορδής
6. Χορδές, στάσιμα κύματα και αρμονικές
7. Αρμονικές και τρόποι ταλάντωσης
8. Γέφυρα και ηχητική πλάκα της κιθάρας
9. Απόσβεση λόγω του αέρα
10. Το καπάκι της κιθάρας και οι τρόποι ταλάντωσης του
11. Η κοιλότητα της κιθάρας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

A. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

1. Μέτρηση επιτάχυνσης
2. Πρακτική θεώρηση
3. Μέτρηση ήχου-θορύβου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

1. Μελέτη του φάσματος του ήχου
- 2.α. Τι είναι το decibel
- 2.β. Τα decibel σε σχέση με την πίεση που ασκεί ο ήχος
- 2.γ. Γιατί χρησιμοποιούμε τα decibels
3. Το θεώρημα της δειγματοληψίας (Nyquist)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. Μέτρηση της ακουστικής πίεσης
2. Μέτρηση της δόνησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

- 1.α. Αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων
- 1.β. Παρατηρήσεις
- 2.α. Αποτελέσματα δονητικών μετρήσεων
- 2.β. Παρατηρήσεις
3. Γενικές παρατηρήσεις
4. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη χορδή La

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΣΤΟ INTERNET

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μουσική αποτελεί για τους περισσότερους έναν τρόπο έκφρασης ή γενικότερα μια μορφή ψυχαγωγίας, η οποία ανάλογα με το είδος της μπορεί να επιδράσει στην ψυχοσύνθεση του ανθρώπου. Ανάλογα με τα ερεθίσματα που προκαλεί στον άνθρωπο μέσω του βιολογικού μηχανισμού της ακοής, το νευρικό σύστημα και ο εγκέφαλος αντιδρούν στον ήχο δημιουργώντας συναισθήματα, αντιλήψεις, εντυπώσεις και εμπειρίες.

Η μουσική μπορεί να θεωρηθεί σαν μια γλώσσα που έχει γραφή και ανάγνωση, την οποία χρησιμοποιώντας την ο μουσικός μπορεί να μετατρέπει τον ήχο σε μουσικό κείμενο, χωρίς απαραίτητα να γνωρίζει το “φυσικό” περιεχόμενο της μουσικής γλώσσας.

Το ανθρώπινο αυτί είναι ένας δέκτης ηχητικών κυμάτων, ο οποίος αποκωδικοποιεί αυτά τα σήματα εκμεταλλευόμενο τις δονήσεις και ταλαντώσεις που δημιουργούνται. Έτσι λοιπόν λειτουργεί σαν ένας αναλυτής φάσματος των ακουστικών συχνοτήτων που μετατρέπεται σε νευρικό παλμό και καταλήγει στον εγκέφαλο, όπου τελικά τον αντιλαμβανόμαστε πλέον σαν συγκεκριμένο ήχο.

Η γρήγορη απόκριση του αυτιού σε συνδυασμό με την υψηλή διακριτικότητα ανάλυσης που διαθέτει (αντιλαμβάνεται περίπου 1500 ξεχωριστές συχνότητες), το καθιστά το ανώτερο σύστημα ανάλυσης ήχου. Η εκπληκτική κατασκευή του αυτιού επιτρέπει ν’ αποκρίνεται σ’ ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από 16Hz έως και 20kHz και σε μια εκτεταμένη κλίμακα ακουστότητας. Το ανώτατο όριο στάθμης έντασης που μπορεί να ανεχθεί ο άνθρωπος είναι 120dB, ενώ από εκεί και πάνω προκαλείται πόνος και βλάβες, με ανώτατο όριο μηχανικής πλέον αντοχής του αυτιού τα 140dB.

Πέρα από την καθημερινή διάσταση της μουσικής και γενικότερα του ήχου, μπορούμε να προσεγγίσουμε το θέμα επιστημονικά μελετώντας τον ήχο σαν μια κυματομορφή στο εύρος των συχνοτήτων. Αυτός είναι και ο σκοπός αυτής της εργασίας, να κατανοήσουμε δηλαδή πώς παράγεται ο ήχος, χρησιμοποιώντας σαν αντικείμενο μελέτης μια κιθάρα. Με τα κατάλληλα όργανα μετρήσεων λοιπόν θα μετρήσουμε την ακουστική και δονητική συμπεριφορά της κιθάρας, δηλαδή τις

δονήσεις που προκαλούνται πάνω στο σώμα της κιθάρας και τις αντίστοιχες μεταβολές στην ατμοσφαιρική πίεση σαν αποτέλεσμα της διέγερσης των χορδών της, καθώς και την επίδρασή της στο ακουστικό αποτέλεσμα.

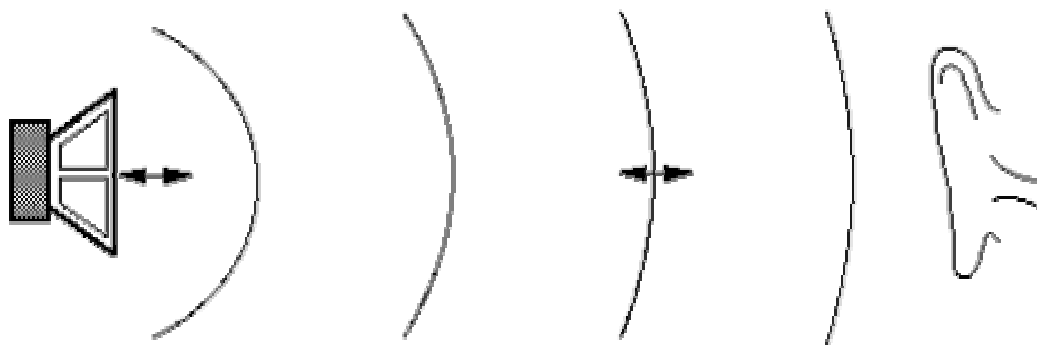
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

A. ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

1. “Ορισμός και παραγωγή του ήχου”

Για να προχωρήσουμε στην μελέτη μας θα πρέπει αρχικά να προσδιορίσουμε τι είναι ο ήχος. Για την επιστήμη της Φυσικής ο ήχος είναι ένα είδος ενέργειας η οποία ονομάζεται ακουστική ενέργεια και παράγεται από τις μεταβολές του ατμοσφαιρικού αέρα, ή αλλιώς τα μεταβαλλόμενα κύματα πίεσης τα οποία διαδίδονται σ’ ένα ελαστικό μέσο που συνήθως είναι ο αέρας.

Αν τοποθετήσουμε το χέρι μας πάνω σε ένα ηχείο μπορούμε να το αισθανθούμε να δονείται και αν παίζει μια χαμηλή νότα σε αρκετά μεγάλη ένταση, μπορούμε ακόμα και να το δούμε να κουνιέται μπρος πίσω. Ο ήχος παράγεται λοιπόν όταν ο αέρας ή κάποιο άλλο μέσο αρχίζει να δονείται. Δονούμενα σώματα που μπορούν να παράγουν ήχο είναι για παράδειγμα οι χορδές της κιθάρας ή του πιάνου, τα δέρματα των τυμπάνων κτλ. Μια γρήγορη ροή αέρα από ένα στένωμα μπορεί να παράγει ήχο, διότι αυτό το φαινόμενο θέτει σε δόνηση τη μάζα του αέρα που περιέχεται σε αυτό. Κατά συνέπεια το δονούμενο σώμα είναι και η πηγή του ήχου. Αυτή η δόνηση του σώματος το οποίο μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο προκαλεί τη μεταβολή της πυκνότητας των μορίων του ελαστικού μέσου, δηλαδή του αέρα που περιβάλλει το σώμα. Οι μεταβολές της πυκνότητας του αέρα δημιουργούν πυκνώματα και αραιώματα μορίων τα οποία ισοδυναμούν με μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης και αρχίζουν να διαδίδονται, απομακρυνόμενα από την πηγή του ήχου, λόγω των ελαστικών δεσμών που έχουν μεταξύ τους τα μόρια του αέρα.



Κίνηση μπρος πίσω
του κώνου του ηχείου

Μεταφορά του κύματος μέσω των
κινήσεων των μορίων του αέρα

Δόνηση του τυμπάνου του
αυτιού, αντίληψη ήχου

Σχήμα 1.

Η παραγωγή και διάδοση του ήχου μέσω του αέρα έως ότου συναντήσει το ανθρώπινο αυτί

Έτσι δημιουργείται το ηχητικό κύμα το οποίο είναι ένα διαμήκες κύμα που διαδίδεται προς διαφορετικές κατευθύνσεις όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 1. Είναι λοιπόν απαραίτητη η προϋπόθεση της ύπαρξης κάποιου μέσου για να είναι δυνατή η διάδοση του ήχου. Ειδικότερα στην κιθάρα την οποία και θα μελετήσουμε, το μέσον αυτό θα είναι το ξύλινο σώμα της. Επειδή η μικρή διατομή των χορδών δεν είναι ικανή να θέσει σε κίνηση ικανοποιητική ποσότητα μάζας αέρα, οι χορδές είναι σε άμεση επαφή με το υπόλοιπο σώμα της κιθάρας μέσω των κλειδιών και της γέφυρας.

2. “ Διάκριση ήχων διαφορετικής ακουστότητας”

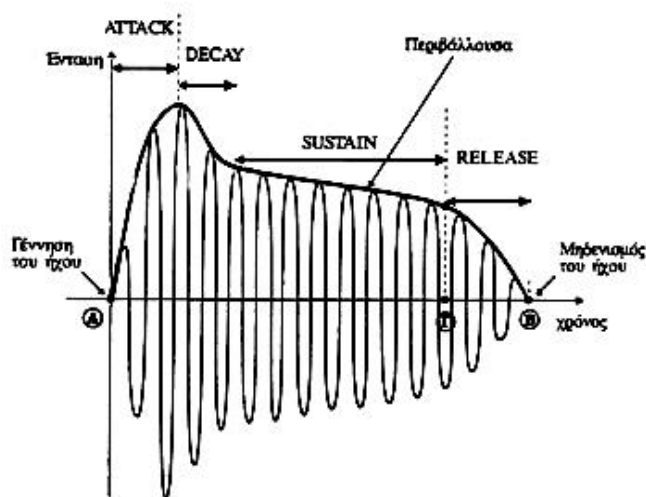
Η ελάχιστη αντιληπτή αλλαγή στη στάθμη της ακουστότητας, την οποία μπορεί το αυτί να ανιχνεύσει, εξαρτάται από τη συχνότητα και ακολουθεί την ευαισθησία του αυτιού. Έτσι, στην περιοχή μέγιστης ευαισθησίας το αυτί μπορεί να διακρίνει περίπου 375 διαφορετικές στάθμες ακουστότητας, ενώ στις χαμηλές ή πολύ υψηλές συχνότητες οι διακριτές στάθμες μειώνονται κατά πολύ. Για παράδειγμα στα 60Hz διακρίνονται μόνο 45 περίπου διαφορετικές στάθμες, στα 250Hz 170 στάθμες, στα 500Hz 260 στάθμες, στα 8kHz 150 στάθμες κ.ο.κ.

Συνεπώς, με δεδομένο ότι η περιοχή αντιληπτών εντάσεων ήχου έχει εύρος περίπου 120dB, τότε το αυτί μπορεί να διακρίνει μεταβολές έντασης περίπου 0,5dB στην περιοχή μεγίστης ευαισθησίας του. Η ικανότητα διάκρισης εξαρτάται και από τη στάθμη έντασης του ήχου και βελτιώνεται όσο αυξάνεται η στάθμη μέχρι ενός ορίου.

3. “Ένταση και Χρόνος – Περιβάλλουσα”

Η ένταση του ήχου που παράγεται για παράδειγμα από ένα μουσικό όργανο δεν παραμένει η ίδια, αλλά μεταβάλλεται καθ’ όλη τη διάρκεια της εξέλιξης του. Από τη στιγμή που παράγεται ο ήχος έως και τη στιγμή που θα σιγήσει ολοκληρωτικά, το πλάτος της κυματομορφής του ακολουθεί μια καμπύλη η οποία σχηματικά αναπαριστά τη μεταβολή της έντασής του με την πάροδο του χρόνου.

Αυτή η καμπύλη στην πραγματικότητα είναι ανύπαρκτη και έχει “εφευρεθεί” καθαρά για να απεικονίσει τις μεταβολές του πλάτους μιας κυματομορφής (ή τη διαμόρφωση του πλάτους) και ονομάζεται περιβάλλουσα (envelope). Η μορφή της απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα από μια συνεχόμενη έντονη καμπύλη. Κατά μία άλλη διατύπωση, η περιβάλλουσα είναι η καμπύλη που αναπαριστά τη δυναμική ανάπτυξη της έντασης ενός ήχου. Ειδικές συσκευές που μπορούν να ανιχνεύσουν και να παράγουν την περιβάλλουσα ενός ήχου, ονομάζονται ανιχνευτές περιβάλλουσας (envelope detectors).



Σχήμα 2.

Η περιβάλλουσα (Envelope) στη γενική της μορφή

Στο παραπάνω σχήμα 2 εμφανίζεται μια περιβάλλουσα στην πιο γενική της μορφή, η οποία αποτελείται από τέσσερα μέρη – φάσεις:

(α) Την αρχική και ανάλογα με το μουσικό όργανο γρήγορη ή αργή αύξηση της έντασης που ονομάζουμε **μέτωπο** ή **ατάκα** (Attack)

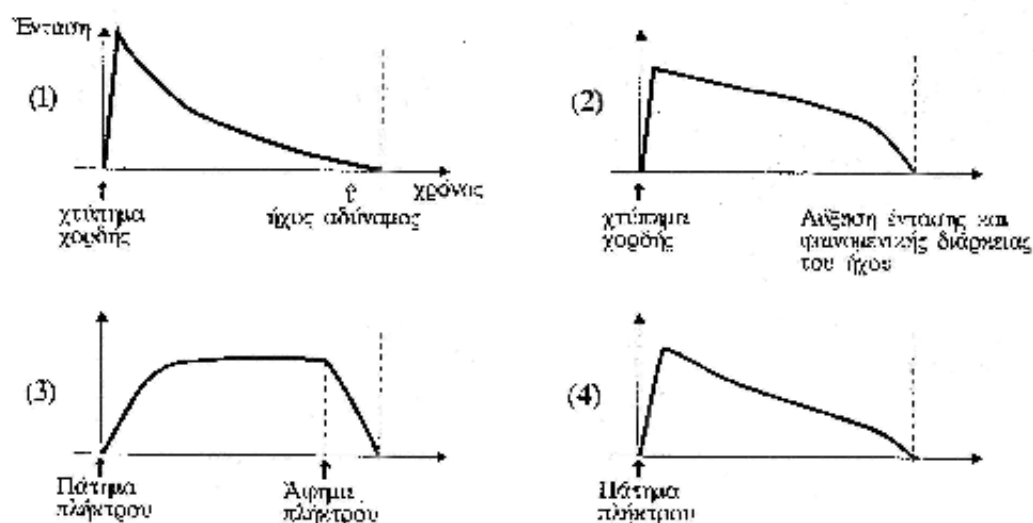
(β) Την αρχή της μείωσης της έντασης αμέσως μετά το μέτωπο που ονομάζουμε **εξασθένηση** ή **πτώση** (Decay).

(γ) Τη διατήρηση μιας μέτριας έντασης που ονομάζουμε **διάρκεια** (Sustain)

(δ) Τη δραστική μείωση και μηδενισμό του ήχου που ονομάζουμε **αποδέσμευση** (Release)

Όπως φαίνεται στο σχήμα ο ήχος παράγεται τη χρονική στιγμή **A** και σιγεί τη χρονική στιγμή **B**. Επίσης υποθέτουμε ότι ο ήχος αυτός είναι ένας απλός τόνος και γι αυτό και η κυματομορφή του είναι ημιτονοειδής. Επίσης πρέπει να πούμε ότι το σχήμα της περιβάλλουσας εξαρτάται από το είδος του μουσικού οργάνου καθώς και από τον τρόπο παιξίματος του μουσικού. Πρακτικά μπορούμε να πούμε τα πνευστά έχουν αργό μέτωπο, δηλαδή η έντασή τους αργεί να αυξηθεί, ενώ η κιθάρα και τα κρουστά έχουν ταχύ μέτωπο ή έντονη ατάκα, διότι η έντασή τους παίρνει απότομα μεγάλες τιμές. Όσο πιο δυνατά χτυπηθούν οι χορδές ή τα τύμπανα, τόσο πιο έντονος είναι ο ήχος, πράγμα που οφείλεται στην ατάκα. Στη συνέχεια όμως ενώ στα κρουστά ή την κιθάρα ο ήχος εξασθενεί, στα πνευστά διαρκεί περισσότερο αφού ο μουσικός συνεχίζει να φυσά.

Στο παρακάτω σχήμα 3 απεικονίζονται οι περιβάλλουσες μερικών οργάνων, (1) Κλασική κιθάρα, (2) Ηλεκτρική κιθάρα, (3) Όργανο, (4) Πιάνο, από τις οποίες μπορούμε να διακρίνουμε τη διαφορετική συμπεριφορά του κάθε ήχου. Έτσι λοιπόν για την κλασική κιθάρα βλέπουμε ότι ο ήχος έχει έντονη ατάκα, όμως η ένταση αυτή φθίνει με γρήγορο ρυθμό μετά το χτύπημα της χορδής και ενώ η χορδή συνεχίζει να ταλαντώνεται για αρκετό χρόνο μετά, ο ήχος που παράγεται είναι σχεδόν ανεπαίσθητος. Στην ηλεκτρική κιθάρα, με την παρεμβολή ενός συμπιεστή, ενισχύεται η διάρκεια (Sustain), έτσι ώστε ο ήχος να γίνεται ακουστός για μεγαλύτερη διάρκεια, εκμεταλλευόμενοι στο έπακρο την ταλάντωση της χορδής. Τέλος, ο ήχος του οργάνου έχει μεγάλους χρόνους μετώπου και αποδέσμευσης, ενώ του πιάνου έχει ταχύ μέτωπο αλλά αργή πτώση.



Σχήμα 3.

Περιβάλλουσες διάφορων οργάνων. 1. Κιθάρα, 2. Ηλεκτρική κιθάρα μετά την παρεμβολή ενός συμπιεστή (Sustainer), 3. Όργανο (Pipe Organ), 4. Πιάνο

4. “Φάσμα συχνοτήτων”

Ένας σύνθετος ήχος αποτελείται από τη θεμελιώδη συχνότητα και συχνότητες υψηλότερες της θεμελιώδους που ονομάζονται υπέρτονοι ή αρμονικές. Ο συνολικός αριθμός αρμονικών, η ένταση της κάθε μιας, η κατανομή στο ακουστικό φάσμα και οι συσχετισμοί των φάσεών τους, αποτελούν το **φάσμα συχνοτήτων** του ήχου και καθορίζουν το σχήμα της κυματομορφής του. Το φάσμα συχνοτήτων είναι εκείνο το χαρακτηριστικό που μπορεί να ξεχωρίσει δυο ήχους ίδιας θεμελιώδους συχνότητας και έντασης, όπως για παράδειγμα τη νότα Λα του πιάνου που αντιστοιχεί σε συχνότητα 440Hz, με την αντίστοιχη νότα ίδιας έντασης που προέρχεται από μια κιθάρα. Η διαφορά αυτή στον ήχο είναι “ποιοτική” και οφείλεται στο διαφορετικό φάσμα συχνοτήτων του κάθε οργάνου.

Από επιστημονικής πλευράς το φάσμα των συχνοτήτων μπορεί με μεγάλη ακρίβεια και να εκφραστεί με μαθηματικούς όρους που συνδέουν τη θεμελιώδη συχνότητα με τις παράγωγες από τις οποίες αποτελείται. Η θεμελιώδης συχνότητα είναι η χαμηλότερη στο φάσμα ενός σύνθετου ήχου και έχει το βασικό

χαρακτηριστικό που καθορίζει το ύψος του ήχου. Αν και συνήθως η θεμελιώδης συχνότητα είναι και η πιο δυνατή σε ένταση, υπάρχουν ορισμένα όργανα στα οποία η θεμελιώδης συχνότητα είναι ασθενέστερη από κάποιες παράγωγες συχνότητες.

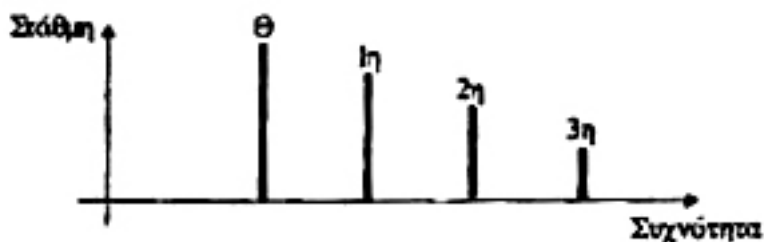
Έτσι λοιπόν η θεμελιώδης συχνότητα ταλάντωσης μιας τεντωμένης χορδής αποδίδεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$f_0 = \frac{1}{2l \cdot \sqrt{\frac{F}{m}}}$$

Όπου F είναι η τάση της χορδής σε dynes, m είναι η μάζα της ανά μονάδα μήκους (1 cm) σε gr και l το μήκος της σε cm. Η μάζα m της χορδής μπορεί να εκφραστεί από τον ακόλουθο τύπο:

$$m = \pi r^2 d$$

όπου $\pi=3,14$, r είναι η ακτίνα της χορδής σε cm , ενώ d η πυκνότητα του υλικού από το οποίο αυτή αποτελείται και το μετράμε σε gr/cm^2 .

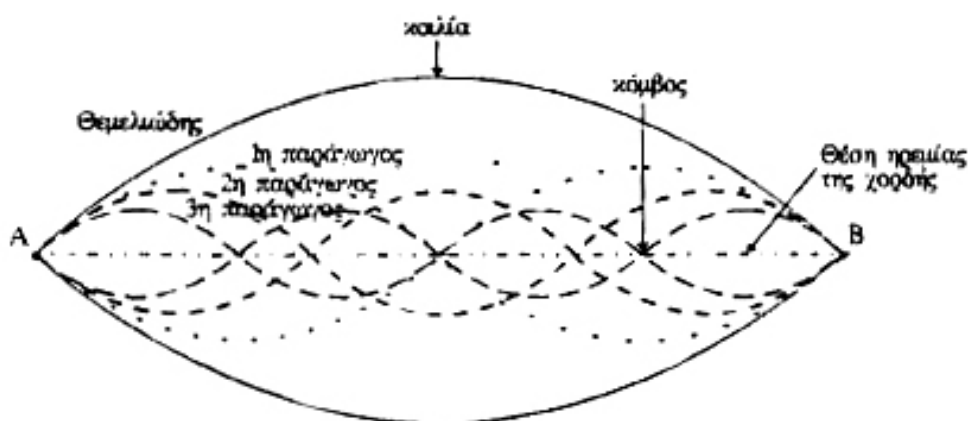


Σχήμα 4.

Η απεικόνιση των παραγώγων και της θεμελιώδους στο πεδίο της συχνότητας.

Μια τεντωμένη χορδή στερεωμένη στα δυο της άκρα με κατάλληλο μηχανισμό ώστε να μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση της, αποτελεί το **μονόχορδο** που είναι γνωστό από τα πειράματα του Πυθαγόρα επάνω στη μελέτη της ταλάντωσης και την παραγωγή των αρμονικών. Ένα τέτοιο πειραματικό όργανο με το οποίο και θα ασχοληθούμε, είναι και η κιθάρα όπου οι χορδές της είναι στερεωμένες στον

καβαλάρη και το ζυγό, ενώ μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση των χορδών της με τα κλειδιά.



Σχήμα 5.

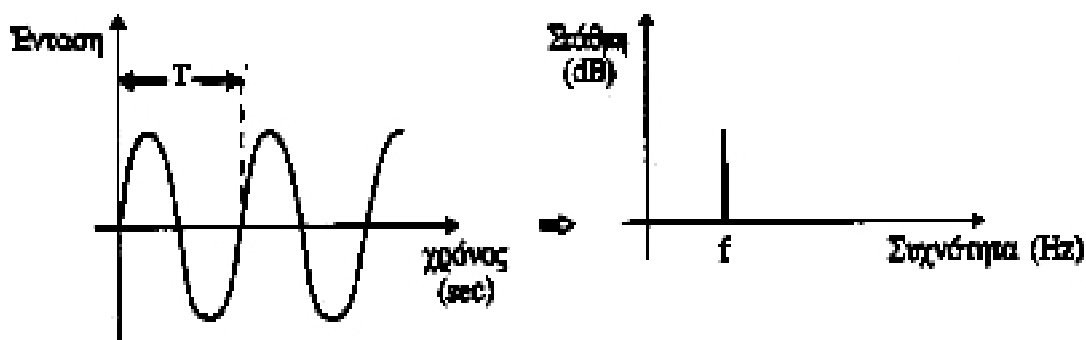
Οι πολλαπλές ταλαντώσεις μιας χορδής AB δημιουργούν τις παράγωγες συχνότητες πέραν της θεμελιώδους.

5. “Αρμονικό περιεχόμενο”

Στους σύνθετους τόνους των μουσικών οργάνων οι παράγωγες συχνότητες, που συναντώνται κυρίως με τις ονομασίες *overtones* ή *partials*, είναι κυρίως ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας και ονομάζονται **αρμονικές συχνότητες** (harmonics). Συνήθως η θεμελιώδης συχνότητα ονομάζεται και “1^η αρμονική”. Αντίστοιχα, εκείνες οι αρμονικές που δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, χαρακτηρίζονται σαν **μη αρμονικές συχνότητες** (inharmonics). Εκτός όμως από τις αρμονικές και μη αρμονικές συχνότητες, υπάρχουν και οι **υποαρμονικές συχνότητες** (subharmonics). Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη σχέση μιας συχνότητας f με μια άλλη f' που προηγείται αυτής σε μια δεδομένη σειρά αρμονικών συχνοτήτων ανιούσας φοράς. Για παράδειγμα το χαμηλότερο ΦΑ του πιάνου στα 43,6 Hz είναι η 3^η υποαρμονική του ΝΤΟ των 130,8 Hz της τρίτης οκτάβας, ενώ το ΝΤΟ των 65,4 Hz της δεύτερης οκτάβας είναι η 2^η υποαρμονική του προηγούμενου ΝΤΟ. Οι υποαρμονικές λοιπόν συχνότητες εκφράζουν ακέραια υποπολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας, δηλαδή το 1/2, 1/3, 1/4 κ.ο.κ αυτής. Πρέπει να πούμε ότι οι φυσικοί ήχοι των οργάνων δεν

περιέχουν υποαρμονικές συχνότητες αλλά μπορούμε να τις παράγουμε τεχνητά με ειδικά ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως το *octaver*.

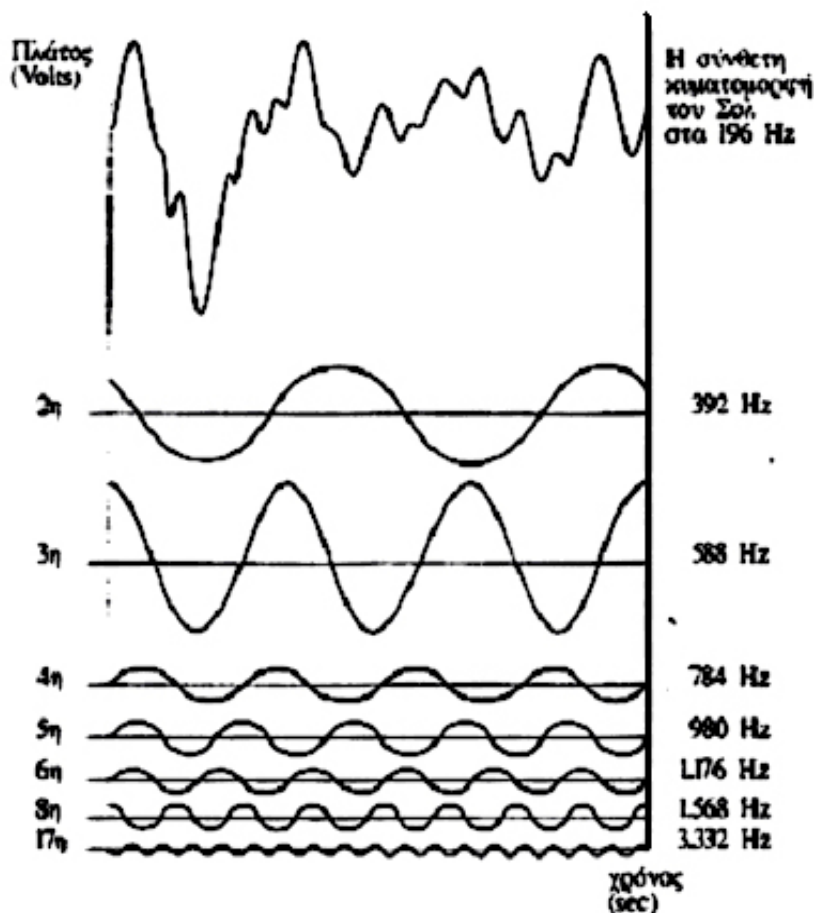
Κάθε αρμονική αναπαρίσταται με μια κατακόρυφη γραμμή, το ύψος της οποίας δείχνει την έντασή της. Στο σχήμα 6 η αρμονική δομή του ημίτονου περιλαμβάνει μια μόνο συχνότητα. Γι αυτό και το ημίτονο είναι η απλούστερη ταλάντωση ή το απλούστερο κύμα στη φύση.



Σχήμα 6

Η κυματομορφή του ημίτονου συχνότητας f και η απεικόνισή της στο πεδίο συχνότητας (ανάλυση Fourier)

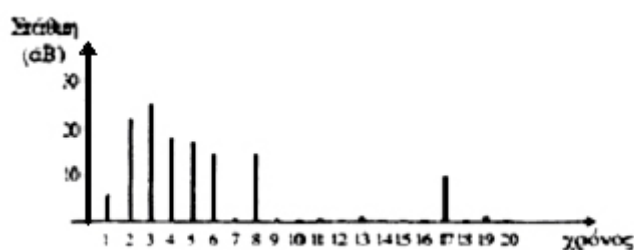
Στο σχήμα 7 όπου φαίνεται η αρμονική δομή του τόνου του βιολιού, η θεμελιώδης συχνότητα έχει πολύ χαμηλότερη ισχύ από τις αρμονικές της. Αυτό οφείλεται στον τρόπο διέγερσης της χορδής από το δοξάρι αλλά και τους συντονισμούς του σώματος του βιολιού που λειτουργεί σαν ηχείο. Τέλος στο σχήμα 9 φαίνεται η αρμονική δομή του τετραγωνικού παλμού που ηχεί περίπου όπως το κλαρινέτο. Στα σχήματα αυτά φαίνεται το αρμονικό περιεχόμενο απλών και σύνθετων ήχων – τόνων σε συνδυασμό με τις κυματομορφές του.



Σχήμα 7.

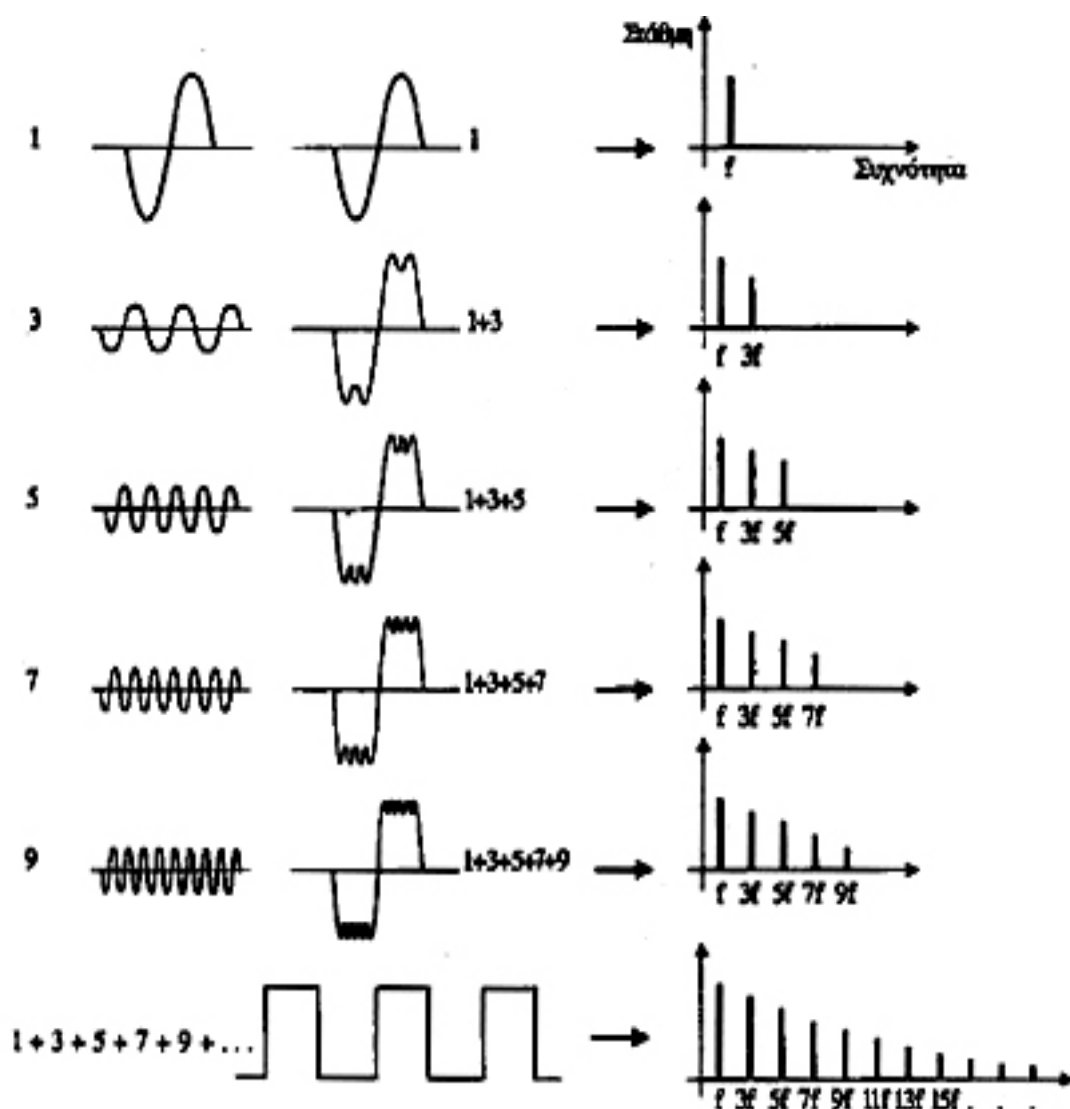
Η κομάτωση του Σολ (196Hz) και οι κυματομορφές των αρμονικών που τη συνθέτουν, δηλαδή τα ημίτονα.

Η ανάλυση του ήχου σε αρμονικές (ή γενικότερα παράγωγες) και η αναπαράστασή της σε κάποιο σχήμα ονομάζεται **ανάλυση Fourier**, ή **αρμονική ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας**.



Σχήμα 8.

Η αρμονική ανάλυση που δείχνει τις ισχύεις των αρμονικών σε dB στο πεδίο συχνότητας (ανάλυση Fourier)



Σχήμα 9.

Πως παράγεται η κομματομορφή ενός τετραγωνικού παλμού όταν προστίθενται στη θεμελιώδη περιττές αρμονικές με φθίνουσες αντίστοιχες στάθμες. Απεικόνιση στο χρόνο και στη συχνότητα.

6. “Αρμονικό φάσμα”

Αν προσπαθήσουμε να κοιτάξουμε στο φάσμα του ήχου μιας μουσικής νότας, θα παρατηρήσουμε ότι έχουμε μόνο ένα μικρό αριθμό από αξιοπρόσεκτα στοιχεία για κάθε συχνότητα. Συγκεκριμένα για τη νότα G_4 η οποία είναι βολική για το ύψος που

αντιστοιχεί περίπου στα 400Hz που είναι ένα καλό νούμερο για υπολογισμούς. Έτσι για το φάσμα αυτής της νότας έχουμε μια σειρά από κορυφές στις παρακάτω συχνότητες:

400Hz, 800Hz, 1200Hz, 1600Hz, 2000Hz, 2400Hz κτλ

οπότε για $f=400\text{Hz}$ ισοδυναμεί με

$f, 2f, 3f, 4f \dots nf$ κτλ

Η συχνότητα των 400Hz θεωρείται η θεμελιώδης συχνότητα της δόνησης του αέρα μέσα στο όργανο και η σειρά από συχνότητες πολλαπλασίας αυτής λέγονται αρμονικές αυτής της νότας.

Η θεμελιώδης συχνότητα της G_4 είναι 400Hz, οπότε αυτό σημαίνει ότι ο αέρας μέσα στο όργανο ταλαντώνεται με ένα ρυθμό ο οποίος επαναλαμβάνεται 400 φορές το δευτερόλεπτο ή μια φορά κάθε $1/400$ του δευτερολέπτου. Αυτό το διάστημα του χρόνου που χρειάζεται η ταλάντωση για να ολοκληρωθεί, ονομάζεται περίοδος και συμβολίζεται με το γράμμα **T**. Στην περίπτωση μας εφόσον η συχνότητα είναι $f=400$ επαναλήψεις το δευτερόλεπτο, η περίοδος θα ισούται με $T=1/400\text{sec}$.

$$T=1/f$$

Έτσι λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι για τις αρμονικές που προκύπτουν από τις σχέσεις:

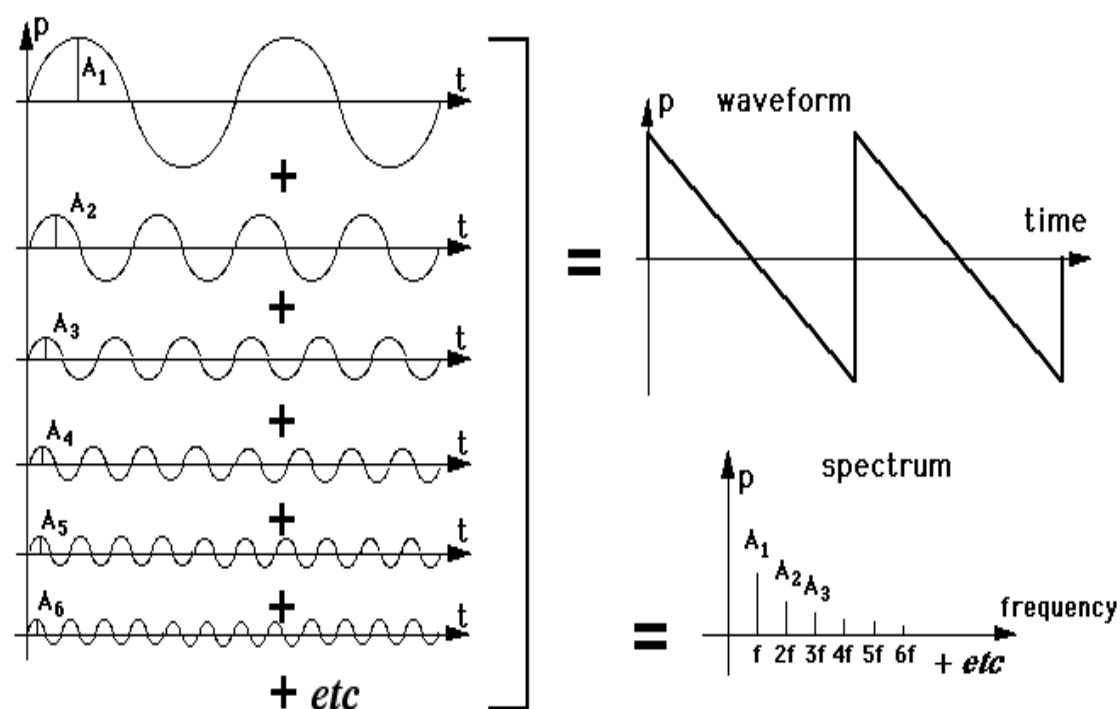
$f, 2f, 3f, 4f, \dots nf$

Οι περίοδοι που αντιστοιχούν σε κάθε συχνότητα σύμφωνα με την παραπάνω σχέση θα είναι:

$T, T/2, T/3, T/4, \dots T/n$

7. “Το φάσμα του πριονωτού κύματος”

Προσθέτοντας συνεχώς ημιτονοειδή κύματα, όπως φαίνεται αριστερά στο σχήμα, πετυχαίνουμε να πλησιάσουμε περισσότερο στο πριονωτό κύμα το οποίο φαίνεται σαν κυματομορφή πάνω δεξιά στο σχήμα καθώς φαίνεται και το φάσμα του ακριβώς από κάτω. Όταν ακούμε ένα πολύπλοκο φάσμα το οποίο φτιάχνεται προσθέτοντας τις αρμονικές μια μια, μπορούμε να ακούσουμε καθαρά την κάθε νότα που απαρτίζει τη συγχορδία. Μπορούμε επίσης να ακούσουμε τις αρμονικές σε μια νότα αν την αφήσουμε να ηχήσει για αρκετή ώρα. Επίσης, αν ακούσουμε μια σειρά από νότες οι οποίες περιέχουν από αρκετές αρμονικές η καθεμία, ακούμε την κάθε νότα σαν μια ενότητα και είναι πολύ πιο δύσκολο να διακρίνουμε τις επιμέρους αρμονικές. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι παράλληλα με το γεγονός ότι για θεμελιώδης συχνότητα αναλύεται σε επιμέρους αρμονικές, ισχύει και το αντίθετο, ότι δηλαδή μπορούμε να φτιάξουμε μια περιοδική δόνηση που προκαλείται από τη θεμελιώδη συχνότητα από έναν συνδυασμό δονήσεων των επιμέρους αρμονικών συχνοτήτων.



Σχήμα 10.

Οι έξι πρώτες αρμονικές ενός πριονωτού κύματος όπως ακούγονται σαν ένας ήχος

8. “Το αρμονικό φάσμα των μουσικών οργάνων”

Η αναγνώριση ή αντίληψη των αρμονικών συχνοτήτων από τον ακροατή και κατ’ επέκταση η ηχητική τους συμπεριφορά στο ηχόχρωμα ενός οργάνου, εξαρτάται από την τάξη τους καθώς και τη στάθμη έντασής τους δηλαδή της ακουστικής τους πίεσης σε dB. Οι αρμονικές και μη συχνότητες των οποίων η στάθμη βρίσκεται στο επίπεδο της στάθμης του θορύβου του περιβάλλοντος ή και χαμηλότερα, προφανώς δεν γίνονται αισθητές με αποτέλεσμα η συνεισφορά τους στο ηχόχρωμα να είναι αμελητέα. Για παράδειγμα, αν ένα όργανο παράγει ήχο στάθμης 75dB σε ένα χώρο ακρόασης με στάθμη θορύβου 40dB τότε στο ηχόχρωμα του οργάνου συνεισφέρουν πρακτικά εκείνες οι αρμονικές που βρίσκονται πάνω από τη στάθμη των 40dB, ενώ οι υπόλοιπες ενώ έχουν παραχθεί δεν γίνονται αντιληπτές. Στα πολυφωνικά όργανα όπως είναι η κιθάρα, εξ αιτίας της συνήχησης νότων λόγω των συγχορδιών, είναι δυνατόν να παράγονται λόγω ενδοδιαμόρφωσης νέες συχνότητες. Δηλαδή, η μείξη των συχνοτήτων που περιέχονται σε μια συγχορδία επεκτείνει το φάσμα των συχνοτήτων κάτω και πάνω από τη θεμελιώδη χαμηλότερη και υψηλότερη αντίστοιχα θεμελιώδη συχνότητα – νότα του οργάνου.

Ο καθορισμός του αρμονικού φάσματος ενός οργάνου δεν μπορεί να γίνει επακριβώς, γιατί το πλήθος και οι στάθμες των αρμονικών και μη συχνοτήτων που παράγονται εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τα υλικά και ο τρόπος κατασκευής του οργάνου. Επίσης η αντίληψη του αρμονικού φάσματος εξαρτάται και από τον χώρο στον οποίο παράγεται ο ήχος.

Όσον αφορά την κλασσική κιθάρα, οι νότες που παράγει είναι τυπικά από το ΜΙ των 82,4Hz έως το ΣΙ των 987,8Hz. Όσο μεγαλύτερο είναι το σώμα της κιθάρας, τόσο ευνοούνται οι χαμηλές συχνότητες, επειδή ο μεγαλύτερος όγκος αέρα του ηχείου ενισχύει τις χαμηλότερες συχνότητες. Έτσι λοιπόν μία μεγάλη κιθάρα ηχεί πιο ζεστά και γεμάτα από μια μικρότερη.

Οι πλαστικές χορδές της κλασσικής κιθάρας παράγουν λίγες υψηλές αρμονικές και για αυτό ο ήχος είναι σχετικά θαμπός. Αν οι χορδές χτυπηθούν δυνατώτερα δεν θα παραχθεί μόνο δυνατώτερος, αλλά και πιο λαμπρός, διότι τότε διεγείρονται και βραχύτερες ταλαντώσεις οι οποίες ισοδυναμούν με υψηλότερες αρμονικές.

Οι αρμονικές που παράγονται εξαρτώνται από το σημείο που χτυπιούνται οι χορδές, δηλαδή την απόσταση του σημείου διέγερσης σε σχέση με την απόσταση από τα κλειδιά και τον καβαλάρη. Αν για παράδειγμα μια καλής κατασκευής χορδή διεγερθεί χτυπώντας την στο σύνηθες σημείο, δηλαδή περίπου στο 1/4 του μήκους της από τον καβαλάρη, τότε κατά βάση εμφανίζονται οι δεκαπέντε πρώτες αρμονικές. Από αυτές η θεμελιώδης είναι η πιο ισχυρή σε ένταση, η δεύτερη έχει περίπου τη μισή ένταση της πρώτης και οι υπόλοιπες εμφανίζονται με εντάσεις που συνεχώς φθίνουν. Οι υψηλότερες αρμονικές πέραν της δεκάτης που υπάρχουν στο φάσμα είναι αδύναμες και δεν συνεισφέρουν στο ηχόχρωμα σημαντικά, ενώ εξασθενούν γρηγορότερα από τις χαμηλές και περίπου στο πρώτο δευτερόλεπτο από τη γέννηση του ήχου έχουν εξασθενήσει δραστικά. Παρόλα αυτά όμως, οι υψηλές αρμονικές συνεισφέρουν στην ατάκα του τόνου. Όπως είπαμε και παραπάνω, το πλήθος των αρμονικών εξαρτάται από το μήκος της ταλαντούμενης χορδής και γι αυτό στα χαμηλά τάστα παράγονται λιγότερες αρμονικές απ' ό,τι στα ψηλά.

Στην κιθάρα όπως και σε όλα τα έγχορδα, παρατηρείται το φαινόμενο της μη αρμονικότητας, δηλαδή την παραγωγή μη αρμονικών συχνοτήτων, το οποίο προκαλείται από το στιγμιαίο τέντωμα της χορδής πριν αφηθεί να ταλαντωθεί. Αυτό διαρκεί για λίγο στο ξεκίνημα του ήχου και οφείλεται στη δημιουργία μιας μικρής μετατόπισης ύψους (δίεση), έτσι ώστε να παράγεται ένα μη αρμονικό φάσμα σε σχέση με το κανονικό μήκος της χορδής, αλλά αρμονικές του επιμηκυμένου μήκους της χορδής. Αυτή η μη αρμονικότητα είναι εντονότερη στα μικρότερα μήκη της χορδής, δηλαδή στις υψηλές νότες, απ' ό,τι στα μεγαλύτερα μήκη των χαμηλότερων νοτών, καθώς επίσης εξαρτάται και από το πάχος της χορδής. Έτσι μπορεί να εκτιμηθεί ότι το πρακτικό εύρος των συχνοτήτων της κλασσικής κιθάρας εκτείνεται από τα 82Hz έως προσεγγιστικά τα 8 με 9kHz.

Όσον αφορά την ακουστική κιθάρα την οποία και μελετάμε, οι νότες που παράγει αρχίζουν από το **Mi** των 82,4Hz έως και το **#Ντο** των 1108,7Hz. Οι μεταλλικές χορδές έχουν πολύ πιο πλούσιο αρμονικό φάσμα από τις πλαστικές χορδές της κλασσικής κιθάρας και κατά τη διέγερση – ταλάντωσή τους παράγουν αρμονικές έως και την 25^η (και πολλές φορές πέραν αυτής). Έτσι ο ήχος τους είναι πιο λαμπρός και διαυγής.

Η δεύτερη και τρίτη αρμονική έχουν στην αρχή του τόνου ένταση μεγαλύτερη από την ένταση της θεμελιώδους. Η τέταρτη έχει αρκετή ένταση και οι υπόλοιπες

φθίνουν σε ένταση όσο αυξάνει η τάξη τους. Οι αρμονικές έως και την 9^η παραμένουν για αρκετό χρόνο μετά την ατάκα, ενώ πέραν της ενάτης εξασθενούν σημαντικά περίπου μισό δευτερόλεπτο μετά το χτύπημα της χορδής.

Το σώμα της κιθάρας και ο τρόπος διέγερσης των χορδών επιδρούν στο ηχόχρωμα κατά τον ίδιο τρόπο που επιδρούν αντίστοιχα και στην κλασική κιθάρα. Το ποσό των αρμονικών που παράγονται στα πάνω τάστα, είναι και στην ακουστική μεγαλύτερο από αυτό που παράγεται στα κάτω τάστα. Επίσης, εμφανίζεται το φαινόμενο της μη αρμονικότητας. Προσεγγιστικά, το άνω όριο του φάσματος της ακουστικής κιθάρας εκτιμάται ότι εκτείνεται πρακτικά έως τα 12 με 15kHz, ενώ η ατάκα της είναι πολύ γρήγορη λόγω της παραγωγής πολύ υψηλών αρμονικών.

9. “Η έννοια της χροιάς”

Εμπειρικά θα μπορούσαμε να αποδώσουμε στη χροιά τον ορισμό του χαρακτηριστικού εκείνου γνωρίσματος, το οποίο διακρίνει το άκουσμα των ήχων. Είναι δηλαδή αυτό που δίνει στον ακροατή τη δυνατότητα να αναγνωρίσει την πηγή ενός ήχου, όπως για παράδειγμα το μουσικό όργανο από το οποίο μπορεί να παραχθεί ένας ήχος.

Η χροιά είναι η υποκειμενική αντίληψη του αρμονικού περιεχομένου του ήχου, η “απόχρωση” ή το χρώμα του ήχου, γι αυτό και αποκαλείται αλλιώς και ηχόχρωμα. Η αίσθηση της χροιάς ενός ήχου εξαρτάται από τον αριθμό των παραγώγων συχνοτήτων που περιέχει, την αρμονική ή μη αρμονική σχέση τους με τη θεμελιώδη, την κατανομή τους, τη σχετική έντασή τους καθώς επίσης τη θεμελιώδη αλλά και συνολική έντασή τους. Η ποσότητα των παραγώγων ήχων που περιέχεται σε έναν ήχο καθορίζει και το πόσο πλούσιος είναι ένας ήχος, έτσι ώστε όσο περισσότερες παράγωγες συχνότητες περιέχει ένας ήχος τόσο πιο εμπλουτισμένος είναι.

Οι αρμονικές παράγωγες συχνότητες δημιουργούν με τη θεμελιώδη και μεταξύ τους “σύμφωνα” ή εύφωνα μουσικά διαστήματα. Έτσι για παράδειγμα η 2^η και 4^η αρμονική απέχουν από τη θεμελιώδη μια και δυο οκτάβες αντίστοιχα, η 3^η και η 6^η απέχουν διάστημα πέμπτης καθαρό, ενώ η 5^η και η 10^η απέχουν διάστημα τρίτης μεγάλο. Αρκετοί τόνοι διαφοράς που δημιουργούνται από τους συνδυασμούς των αρμονικών, έχουν συχνότητα ίση με τη θεμελιώδη, οπότε η ταυτόχρονη παρουσία των αρμονικών ισοδυναμεί με συνήχηση, που έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία

νέων τόνων. Γι αυτό το λόγο η ύπαρξη αρμονικών συχνοτήτων σ' έναν ήχο διατηρεί και ενισχύει την αίσθηση του ύψους (τονικότητα).

Αντίθετα, οι μη αρμονικές συχνότητες σχηματίζουν με τη θεμελιώδη και μεταξύ τους "διάφωνα" μουσικά διαστήματα. Οι τόνοι διαφοράς δεν έχουν συχνότητες ίσες με τη θεμελιώδη, γι' αυτό η ύπαρξη μη αρμονικών συχνοτήτων σ' έναν ήχο τείνει να εξαφανίσει την αίσθηση του ύψους. Παρ' όλα αυτά, μια μικρή ποσότητα μη αρμονικού περιεχομένου σε κάποιον ήχο μπορεί και να τον εμπλουτίσει. Στην κατηγορία των οργάνων που έχουν φάσμα συχνοτήτων το οποίο περιέχει πολλές μη αρμονικές συχνότητες είναι τα κρουστά, γι αυτό και το ύψος τους είναι δυσδιάκριτο. Μικρό επίσης ποσοστό μη αρμονικών συχνοτήτων υπάρχει στους περισσότερους "φυσικά" παραγόμενους ήχους και οφείλεται στις ιδιαιτερότητες του ταλαντούμενου στοιχείου.

Για παράδειγμα στη χορδή της κιθάρας, όπου οι αρμονικές που παράγονται είναι ανάλογες του μήκους της χορδής, κατά τη διέγερσή της στιγμιαία επιμηκύνεται και οι παράγωγες συχνότητες που εμφανίζονται εκείνη τη στιγμή δεν είναι αρμονικές ανάλογες του κανονικού της μήκους.

Ο παράγοντας που ορίζει αν ο ήχος είναι ακουστικά ωραίος, είναι η κατανομή των αρμονικών και μη συχνοτήτων στο ακουστικό φάσμα και όχι το πλήθος τους σε αυτό. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το βιολί *Stradivarius*, το οποίο έχει ομοιόμορφα κατανεμημένες τις αρμονικές του στην περιοχή από 3 έως 5kHz, με αποτέλεσμα να ηχεί υπέροχα . Έτσι ένα άλλο απλό βιολί με τυχαία κατανομή των αρμονικών ηχεί μέτρια . Η σχετική ισχύς των αρμονικών είναι επίσης ένα κριτήριο της ποιότητας του ήχου, καθώς και η ισχύς της θεμελιώδους η οποία είναι σημαντικότερο χαρακτηριστικό στα περισσότερα όργανα . Στα μουσικά όργανα μεγάλη είναι και η συνεισφορά του σώματός τους για το τελικά παραγόμενο αρμονικό φάσμα . Έτσι λοιπόν ο τρόπος σχεδίασης και κατασκευής, καθώς και τα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται ένα όργανο, είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι διαμορφώνουν το αρμονικό περιεχόμενο που παράγει το ταλαντούμενο στοιχείο. Δεν πρέπει όμως να παραβλέψουμε και τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζει ο μουσικός το όργανο, ώστε να ακουστεί τελικά η ιδιαίτερη φωνή του οργάνου, η χροιά .

10. “ Το αρμονικό περιεχόμενο – Η χροιά σε σχέση με το χρόνο ”

Το αρμονικό περιεχόμενο του ήχου από ένα μουσικό όργανο δεν παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του ήχου. Έτσι λοιπόν οι εντάσεις των αρμονικών, από τη γέννησή τους έως και την παύση του ήχου δεν ακολουθούν την ίδια πορεία μεταβολής, δηλαδή στην αρχή να είναι όλες εξίσου ισχυρές, κατόπιν να φθίνουν ομοιόμορφα και τέλος να μηδενίζονται όλες ταυτόχρονα. Αντίθετα κάθε αρμονική ακολουθεί τη δική της περιβάλλουσα, όπως προέκυψε από μελέτες πάνω στη σύνθεση του ήχου. Έτσι μπορούμε να εξηγήσουμε γιατί ο ήχος κατά την διέγερση μιας χορδής της κιθάρας ο ήχος είναι λαμπρός στην αρχή (attack) λόγω των υψηλών αρμονικών που έχουν αρκετή ισχύ, ενώ αργότερα γίνεται θαμπός και μπάσος επειδή οι υψηλές αρμονικές φθίνουν γρηγορότερα από τις χαμηλές.

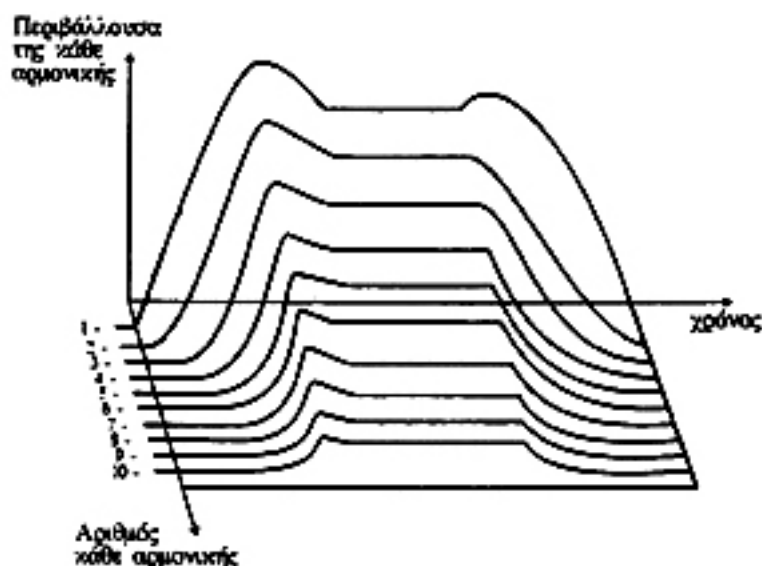
Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι περιβάλλουσες των αρμονικών ενός ήχου, όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι υψηλές αρμονικές έχουν ισχύ μόνο στο μέσο του τόνου, ενώ στην αρχή και στο τέλος είναι τελείως εξασθενημένες.

11. “ Η πραγματική φύση των αρμονικών ”

Παρατηρήσαμε ότι κάθε παράγωγος συχνότητα συμβολίζεται με μια κατακόρυφη γραμμή στο αρμονικό φάσμα που δηλώνει ότι αντιστοιχεί σε μια μόνο συχνότητα. Αυτός ο τρόπος απεικόνισης του αρμονικού περιεχομένου είναι μια απλουστευμένη αναπαράσταση. Στην πραγματικότητα η κάθε παράγωγος δεν αντιστοιχεί σε μια μόνο συχνότητα, αλλά σε μια μικρή ομάδα συχνοτήτων.

Όπως είδαμε και στο παράδειγμα της χορδής, οι παράγωγες “γεννώνται” από τις δονήσεις των μερών του δονούμενου στοιχείου. Εξ' αιτίας των υλικών από τα οποία έχει κατασκευαστεί το στοιχείο, το κάθε μέρος του που αντιστοιχεί σε μια παράγωγο, ταλαντώνεται σε περισσότερες από μια γειτονικές συχνότητες. Γι' αυτό η κατακόρυφη γραμμή που συμβολίζει μια παράγωγο (αρμονική ή όχι), στην πραγματικότητα “καλύπτει” μια ευρύτερη περιοχή γύρω από τη γραμμή όμοια και

έχουσα άμεση σχέση με την καμπύλη συντονισμού, που περιέχει πολλές γειτονικές συχνότητες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 11.

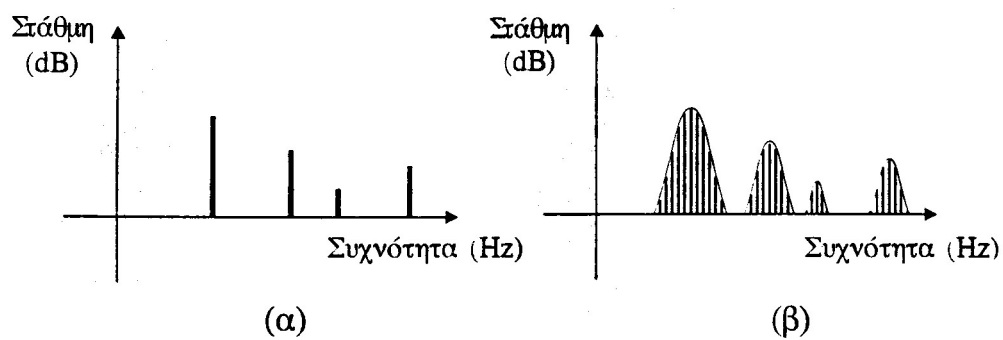


Σχήμα 11.

Οι περιβάλλουσες της θεμελιώδους και των αρμονικών ενός ήχου

Η ευρύτητα της περιοχής δείχνει και την καθαρότητα της παραγωγής. Όσο πιο στενή είναι, τείνοντας σε μια γραμμή τόσο πιο καθαρή είναι η παράγωγος και τείνει σε μια μόνο συχνότητα, ενώ όσο ευρύτερη γίνεται τόσο περισσότερες γειτονικές συχνότητες περιλαμβάνει. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που όμως για λόγους απλούστευσης δεν λαμβάνεται συχνά υπ' όψη, αφορά τις αρμονικές συχνότητες των ήχων των μουσικών οργάνων καθώς και το κατά πόσο είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους. Ακριβείς φασματικές αναλύσεις ήχων απέδειξαν ότι υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στην αρμονική σχέση των παραγώγων.

Έτσι λοιπόν προκύπτει το συμπέρασμα ότι το αρμονικό φάσμα ή κυματομορφή των ακουστικών οργάνων αλλάζει συνεχώς, μερικές φορές αργά όπως στην κιθάρα και μερικές φορές πιο γρήγορα όπως για παράδειγμα στο βιολί, έτσι ώστε η αντίληψη που δημιουργούμε για τη χροιά τους εξαρτάται από τον τρόπο που γίνονται αυτές οι αλλαγές.



Σχήμα 12.

- (α) Η απλουστευμένη αναπαράσταση ενός φάσματος.
- (β) Το πραγματικό φάσμα.

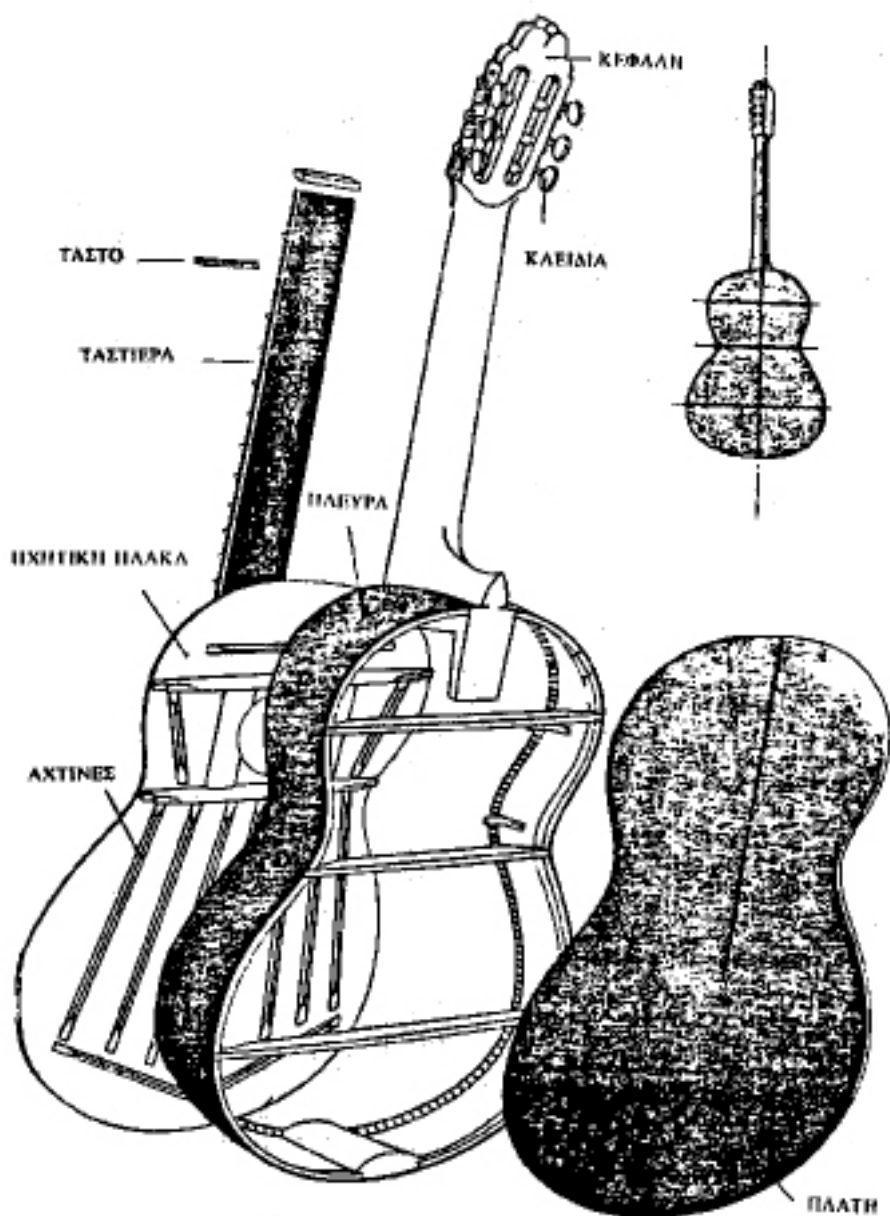
B. Η ΚΙΘΑΡΑ

1. “Τα μέρη της κιθάρας”

Για να κατανοήσουμε όμως καλύτερα όλα αυτά, ας τα δούμε σαν εφαρμογή στο αντικείμενο που θα μελετήσουμε, δηλαδή το σώμα της κιθάρας.

Τα κύρια στοιχεία μιας κιθάρας είναι οι έξι χορδές της, το σώμα και ο βραχίονας (μάνικο). Οι χορδές προσαρμόζονται στη γέφυρα (καβαλάρης), η οποία είναι κολλημένη στο πάνω επίπεδο του σώματος (καπάκι) και κουρδίζεται στις νότες (E_2), (A_2), (D_3), (G_3), (B_3), (E_4). Οι χορδές είναι τεντωμένες πάνω από το καπάκι και περνώντας πάνω από την ταστιέρα καταλήγουν στον μηχανισμό κουρδίσματος (κλειδιά). Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 13, το σώμα της κιθάρας παρόλο ότι φαίνεται σαν ένα ξύλινο κουτί, στην πραγματικότητα είναι μια σύνθετη κατασκευή.

Αποτελείται από το εμπρός επίπεδο, το καπάκι ή ηχητική πλάκα, το πίσω επίπεδο ή πλάτη και την ταστιέρα η οποία προσαρμόζεται στο καπάκι και τα πλαϊνά. Η πλάτη γίνεται άκαμπτη τοποθετώντας σ’ αυτήν λεπτές τραβέρσες, ενώ στο πάνω μέρος του καπακιού υπάρχει ένα άνοιγμα, η ηχητική οπή. Πάνω και κάτω από την οπή, το καπάκι δένεται με ακτίνες που υποβαστάζουν το βραχίονα και την ταστιέρα, έτσι ώστε να καθιστούν το πάνω μέρος του καπακιού πολύ σταθερό.



Σχήμα 13.

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται μια κιθάρα

Η περιοχή του καπακιού που κυρίως δονείται είναι κάτω από το άνοιγμα και καλείται “ελεύθερο τμήμα” του καπακιού, στην οποία προστίθεται αξιόλογη επιπλέον ακαμψία λόγω της γέφυρας. Για να έχει μια κιθάρα τις επιθυμητές ακουστικές ιδιότητες, τηρούνται κάποιες αναλογίες στις αποστάσεις μεταξύ των τμημάτων της. Έτσι για παράδειγμα το μήκος του βραχίονα είναι το μισό του μήκους

της χορδής, η θέση τοποθέτησης της γέφυρας είναι λίγο πάνω από το μέσον του ελεύθερου τμήματος κτλ. Πρόσφατα μάλιστα, ο Richard Childere υπολόγισε τη μαθηματική έκφραση του περιγράμματος της κιθάρας, χρησιμοποιώντας ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Η έκφραση αυτή εφαρμόζεται για κιθάρες από τους παγκόσμια γνωστότερους κατασκευαστές και δίνεται από τον τύπο:

$$y = \left[\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2} - x\right)^2} \right] \cdot \left[C_1 \sqrt{C_2^2 + (x - x_0)} + y_0 \right] \quad (1)$$

Όπου L: το μήκος του σώματος της κιθάρας

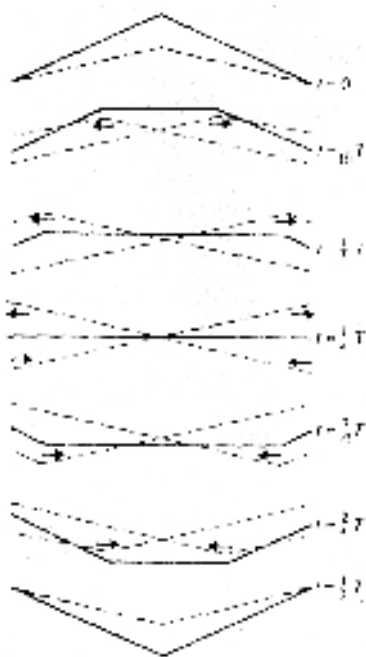
Και C_1, C_2, x_0, y_0 : παράμετροι που ορίζονται από τον παρακάτω πίνακα

ΤΥΠΟΣ ΚΙΘΑΡΑΣ	L (cm)	C_1 (cm ⁻¹)	C_2 (cm)	x_0 (cm)	y_0 (cm)
CONDE	48,51	0,0291	2,388	28,19	0,53
HAUSER	47,75	0,0264	0,178	28,45	0,42
SLOAN	48,51	0,0240	0,079	28,70	0,48
TORRES	47,75	0,0260	0,635	28,45	0,42
WALLO	49,02	0,0264	4,216	28,19	0,42
FLAT TOP	50,80	0,0028	4,166	29,97	0,45
UKE	23,37	0,3937	4,953	13,46	0,40

2. “Η Λειτουργία της κιθάρας”

Η κιθάρα παίζεται τραβώντας τη χορδή προς μια διεύθυνση και αφήνοντας την μετά ελεύθερη, έτσι ώστε η χορδή να αρχίσει να ταλαντώνεται. Το πλάτος των

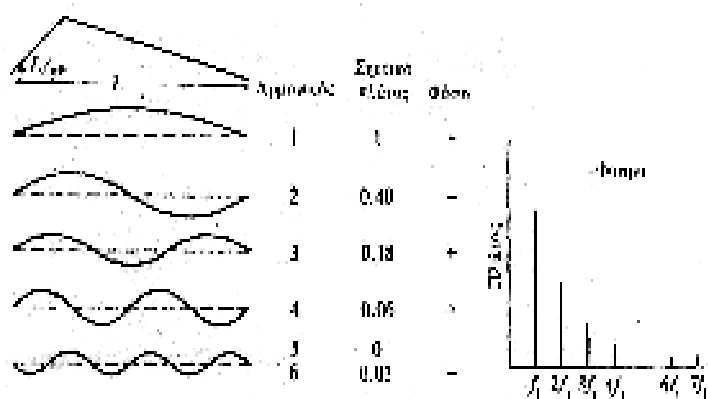
ταλαντώσεων είναι μεγάλο, αλλά λόγω της μικρής επιφάνειας της χορδής δεν ακούγεται ήχος. Ωστόσο ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας ταλάντωσης της χορδής μετατρέπεται σε ενέργεια ταλάντωσης του καπακιού. Η μεγάλη περιοχή ταλάντωσης του καπακιού το καθιστά ικανοποιητική πηγή εκπομπής ήχου, του ήχου που ακούγεται. Έτσι λοιπόν το σώμα της κιθάρας λειτουργεί σαν ένας ενισχυτής του ασθενούς ήχου των χορδών. Ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι το σώμα της κιθάρας δεν ενισχύει όμοια όλες τις συχνότητες, αλλά πως αυτό γίνεται επιλεκτικά. Έτσι για την περιγραφή της λειτουργίας του οργάνου έχει υιοθετηθεί το μοντέλο της καμπύλης “απόκρισης συχνότητας”, το οποίο δίνει μια ικανοποιητική γενική περιγραφή της λειτουργίας της κιθάρας. Το μοντέλο δεν είναι πλήρες και γι αυτό χρειάζονται να αναπτυχθούν και αρκετοί επιπλέον μηχανισμοί, οι οποίοι επηρεάζουν την απόκριση του οργάνου. Το μοντέλο αυτό υποθέτει πως η χορδή και το σώμα της κιθάρας ενεργούν ανεξάρτητα. Η απόκριση της συχνότητας του σώματος λαμβάνεται διεγείροντας το με μια ημιτονοειδή δύναμη σταθερού πλάτους και μετρώντας την ακουστική απόκριση του οργάνου με ένα μικρόφωνο καθώς η συχνότητα διέγερσης μεταβάλλεται.



Σχήμα 14.

Στο διπλανό σχήμα φαίνεται η κίνηση μιας πακτωμένης χορδής που διεγέρθηκε με τράβηγμα ακριβώς στο μέσο της, σε επτά στιγμιότυπα τα οποία καλύπτουν χρόνο ίσο με το μισό της περιόδου της. Η κίνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται σε δυο παλμούς που κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις.

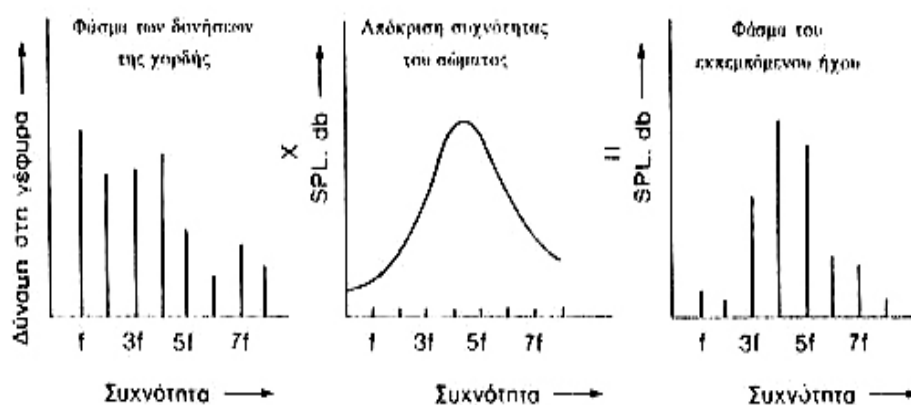
Σχήμα15.



Στο διπλανό σχήμα φαίνονται οι αρμονικές συνιστώσες που πρέπει να επιπροστεθούν για να προκύψει η μορφή της πακτωμένης χορδής η οποία διεγέρθηκε με τράβηγμα στο σημείο 1/5. Στο φάσμα του ακτινοβολούμενου ήχου θα

έχει τις ίδιες αλλά τα σχετικά πλάτη των αρμονικών συνιστωσών θα είναι εντελώς διαφορετικά λόγω των ακουστικών ιδιοτήτων του οργάνου.

Στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 16), το σώμα παριστάνεται σαν να παρουσιάζει μόνο έναν πλατύ συντονισμό. Οι εγκάρσιες ταλαντώσεις των χορδών εξασκούν μια μεταβαλλόμενη ως προς το χρόνο δύναμη στη γέφυρα. Αυτή η δύναμη έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να παρασταθεί ως προς τη συχνότητα σαν ένα σύνολο ημιτονοειδών δυνάμεων αρμονικά συνδεδεμένων. Τα σχετικά ύψη των αρμονικών στο φάσμα της ταλάντωσης της χορδής, καθορίζονται από τον μουσικό. Αν η χορδή ταλαντώνεται, απευθείας η δύναμη που εξασκείται στη γέφυρα ενεργοποιεί το σώμα και η κίνηση του σώματος επαυξάνει την εκπομπή ενέργειας από τη χορδή. Ωστόσο επειδή το σώμα δεν ανταποκρίνεται γραμμικά, το φάσμα του εκπεμπόμενου ήχου είναι πολύ διαφορετικό από αυτό της ταλαντούμενης χορδής. Συμπεραίνεται επομένως πως η τελική ποιότητα του ήχου της κιθάρας, που περιγράφεται με το φάσμα του εκπεμπόμενου ήχου, εξαρτάται από την αρχική διέγερση των χορδών και τη μηχανική απόκριση του σώματος.



Σχήμα 16.

Το μοντέλο της καμπύλης για τη συχνοτική απόκριση

3. “Η χορδή στην κιθάρα.”

Ο τόνος μιας ταλαντούμενης χορδής εξαρτάται από το μήκος, τη συχνότητα και τη μηχανική τάση. Αναλυτικά μπορούμε να μιλήσουμε και για τους παρακάτω παράγοντες.

- Τη μάζα της χορδής, η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο πιο αργά δονείται η χορδή. Στις ακουστικές κιθάρες που έχουν μεταλλικές χορδές, η διατομή τους αυξάνεται από τις ψηλότερες προς τις χαμηλότερες νότες. Στις κλασσικές κιθάρες όμως η αλλαγή της διατομής της χορδής μεταβάλλεται κάπως πολύπλοκα, σύμφωνα με την πυκνότητά της. Έτσι λοιπόν στις τρεις μικρής πυκνότητας νάιλον χορδές E,B,G η διατομή αλλάζει ανεξάρτητα από τις άλλες τρεις με μεταλλική επένδυση D, A, E.

- Η συχνότητα επίσης αλλάζει με την αλλαγή του τεντώματος της χορδής. Τεντώνοντας λοιπόν μια χορδή παραπάνω, ανεβάζουμε τον τόνο.

- Η συχνότητα επίσης εξαρτάται και από το μήκος της χορδής που είναι ελεύθερο να ταλαντωθεί. Αυτό το ελέγχουμε την ώρα που παίζουμε με τα δάχτυλά μας πατώντας στα ανάλογα τάστα, έτσι ώστε όσο μικραίνουμε το ελεύθερο τμήμα της χορδής να ανεβάζουμε τον τόνο.

- Τέλος είναι ο τρόπος της δόνησης που αποτελεί ξεχωριστό κεφάλαιο.

Ο Nevile H.Fletcher θεωρεί μια ιδανική χορδή και εν συνεχεία προσθέτει στοιχεία, έτσι ώστε να φτάσει στη συμπεριφορά μιας πραγματικής χορδής. Αρχικά θεωρεί μια χορδή μήκους L , ακτίνας r και πυκνότητας ρ , τεντωμένη με τάση T ανάμεσα σε δυο στερεά στηρίγματα. Η εξίσωση της μετατόπισης της χορδής στον άξονα των y , όταν ο άξονας των x βρίσκεται κατά μήκος της χορδής δίνεται :

$$\pi r^2 \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (2)$$

ενώ μια παρόμοια σχέση ισχύει και για τη μετατόπιση πάνω στον άξονα των z . Συνήθως αντί για την τάση T χρησιμοποιείται η **ειδική παραμόρφωση**:

$$S = \frac{T}{\pi r^2} \quad (3)$$

για την οποία ισχύει:

$$S = Y \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) \quad (4)$$

όπου Y : η σταθερά του Young

L : το μήκος της χορδής κάτω από τάση

L_0 : το φυσικό μήκος της χορδής

Οι πιθανοί τρόποι δόνησης της χορδής παρουσιάζουν συχνότητες:

$$f_n = nf_1 = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{S}{\rho}} \quad (5)$$

και η γενική μορφή τους δίνεται :

$$y_n = a_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos(2\pi f_n t + \phi_n) \quad (6)$$

Τα πλάτη των τρόπων δόνησης ή αρμονικών με χρήση της ανάλυσης Fourier βρίσκονται:

$$a_n = \frac{2a}{(n\pi)^2} \frac{L^2}{l(L-l)} \sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right) \quad (7)$$

όπου a : η αρχική απόκλιση

l : η απόσταση του σημείου έλξεως της χορδής από το ένα άκρο της.

Η δύναμη που εξασκείται από τη χορδή στα στηρίγματά της είναι :

$$F = T \frac{dy}{dx} \quad (8)$$

και μπορεί να ορισθεί για κάθε νιοστή συνιστώσα της δύναμης.

$$F_n = \frac{2aT}{n\pi} \cdot \frac{L}{l(L-l)} \cdot \sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right) \quad (9)$$

4. “Η ακαμψία της χορδής”

Αν ληφθεί υπόψη η ακαμψία τη χορδής, η εξίσωση (2) μετατρέπεται στην πιο σύνθετη μορφή:

$$\pi^2 \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \pi^2 Y \frac{(L-L_0)}{L_0} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \pi^4 Y \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (10)$$

η οποία δεν είναι δυνατόν να επιλυθεί επακριβώς. Οι συχνότητες των αρμονικών δίνονται από τον τύπο:

$$f_n = n f_1^0 \left[1 + \beta + \beta^2 + \frac{n^2 \pi^2}{8} \beta^2 \right] \quad (11)$$

όπου f_1^0 : η θεμελιώδης συχνότητα της ίδιας χορδής χωρίς ακαμψία.

$$\beta = \frac{r^2}{L^2} \cdot \frac{L_0}{(L-L_0)} \quad (12)$$

Οι όροι β και β^2 απλώς αυξάνουν τη θεμελιώδη συχνότητα και έτσι και τη συχνότητα των αρμονικών, ενώ ο τελευταίος όρος εξαρτάται από το π^2 και επομένως αυξάνει περισσότερο τη συχνότητα των υψηλότερων απ' ότι των χαμηλότερων αρμονικών.

5. “Μη γραμμικότητα της χορδής”

Στην πραγματικότητα το μήκος της χορδής L , είναι μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων, διότι οι ταλαντώσεις τεντώνουν τη χορδή. Το ενεργό μήκος L υπολογίζεται:

$$L_{ev} \rightarrow L \left[1 + \frac{1}{8} \sum_n a_n^2 + \frac{1}{8} \sum_n a_n^2 \cos(4\pi f_n + 2\phi_n) \right] \quad (13)$$

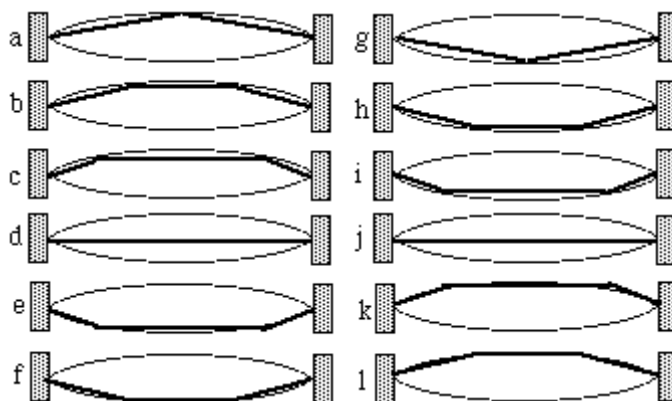
έτσι ώστε δεν αυξάνει μόνο το L , αλλά παράγονται και νέοι όροι. Όλοι οι τρόποι ταλάντωσης συζεύγνυται σε αθροίσματα και διαφορές, πράγμα που επιδρά πολύ στον ήχο του οργάνου.

6. “Χορδές, στάσιμα κύματα και αρμονικές”

Για να δημιουργήσουμε έναν ήχο, χρειαζόμαστε όπως έχουμε ήδη πει κάτι το οποίο θα δονείται. Αν θέλουμε να δημιουργήσουμε μουσικές νότες, θα πρέπει η ταλάντωση να έχει σταθερή συχνότητα ούτως ώστε να έχουμε και σταθερό τόνο. Επίσης θέλουμε η συχνότητα να είναι εύκολα ελεγχόμενη από τον μουσικό που παίζει το όργανο, έτσι ώστε στα ηλεκτρικά όργανα για να το πετύχουμε αυτό να χρησιμοποιούμε ηλεκτρονικά κυκλώματα. Στα υπόλοιπα όμως όργανα η σταθερή

ελεγχόμενη ταλάντωση προέρχεται από ένα στάσιμο κύμα. Ας αρχίσουμε όμως από τον τρόπο που λειτουργούν οι χορδές.

Οι χορδές σε μια κιθάρα είναι πολύ τεντωμένες και ταλαντώνονται τόσο γρήγορα που είναι αδύνατον να δούμε τι πραγματικά συμβαίνει κατά τη διέγερσή τους. Γι αυτό, για να μπορέσουμε να δούμε αυτή την κίνηση πειραματικά, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα κομμάτι λάστιχο ή ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι σχοινιού. Δένουμε το ένα του άκρο σε σταθερό σημείο και το άλλο άκρο το κρατάμε τεντωμένο με το χέρι μας. Με το άλλο χέρι δένουμε έναν κόμπο κατά μήκος του σχοινιού και το διεγείρουμε. Η κίνηση που θα κάνει ο κόμπος δεν είναι απλά πάνω κάτω, αλλά πιο πολύπλοκη, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε αργή ταχύτητα βλέπουμε ότι ο κόμπος αρχικά απομακρύνεται, αλλά στη συνέχεια επανέρχεται σε μας. Μπορούμε να παρατηρήσουμε επίσης ότι η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος αυξάνει καθώς τεντώνουμε περισσότερο το σχοινί, καθώς και ότι εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του σχοινιού. Έτσι λοιπόν και στις χορδές η ταχύτητα μειώνεται σε μια χοντρή και βαριά χορδή σε σχέση με μια λεπτή του ίδιου μήκους και διεγείροντάς την με την ίδια δύναμη.



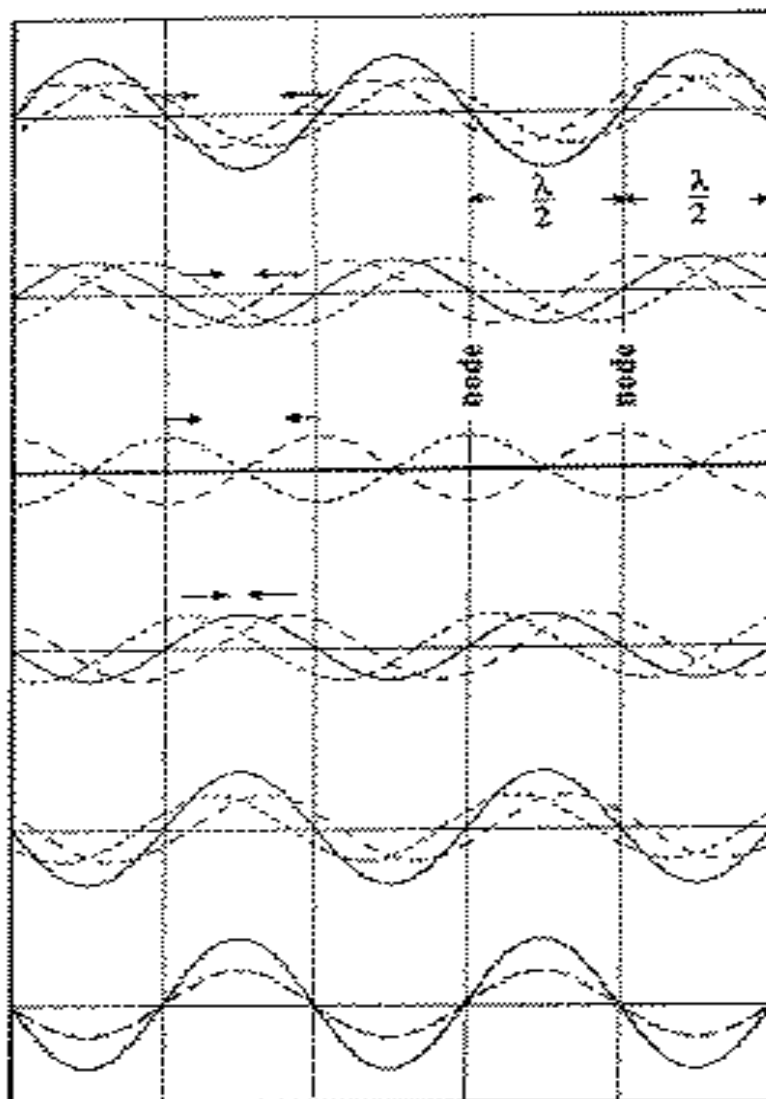
Σχήμα 17.

Εδώ φαίνεται η αντανάκλαση της διαδρομής του κόμπου κατά τη διέγερση της χορδής. Η έντονη γραμμή αναπαριστά τη χορδή και η λεπτή τη διαδρομή που κάνει ο κόμπος. Στις φάσεις (d) και (j) η χορδή είναι ευθεία μην έχοντας δυναμική ενέργεια, όμως βρίσκεται σε κατάσταση μέγιστης κινητικής ενέργειας.

Αν διεγείρουμε μια χορδή στην κιθάρα κάνουμε λοιπόν κάτι παρόμοιο, μόνο που εδώ η χορδή είναι στερεωμένη και στα δυο της άκρα . Τραβώντας λοιπόν μια χορδή και μετά αφήνοντάς την , αν την παρακολουθήσουμε προσεκτικά θα δούμε μια κίνηση και προς τα δυο άκρα της χορδής η οποία παριστάνεται από το παραπάνω σχήμα 17 με τη λεπτή γραμμή. Το πείραμα αυτό λειτουργεί καλύτερα στις μπάσες χορδές και τραβώντας τες αρκετά χιλιοστά από το σημείο ηρεμίας τους.

Γιατί όμως η αντανάκλαση αναστρέφεται; Λοιπόν, αν υποθέσουμε ότι το σημείο αντανάκλασης είναι στερεωμένο σε ακλόνητο σημείο τότε στην πραγματικότητα δεν μετακινείται, αλλά αν κοιτάξουμε την κίνηση της χορδής από το σχήμα συγκρίνοντας τις φάσεις της κίνησης σε διαδοχικές χρονικές στιγμές, παρατηρούμε ότι πλησιάζοντας στο τέλος της χορδής, το πλάτος της κίνησης μικραίνει μέχρι το σημείο που μηδενίζεται τελείως όταν φτάσει στο σταθερό σημείο. Σε εκείνο το σημείο όμως δεν σταματάει η κίνηση, αλλά ανακλάται και συνεχίζει προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Ενδιαφέρον αποτέλεσμα προκύπτει αν προσπαθήσουμε να στείλουμε ένα ημιτονοειδές κύμα κατά μήκος μιας χορδής μετακινώντας το άκρο της πάνω κάτω, οπότε παρακολουθώντας το παρακάτω σχήμα 18 μπορούμε να παρατηρήσουμε πως το ανακλώμενο κύμα πάλι αναστρέφεται, έτσι ώστε μετά την αντανάκλαση να έχουμε δυο κύματα με την ίδια συχνότητα και πλάτος τα οποία ταξιδεύουν προς αντίθετες διευθύνσεις. Έτσι λοιπόν στο σταθερό σημείο όπου συναντώνται αθροίζονται τα κύματα οπότε έχουμε μηδενικό πλάτος και δεν έχουμε κίνηση. Κοιτώντας όμως το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι υπάρχουν κι άλλα σημεία στα οποία η χορδή δεν μετακινείται. Τα σημεία αυτά απέχουν μεταξύ τους μήκος ίσο με μισό κύμα , ονομάζονται **κομβικά σημεία** της δόνησης (**nodes**) και παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε όλες τις οικογένειες οργάνων. Στη μέση του διαστήματος ανάμεσα σε δυο κομβικά σημεία υπάρχουν τα σημεία μέγιστης κίνησης (**antinodes**). Παρατηρούμε όμως ότι αυτές οι κορυφές δεν μετακινούνται κατά μήκος της χορδής , ώστε ο συνδυασμός δυο κυμάτων που ταξιδεύουν προς αντίθετες κατευθύνσεις παράγουν ένα **στάσιμο κύμα**.



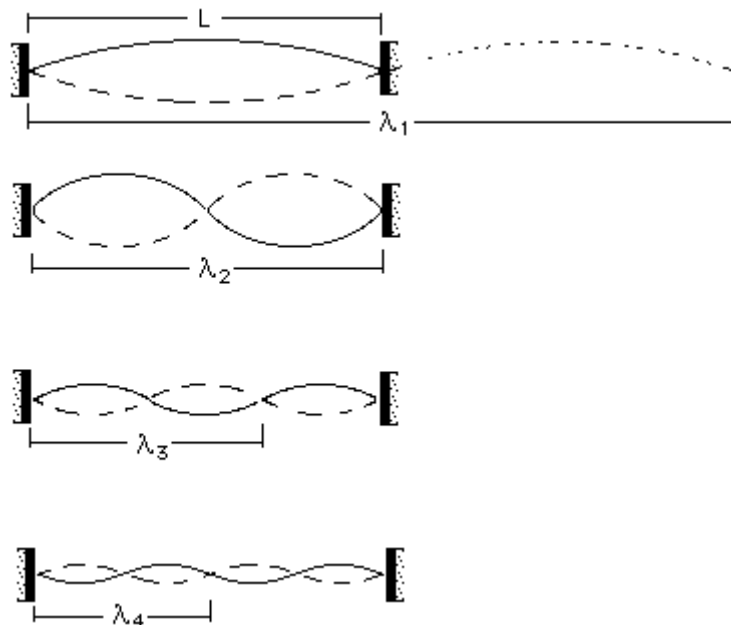
Σχήμα 18.

Ημιτονοειδές κύμα κατά μήκος της χορδής

7. “Αρμονικές και τρόποι ταλάντωσης”

Οι χορδές ενός μουσικού οργάνου είναι ακέραια στερεωμένες και στις δυο άκρες τους, έτσι ώστε κάθε δόνηση της χορδής να έχει κόμβους σε κάθε άκρο. Για παράδειγμα, μια χορδή με μήκος L μπορεί να έχει ένα στάσιμο κύμα με μήκος διπλάσιο από αυτό της χορδής δηλαδή $2L$, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Αυτό δίνει ένα κόμβο σε κάθε άκρη και ένα σημείο μέγιστης μετατόπισης στη μέση.

Αυτό είναι ένα είδος ταλάντωσης της χορδής, ενώ στο παρακάτω σχήμα 19 φαίνονται και κάποιοι ακόμα.



Σχήμα 19.

Εδώ φαίνονται οι τέσσερις πρώτοι τρόποι δόνησης μιας ιδανικής χορδής, της οποίας τα δυο άκρα είναι ακλόνητα . Για την κατανόηση της διαδρομής του κύματος, ο κατακόρυφος άξονας έχει μεγεθυνθεί.

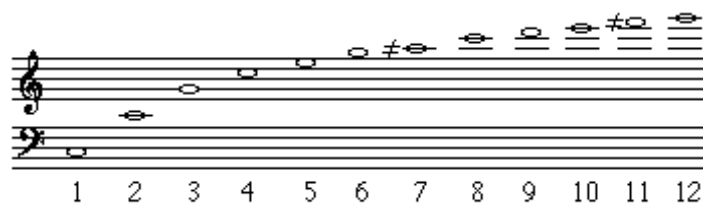
Ας δούμε όμως τις σχέσεις που συνδέουν τις συχνότητες των παραπάνω ταλαντώσεων. Για ένα κύμα η συχνότητα είναι η αναλογία της ταχύτητάς του προς το μήκος του. Έτσι αν θεωρήσουμε ότι το κύμα έχει συχνότητα f , ταχύτητα u και μήκος L , ισχύει:

$$f = \frac{u}{L}$$

Έτσι λοιπόν μπορούμε να συμπεράνουμε ότι συγκριτικά με το μήκος της χορδής, τα μήκη των κυμάτων έχουν αντίστοιχα μήκη $2L$, L , $2L/3$, $L/2$. Μπορούμε να πούμε λοιπόν ότι ισχύει η σχέση $2L/n$ όπου n ο αριθμός της αρμονικής.

Η θεμελιώδης συχνότητα του πρώτου κύματος είναι $f_1=u/2L$, αντίστοιχα της δεύτερης αρμονικής είναι $f_2=2u/2L=2f_1$. Κατά τον ίδιο τρόπο η συχνότητα της τρίτης αρμονικής είναι $f_3=3u/2L=3f_1$ και της τέταρτης $f_4=4u/2L=4f_1$. Για να γενικεύσουμε λοιπόν αυτή την αναλογία, η νιοστή συχνότητα θα είναι $f_n=nu/2L=nf_1$.

Όλα τα κύματα σε μια χορδή ταξιδεύουν με την ίδια ταχύτητα, ώστε τα κύματα με διαφορετικά μήκη να έχουν και διαφορετικές συχνότητες. Ο τρόπος δόνησης με τη χαμηλότερη συχνότητα είναι ο θεμελιώδης. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η ένατη αρμονική είναι εννιά φορές η θεμελιώδης. Όλοι λοιπόν οι τρόποι ταλάντωσης καθώς και οι ήχοι που παράγουν ονομάζονται αρμονικές της χορδής και οι συχνότητές τους $f, 2f, 3f, 4f$ αρμονική σειρά. Οι αρμονικές αυτές είναι κάτι γνωστό για τους μουσικούς, οπότε αν για παράδειγμα η θεμελιώδης συχνότητα είναι η νότα C3 με συχνότητα περίπου 131Hz τότε οι αρμονικές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 20.



Σχήμα 20.

Οι αρμονικές της C3 με συχνότητα 131Hz

8. “Γέφυρα και ηχητική πλάκα της κιθάρας”

Οι χορδές της κιθάρας στηρίζονται από τη μια μεριά σ’ ένα στήριγμα μη ακλόνητο που αποτελείται από μια γέφυρα προσαρμοσμένη πάνω στην επιφάνεια του καπακιού.

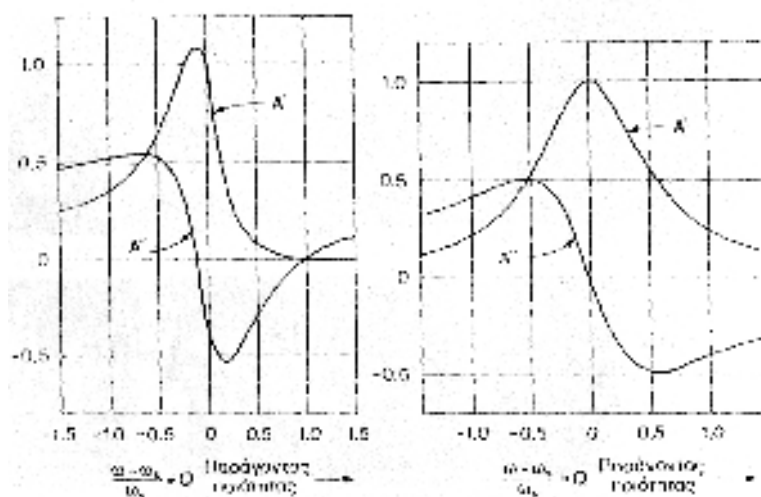
Ορίζουμε τη μιγαδική μηχανική αντίσταση της γέφυρας ως το λόγο της εφαρμοζόμενης σ’ αυτήν δύναμης, προς την ταχύτητα με την οποία κινείται. Η μιγαδική μηχανική αντίσταση είναι γενικά σύνθετη ποσότητα, έτσι ώστε η κίνηση της γέφυρας δεν βρίσκεται σε πλήρη φάση με τη δύναμη και το πραγματικό με το φανταστικό μέρος δεν έχουν την ίδια σπουδαιότητα. Ο C.E Gough με τη χρήση μιας νέας μεθόδου φωτοσύλληψης δίνει τα διαγράμματα του παρακάτω σχήματος τα

οποία αναφέρονται στη μιγαδική αγωγιμότητα της γέφυρας, ποσότητας ίση με το αντίστροφο της μιγαδικής αντίστασης.

Η αγωγιμότητα A είναι πάντα θετική και παριστάνει την ενέργεια που μεταβαίνει από τη χορδή στο καπάκι μέσω της γέφυρας. Επηρεάζεται από αναπόφευκτες απώλειες στη γέφυρα και στα υλικά του καπακιού και απώλειες λόγω του εκπεμπόμενου ήχου. Το καπάκι απ' τη μια μεριά θα πρέπει να είναι εύκαμπτο ώστε να εκπέμπει ήχο, ενώ από την άλλη μηχανικά σκληρό, έτσι ώστε η αγωγιμότητα να είναι περίπου σταθερή στην περιοχή των συχνοτήτων που παράγει η χορδή.

Αν η αρχική απομάκρυνση της χορδής είναι a , η αρχική ενέργεια δίνεται από τον τύπο:

$$E_0 = a^2 T \left[\frac{L}{2l(L-l)} \right]$$



Σχήμα 21.

Γραφική παράσταση του πραγματικού (A') και του φανταστικού (A'') μέρους της μιγαδικής μηχανικής αγωγιμότητας ($A=A'+jA''$). (α) Χορδή πακτωμένη σε δυο στέρεα στηρίγματα με ελαφρά απόσβεση. (β) Χορδή πακτωμένη σε ένα στέρεο και ένα μαλακό στήριγμα

και η ταχύτητα απώλειας της ενέργειας:

$$\frac{dE}{dt} = -Ar^2 \rho \cdot f_1^2 E$$

έτσι ώστε η ενέργεια και κατά συνέπεια και η εκπεμπόμενη ένταση μειώνονται, με χρόνο απόσβεσης:

$$\tau_1 = \frac{const}{Gr^2 \rho \cdot f_1^2}$$

όπου με G: συμβολίζουμε την αγωγιμότητα

ενώ const : εξαρτάται από το μήκος της χορδής και τη συχνότητα.

9. “Απόσβεση λόγω του αέρα”

Ο λόγος που η χορδή δεν εκπέμπει ήχο είναι επειδή αποτελεί μια διπολική πηγή που παράγει μια συμπίεση προς τα εμπρός και μια αρραίωση προς τα πίσω καθώς κινείται και επίσης επειδή η ακτίνα της είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με το μήκος του κύματος που παράγεται, τα κύματα αυτά αλληλοαναιρούνται. Επίσης η ιξώδης ροή του αέρα γύρω από την κινούμενη χορδή είναι ο κύριος λόγος της απόσβεσης των ταλαντώσεών της.

10. “Το καπάκι της κιθάρας και οι τρόποι ταλάντωσής του”

Η σπουδαιότητα του καπακιού της κιθάρας και η επίδρασή του στον ήχο του οργάνου είναι καθοριστική. Η παραγωγή του ήχου από το ταλαντούμενο καπάκι μπορεί να αναλυθεί σε τρία βήματα κατά τον E. Jansson:

- 1) τη διέγερση του καπακιού
- 2) την απόκριση του καπακιού στη διέγερση
- 3) την εκπομπή ήχου από το καπάκι

Η διέγερση του καπακιού καθορίζει τη συχνότητα και το πλάτος των ταλαντώσεων. Η διέγερση αυτή γίνεται ανεξάρτητα από τη συχνότητα και τις ταλαντώσεις του καπακιού και χωρίς να επηρεάζει τις ιδιότητές του. Η θέση του σημείου διέγερσης επιδρά μόνο στο πλάτος των ταλαντώσεων.

Η απόκριση του καπακιού στη διέγερση δίνει τον τρόπο ταλάντωσης μιας συχνότητας συντονισμού. Οι κύριες μετρήσεις είναι η συχνότητα και ο παράγοντας Q , καθώς επίσης σημαντικά στοιχεία θεωρούνται ο καταμερισμός του πλάτους ταλάντωσης και της διαφοράς φάσης στην επιφάνεια του καπακιού. Ο εκπεμπόμενος ήχος καθορίζεται εξ' ολοκλήρου από το πλάτος και τη διαφορά φάσης των ταλαντώσεων και διαφέρει ανάλογα με τη συχνότητα και τη θέση του ακροατή στο χώρο.

Γνωρίζοντας την ύπαρξη και τη σπουδαιότητα των συχνοτήτων του συντονισμού του καπακιού, η έρευνα στράφηκε προς την κατεύθυνση της εξακρίβωσης των τρόπων συντονισμού του καπακιού. Ο E.V Jansson παρουσιάζει ολογραφήματα των τεσσάρων πρώτων συντονισμών του καπακιού της κιθάρας τα οποία δίνουν πληροφορίες για την κατανομή του πλάτους ταλάντωσης πάνω στην επιφάνειά του. Αυτά φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 22 όπου κάθε σκούρα περιοχή είναι καμπύλη ίσου πλάτους, ενώ οι πολύ λευκές επιφάνειες είναι κομβικές γραμμές.



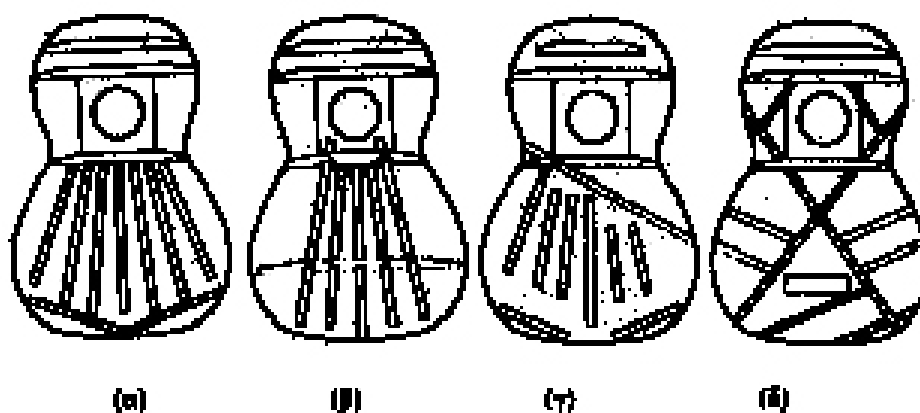
Σχήμα 22.

Ολογραφήματα των τεσσάρων πρώτων συντονισμών του καπακιού της κιθάρας

Παρατηρούμε ότι οι συντονισμοί βρίσκονται κυρίως στο ελεύθερο τμήμα του καπακιού. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε πως ο πρώτος συντονισμός αποτελείται από έναν δονούμενο “λόφο”, ενώ ο δεύτερος από δύο και μια γραμμή ανάμεσά τους, από σημεία τα οποία μένουν ακίνητα, δηλαδή μια κομβική γραμμή.

Ο δεύτερος αυτός συντονισμός θεωρείται από τον καθηγητή Meyer πως παρουσιάζει μικρή σπουδαιότητα και δε τον αναφέρει ως δεύτερο συντονισμό. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται πάλι κομβικές γραμμές και οι δονούμενοι “λόφοι” αυξάνουν αριθμό. Σημειώνεται πως γενικά οι ταλαντώσεις συμβαίνουν στο ελεύθερο τμήμα του καπακιού και πως είναι μικρές στην περιοχή της γέφυρας εκτός από τον πρώτο συντονισμό.

Πρέπει να τονιστεί πως όταν το καπάκι προσαρμόζεται πιο στέρεα στις πλευρές του οργάνου, οι συχνότητες συντονισμού του μετατοπίζονται ελαφρά προς τα πάνω. Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στις ταλαντώσεις είναι το πάχος του ξύλου από το οποίο έχει κατασκευαστεί το καπάκι. Επομένως, το πάχος και κατά συνέπεια η μάζα συνεισφέρουν στην ακαμψία του, η οποία όμως εξαρτάται κυρίως από τις ακτίνες που τοποθετούνται στην εσωτερική πλευρά του καπακιού και τη γέφυρα. Οι ακτίνες ποικίλουν ως προς τον αριθμό αλλά και τον τρόπο διάταξής τους, όμως ποτέ δεν τοποθετούνται πάνω από επτά γιατί ο μεγάλος αριθμός τους επηρεάζει αρνητικά την εκπομπή του ήχου από την ηχητική πλάκα. Διάφοροι τρόποι διάταξης των ακτινών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 23.

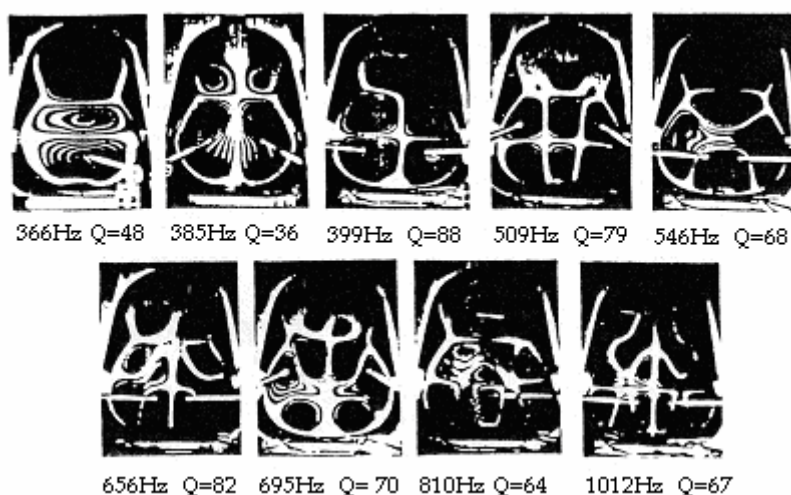


Σχήμα 23.

Ακτίνες στερεωμένες στο καπάκι της κιθάρας

Εκτός από το καπάκι, στον ήχο της κιθάρας επιδρά και η πλάτη της. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται ολογραφήματα των ταλαντώσεων της πλάτης.

Επειδή όμως το πίσω μέρος της κιθάρας ακουμπάει στο σώμα του μουσικού, αναγκαστικά αυτό επιδρά αρνητικά στην εκπομπή του ήχου, τουλάχιστον για ορισμένες συχνότητες. Γι αυτό το λόγο η πλάτη και τα πλαϊνά δεν είναι τόσο σημαντικά τμήματα για την παραγωγή ήχου.



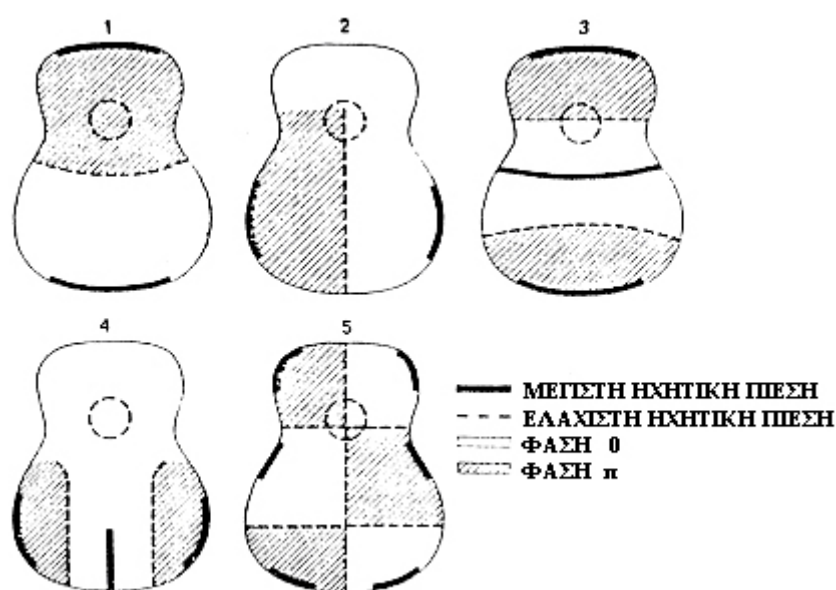
Σχήμα 24.

Ολογραφήματα των ταλαντώσεων της πλάτης της κιθάρας

11. “Η κοιλότητα της κιθάρας”

Στον αέρινο όγκο της κιθάρας συναντιούνται συντονισμοί όπως φαίνεται και στο σχήμα 25 που ακολουθεί. Αυτοί οι συντονισμοί δεν μεταδίδονται μέσω του ανοίγματος, δηλαδή δεν εκπέμπουν ήχο όσο η σπουδαιότητά τους βρίσκεται στη σύζευξή τους με τους υψηλότερους συντονισμούς του καπακιού. Για παράδειγμα ο πρώτος συντονισμός του αέρα στα 370Hz συμπράττει με τον τρίτο συντονισμό του καπακιού. Η κοιλότητα της κιθάρας λειτουργεί σαν ένα αντηχείο Helmholtz με συχνότητα συντονισμού γύρω στα 100 Hz. Αυτός είναι πολύ σημαντικός συντονισμός, επειδή κατ’ αυτόν εκπέμπεται ήχος από την κοιλότητα προς τα έξω,

ώστε με τη βοήθεια των όσων έως τώρα έχουν αναφερθεί για το σώμα της κιθάρας, μπορούν να δοθούν με συντομία οι ακουστικές ιδιότητές όταν δίνονται οι συντονισμοί της κιθάρας ή όταν δίνεται μια πλήρης περιγραφή των ακουστικών ιδιοτήτων της. Η περιγραφή απλοποιείται από το γεγονός ότι οι ισχυροί συντονισμοί κυριαρχούν στον καθορισμό των ιδιοτήτων αυτών. Έχει επίσης αποδειχτεί πως οι κύριες ταλαντώσεις μιας κιθάρας βρίσκονται στο καπάκι της και μάλιστα στο τμήμα κάτω από το άνοιγμα (ηχητική οπή). Το πάνω μέρος του καπακιού, η πλάτη και οι πλευρές, δίνουν πιο ασθενείς συντονισμούς με μικρότερη σπουδαιότητα.



Σχήμα 25.

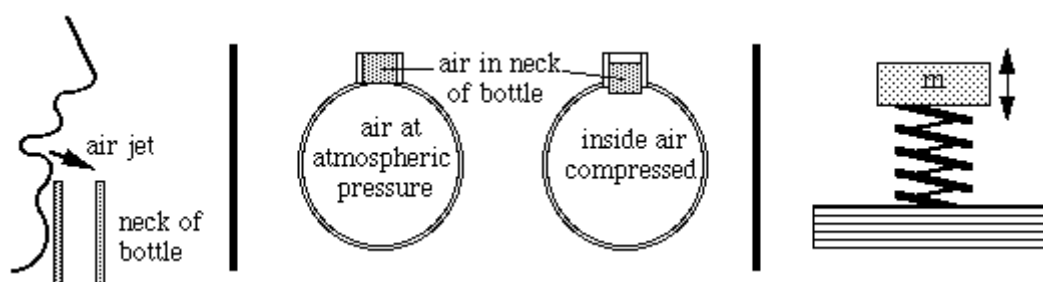
Οι τρόποι ταλάντωσης των πέντε χαμηλότερων συντονισμών του αέρα μέσα στην κοιλότητα της κιθάρας

Οι ταλαντώσεις του κάτω μέρους του καπακιού συνήθως έχουν πέντε συντονισμούς, περίπου στα 200, 300, 400, 500 και 600Hz. Αυτοί οι συντονισμοί αποτελούν ένα σύνολο από ταλαντώσεις του καπακιού. Επίσης υπάρχει και ο συντονισμός του αέρινου όγκου γύρω στα 100Hz, κατά τον οποίο εκπέμπεται ο αέρας μέσω του καπακιού.

Αν θεωρήσουμε ένα δοχείο που περιέχει ένα αέριο (ακόμη και αέρα) το οποίο έχει ένα ανοιχτό στόμιο, παρατηρούμε ότι ο όγκος του αέρα γύρω από το στόμιο

δονείται λόγω της ελαστικότητας του αέρα μέσα στο δοχείο αυτό. Σε αυτή την ιδιότητα του αέρα βασίζεται και η λειτουργία του αντηχείου Helmholtz. Ένα κοινό παράδειγμα είναι αν φυσήξουμε στο λαιμό ενός άδειου μπουκαλιού, οπότε ο αέρας μέσα σε αυτό δονείται με αποτέλεσμα να παράγει έναν “βαθύ” αλλά δυνατό ήχο. Μπορούμε λοιπόν να παρομοιάσουμε τον αέρα μέσα στο σώμα της κιθάρας με τον αέρα που βρίσκεται μέσα στο μπουκάλι ώστε να κατανοήσουμε την παραγωγή του ήχου, μόνο που η πηγή της ενέργειας που θα προκαλέσει τη δόνηση των μορίων του αέρα είναι η χορδή.

Το αντηχείο Helmholtz έχει εφαρμογή στα ηχεία, όπου ενισχύεται η αντίδραση της συχνότητας εκτίναξης της μεμβράνης κατά την παραγωγή του ήχου.



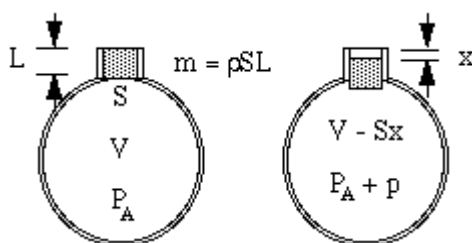
Σχήμα 26.

Σχηματική αναπαράσταση πειράματος για την επεξήγηση της λειτουργίας του αντηχείου Helmholtz

Η δόνηση εδώ είναι αποτέλεσμα της ελαστικότητας του αέρα, ο οποίος κατά την συμπίεσή του αυξάνει την πίεση που ασκεί στα τοιχώματα του δοχείου, με αποτέλεσμα να έχει την τάση να εκτονωθεί καθώς τείνει να επανέλθει στον αρχικό του όγκο. Ας υποθέσουμε μια μάζα αέρα, η οποία είναι σκιαγραφημένη στο μεσαίο τμήμα του σχήματος 26, που πιέζεται καθώς φυσάμε στο στόμιο του μπουκαλιού με αποτέλεσμα να μετακινείται προς τα κάτω συμπιέζοντας την υπόλοιπη μάζα αέρα που υπάρχει στο εσωτερικό του μπουκαλιού. Το αέριο λοιπόν τείνει να εκτονωθεί με αποτέλεσμα να ωθεί τη μάζα αυτή προς τα πάνω, αλλά όταν φτάσει την αρχική της θέση να συνεχίζει την ανοδική της πορεία έξω από το μπουκάλι για ένα πολύ μικρό διάστημα. Αυτό όμως έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία υποπίεσης στο εσωτερικό του δοχείου ώστε η μάζα αυτή του αέρα να “αναρροφάται” προς το εσωτερικό του

δοχείου με αποτέλεσμα να έχουμε μια ταλάντωση παρόμοια με αυτή που κάνει μια μάζα στερεωμένη σε ένα ελατήριο. Ο αέρας που προέρχεται από το φύσημα, μπορεί να διεγείρει το σύστημα ώστε η ταλάντωση να μην είναι φθίνουσα.

Για να μιλήσουμε όμως ποσοτικά, υποθέτουμε πρώτα απ' όλα ότι το μήκος κύματος του παραγόμενου ήχου είναι πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις του αντηχείου. Για ένα τυπικό μπουκάλι, ο ήχος που παράγεται έχει ένα μήκος κύματος μερικών μέτρων, οπότε αυτή η διαδικασία προσέγγισης είναι ικανοποιητική. Θεωρούμε λοιπόν ότι οι μεταβολές της πίεσης μέσα στο δοχείο είναι αμελητέες, οπότε η ταλάντωση της πίεσης θα έχει την ίδια φάση παντού στο εσωτερικό του δοχείου. Θέτουμε L το ενεργό μήκος του αέρα μέσα στο λαιμό του μπουκαλιού και S την εγκάρσια διατομή του, οπότε η μάζα αυτή του αέρα θα είναι SL φορές η πυκνότητα ρ του αέρα, δηλαδή $m = \rho SL$. Αν αυτή η μάζα αέρα βυθιστεί κατά ένα διάστημα x μέσα στο μπουκάλι, συμπιέζει τον αέρα μέσα σε αυτό, ώστε ενώ πριν είχε όγκο V , τώρα έχει όγκο $V - Sx$. Κατά συνέπεια, η πίεση του αέρα μέσα στο δοχείο αυξάνεται από την ατμοσφαιρική πίεση P_A σε $P_A + p$.



Σχήμα 27.

Αλληλεπίδραση πίεσης – όγκου στο συντονιστή Helmholtz.

Θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι η αύξηση της πίεσης θα ήταν αναλογική της αύξησης του όγκου, πράγμα που θα συνέβαινε αν η συμπίεση γινόταν τόσο αργά ώστε η θερμοκρασία να παραμείνει σταθερή. Όμως σε δονήσεις που προκαλούν την αύξηση της έντασης του ήχου, οι αλλαγές είναι γρήγορες με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη συμπίεση, δίνοντας έτσι μεγαλύτερη τιμή στην πίεση. Πρακτικά η μεταβολή της πίεσης συναρτηθεί του όγκου είναι αδιαβατικής μορφής,

οπότε η θερμοκρασία δεν έχει χρόνο να μεταβληθεί. Σαν αποτέλεσμα, η μεταβολή της πίεσης p που προκλήθηκε από τη μεταβολή του όγκου ΔV είναι:

$$\frac{P}{P_A} = -\gamma \frac{\Delta V}{V} = -\gamma \frac{Sx}{V}$$

Τώρα η μάζα m έχει μετακινηθεί κατά την αλλαγή στην πίεση ανάμεσα στο πάνω και το κάτω μέρος του λαιμού του μπουκαλιού, ασκεί μια δύναμη pS , οπότε γράφουμε το νόμο του Newton για την επιτάχυνση a :

$$F = ma$$

$$\text{ή } \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F}{m}$$

αντικαθιστώντας τα F, m έχουμε:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{pS}{pSL} = -\frac{\gamma SP_A}{pVL} x$$

Έτσι η αποκατεστημένη ενέργεια είναι ανάλογη του εκτοπίσματος.

Αυτή είναι και η προϋπόθεση για μια απλή αρμονική κίνηση με συχνότητα που δίνεται από τον τύπο:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma S P_A}{\rho V L}}$$

Η ταχύτητα του ήχου c στον αέρα εξαρτάται από την πυκνότητα την πίεση και τη θερμοκρασία, οπότε μπορούμε να γράψουμε:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V L}}$$

Αν υποθέσουμε ότι το δοχείο έχει όγκο $V=1\text{lt}$, με διατομή λαιμού $S=3\text{cm}^2$ και μήκος $L=5\text{cm}$, η συχνότητα είναι $f=130\text{Hz}$ που αντιστοιχεί περίπου στη νότα C (που ανήκει στην κατηγορία των υψηλών μπάσων συχνοτήτων, που προκύπτουν από τις χαμηλές νότες όλων των οργάνων). Οπότε το μήκος του κύματος θα είναι 2.6m, δηλαδή πολύ μεγαλύτερο από το μήκος του μπουκαλιού.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, το σώμα της κιθάρας λειτουργεί σχεδόν σαν αντηχείο Helmholtz. Στην περίπτωση όμως αυτή τα πράγματα είναι λίγο πιο πολύπλοκα γιατί το σώμα της κιθάρας μπορεί να διογκωθεί λίγο καθώς αυξάνεται η πίεση του αέρα μέσα σ' αυτό. Επίσης ο αέρας μέσα από την ηχητική οπή της κιθάρας έχει μια γεωμετρία λιγότερο εύκολο να υπολογιστεί, καθώς και η ενεργή μάζα του αέρα στην οπή περιορίζεται στο πάχος της ηχητικής πλάκας που είναι μόνο μερικά χιλιοστά. Το ηχητικό όμως αποτέλεσμα είναι ανάλογο και με την ακτίνα της ηχητικής οπής, οπότε η μάζα του αέρα είναι αρκετή. Έτσι λοιπόν υπολογίζεται αναλογικά ότι το μήκος επίδρασης της αέριας μάζας θα είναι περίπου 1.7 φορές η ακτίνα της οπής.

Μια εμπειρική απόδειξη του φαινομένου αυτού, είναι αν εμποδίσουμε τις χορδές της κιθάρας να κάνουν ταλάντωση, τοποθετώντας για παράδειγμα ένα κομμάτι ύφασμα μεταξύ των χορδών και της ταστιέρας και στη συνέχεια κρατάμε την παλάμη του ενός χεριού μας πάνω από την ηχητική οπή και κοντά σε αυτήν, ενώ με το δάχτυλο του άλλου χεριού χτυπάμε πάνω στην ηχητική πλάκα, κοντά στην οπή και

κοντά στην πρώτη χορδή. Αισθανόμαστε έναν παλμό αέρα πάνω στην παλάμη μας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με το χτύπημα του δαχτύλου μας στην πλάκα, την πιέζουμε, οπότε πιέζεται και μια ποσότητα αέρα έξω από το σώμα της κιθάρας. Μετακινώντας το χέρι μας σταδιακά μακριά από την οπή καθώς συνεχίζουμε να χτυπάμε με το άλλο χέρι μας, κάποια στιγμή θα σταματήσουμε να αισθανόμαστε την κίνηση του αέρα. Αυτό θα μας δώσει τη δυνατότητα εκτίμησης του μήκους επίδρασης του κύματος του αέρα.

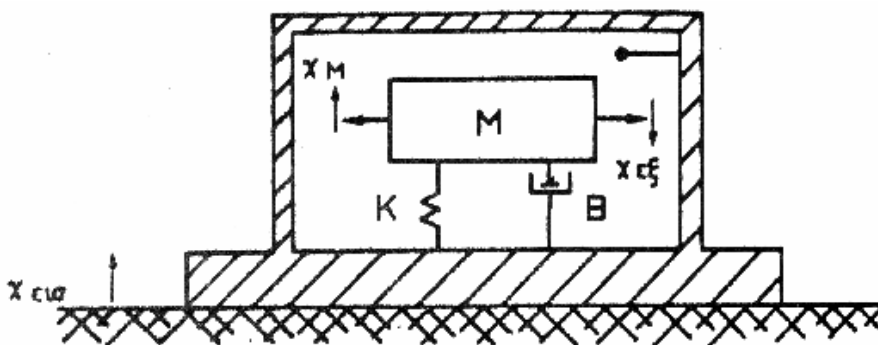
Ένας ακόμα τρόπος να διαπιστώσουμε τη ροή του αέρα δια μέσου της οπής της κιθάρας είναι να τραγουδήσουμε μια νότα μεταξύ F#2 και A2 ανάλογα με την κιθάρα καθώς κρατάμε το αυτί μας κοντά στην ηχητική οπή, οπότε ακούμε τον αέρα να συντονίζεται. Επίσης αν τοποθετήσουμε ένα χαρτόνι μπροστά από την ηχητική οπή της κιθάρας και το μετακινούμε προς πίσω καθώς χτυπήσουμε την ανοιχτή A χορδή. Παρατηρούμε ότι σταματάει το συντονισμό ή τον αλλάζει σε χαμηλότερη συχνότητα, ενώ παρατηρούμε την απώλεια των μπάσων συχνοτήτων αν κλείσουμε τελείως την οπή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Α. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

1. “Μέτρηση επιτάχυνσης”

Η μέτρηση επιτάχυνσης απαιτείται συνήθως για τη διαπίστωση της εύρυθμης λειτουργίας των μηχανών. Η μέτρηση δονήσεων με πλάτος πάνω από κάποιο όριο μπορεί να σημαίνει ότι κάποια μηχανικά στοιχεία έχουν υποστεί βλάβη ή ότι το σύστημα χρειάζεται ευθυγράμμιση. Τα αισθητήρια που μετρούν επιτάχυνση ονομάζονται επιταχυνσιόμετρα. Το σχηματικό μοντέλο ενός επιταχυνσιόμετρου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 28.



Σχήμα 28.

Σχηματικό μοντέλο επιταχυνσιόμετρου

Ο μετατροπέας αποτελείται από μια γνωστή μάζα M αναρτημένη σε ένα ελατήριο με σταθερά K . Το σύστημα παρουσιάζει απόσβεση B και περικλείεται σε περίβλημα που συνδέεται σταθερά με την επιφάνεια, την επιτάχυνση της οποίας επιθυμούμε να μετρήσουμε. Η μετατόπιση της επιφάνειας συμβολίζεται στο σχήμα με $\chi_{\epsilon\iota\sigma}$, ενώ με $\chi_{\epsilon\xi}$ και χ_M συμβολίζουμε τη μετατόπιση της μάζας ως προς το περίβλημα και το σύστημα αναφοράς αντίστοιχα. Χωρίς να δίνουμε λεπτομερώς τη διαδικασία, η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος έχει τη μορφή:

$$\frac{\chi_{\epsilon\xi}}{\chi_{\epsilon\iota\sigma}} = \frac{s^2}{s^2 M + sB + K}$$

εάν θέσουμε

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

και

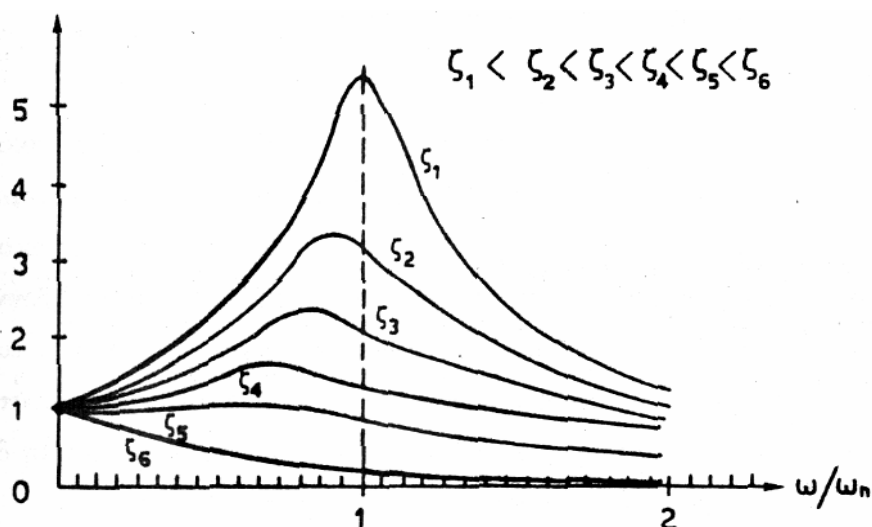
$$\zeta = \frac{B}{2\sqrt{KM}}$$

η συνάρτηση μεταφοράς παίρνει τη μορφή

$$\frac{\chi_{\epsilon\xi}}{\chi_{\epsilon\iota\sigma}} = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Η εξίσωση αυτή είναι η γνωστή συνάρτηση μεταφοράς ενός ταλαντωτή με απόσβεση. Το σύστημα εκτελεί ταλάντωση με κυκλική συχνότητα ω_n και συντελεστή απόσβεσης ζ . Η καμπύλη του κέρδους του συστήματος ως συνάρτηση

της ανηγμένης κυκλικής συχνότητας και με παράμετρο το συντελεστή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 29.

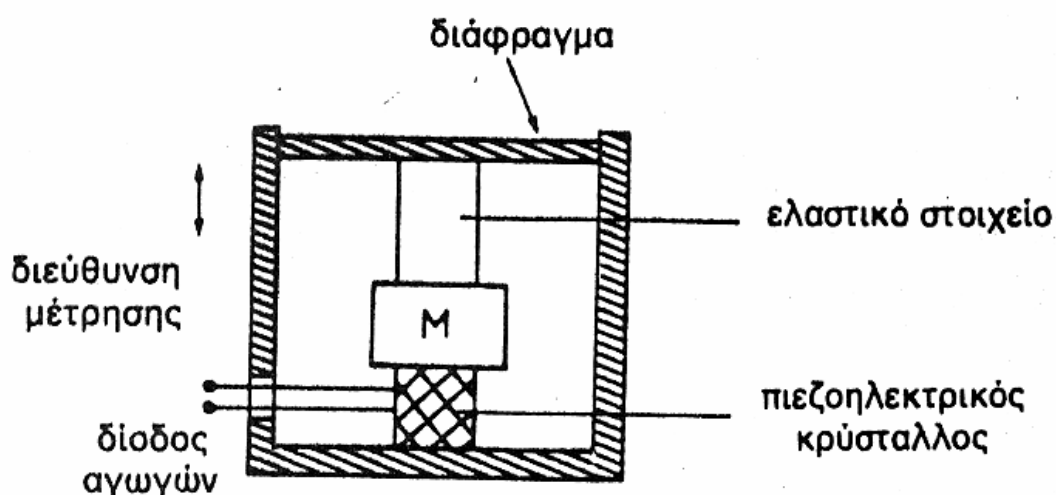


Σχήμα 29.

Η καμπύλη κέρδους του συστήματος

Από το κέρδος της συνάρτησης μεταφοράς προκύπτει ως συμπέρασμα ότι ο μετατροπέας θα είναι χρήσιμος για συχνότητες αρκετά μικρότερες της συχνότητας συντονισμού του συστήματος ω_n . Σε αυτή την περίπτωση το κέρδος του συστήματος προσεγγίζει τη μονάδα, δηλαδή η είσοδος στο σύστημα δεν παραμορφώνεται και κατά συνέπεια η έξοδος του συστήματος εκφράζει με ακρίβεια την είσοδο. Μία ακόμη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι για τιμές του συντελεστή απόσβεσης από ζ_4 έως ζ_5 , δηλαδή από $\zeta = 0,6-0,7$, το κέρδος είναι περίπου σταθερό με τη συχνότητα και το επιταχυνσιόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για συχνότητες πολύ κοντά στη συχνότητα συντονισμού χωρίς σημαντικό σφάλμα.

Η πιο συνηθισμένη κατηγορία επιταχυνσιομέτρων είναι τα πιεζοηλεκτρικά και ένα τέτοιο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 30. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή συμβολίζει τον κρύσταλλο.



Σχήμα 30.

Επιταχυνσιόμετρο που η λειτουργία του βασίζεται στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο

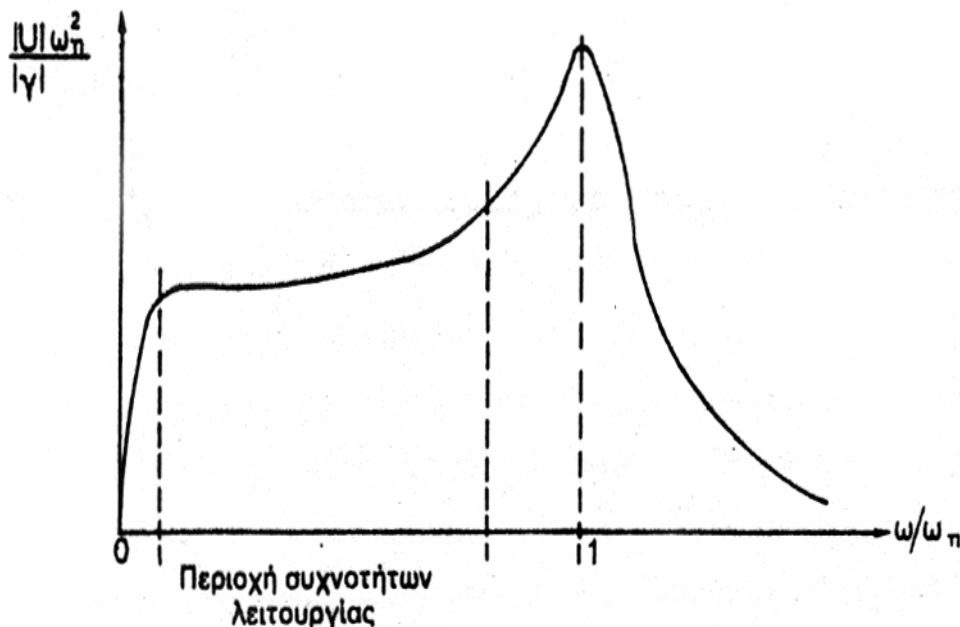
Η γνωστή μάζα M πιέζει τον κρύσταλλο και βάσει του πιεζοκρυσταλλικού φαινομένου αναπτύσσεται στα άκρα του κρυστάλλου μια τάση ανάλογη της δύναμης σύνθλιψης.

Αν ο κρύσταλλος φορτιστεί μέσω του διαφράγματος έτσι ώστε ακόμα και χωρίς είσοδο να εξασκείται πάνω του δύναμη, μπορούν να μετρηθούν τόσο θετικές όσο και αρνητικές επιταχύνσεις. Η συνάρτηση μεταφοράς του επιταχυνσιομέτρου συνδέει την έξοδο, δηλαδή την ηλεκτρική τάση στα άκρα του κρυστάλλου με την είσοδο, δηλαδή την έκταση ή συρρίκνωση του κρυστάλλου κατά τη διεύθυνση που ασκείται η δύναμη. Η συνάρτηση μεταφοράς έχει τη μορφή:

$$\frac{V_{(s)}}{X_{(s)}} = S \frac{\tau s}{1 + \tau s}$$

όπου με S συμβολίζεται η ευαισθησία του κρυστάλλου και τs είναι η χρονική σταθερά. Το κέρδος του συστήματος συναρτήσει της ανηγμένης κυκλικής συχνότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 31, απ' όπου προκύπτει το συμπέρασμα

ότι για καλή ακρίβεια πρέπει να μετράμε επιταχύνσεις με συχνότητα αρκετά μικρότερη της συχνότητας συντονισμού.



Σχήμα 31.

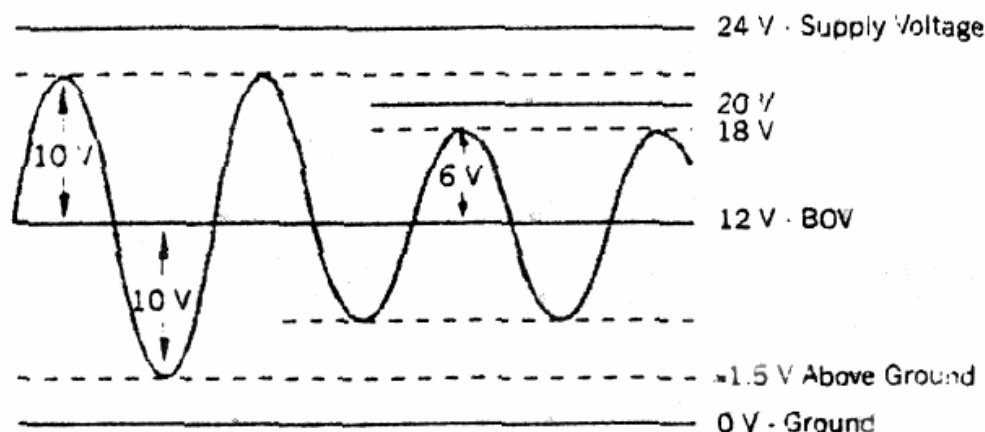
Τυπική απόκριση συχνότητας ενός επιταχυνσιόμετρου

Από το ίδιο σχήμα φαίνεται ότι η ευαισθησία του συστήματος σχεδόν μηδενίζεται στις πολύ χαμηλές συχνότητες. Στην πράξη χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι επιταχυνσιόμετρων ανάλογα με το φάσμα των συχνοτήτων που επιθυμούμε να μετρήσουμε.

2. “Πρακτική θεώρηση”

Στο εμπόριο διατίθεται μια μεγάλη ποικιλία επιταχυνσιόμετρων με κύριο στόχο τις βιομηχανικές εφαρμογές. Η σε βάθος κατανόηση των χαρακτηριστικών και η δυνατότητα επίλυσης των προβλημάτων που παρουσιάζονται στην πράξη είναι απαραίτητα για μια επιτυχημένη εφαρμογή. Η έξοδος του επιταχυνσιόμετρου είναι ένα μεταβαλλόμενο σήμα ανάλογο προς την επιτάχυνση που δέχεται ο κρύσταλλος. Για τη σωστή λειτουργία του κρυστάλλου, εφαρμόζουμε σ’ αυτόν μια DC τάση που

ονομάζεται τάση πόλωσης. Η τάση αυτή οδηγεί σε μόνιμη παραμόρφωση του κρυστάλλου ή καλύτερα δημιουργεί μια προένταση και επιτρέπει τη μέτρηση επιταχύνσεων και προς την αρνητική κατεύθυνση. Στην έξοδο του μετατροπέα υπάρχει ένας πυκνωτής που μπλοκάρει τη συνεχή τάση έτσι ώστε το σήμα εξόδου να είναι μόνο η εναλλασσόμενη συνιστώσα.

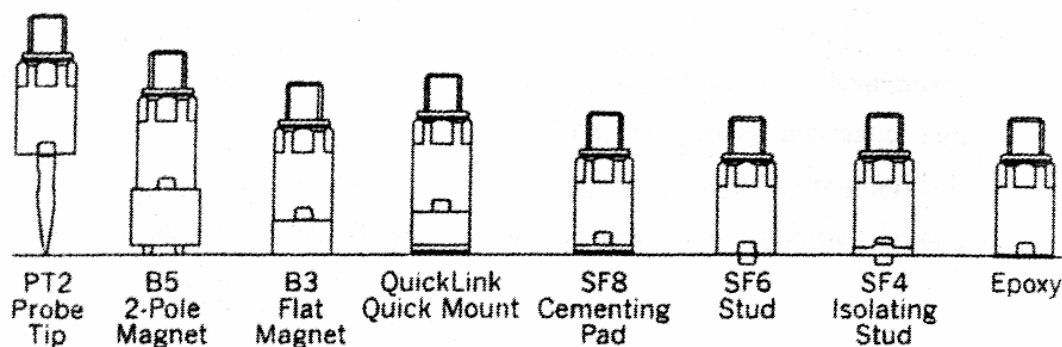


Σχήμα 32.

Σήμα εξόδου επιταχυνσιόμετρου με παράλληλη εφαρμογή τάσης πόλωσης

Για την επιλογή ενός επιταχυνσιόμετρου, τα κυριότερα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι τα ακόλουθα:

- **Ευαισθησία** : η οποία εκφράζεται σε $\mu\text{C}/\text{gr}$ ή mV/gr και εκφράζει την έξοδο του μετατροπέα για δύναμη ενός γραμμαρίου.
- **Απόκριση συχνότητας** : η οποία εκφράζει το φάσμα συχνοτήτων στο οποίο ο μετατροπέας είναι ευαίσθητος, για παράδειγμα 50Hz – 10kHz. Τα ακραία σημεία του φάσματος είναι τα σημεία -3dB και βέβαια το άνω άκρο πρέπει να βρίσκεται κάτω από τη συχνότητα συντονισμού του μετατροπέα.
- **Εύρος θερμοκρασίας** : συνήθως από -50°C έως 100°C .
- **Βάρος** : Είναι αυτονόητο ότι ένας βαρύς μετατροπέας είναι κατάλληλος για τη μέτρηση χαμηλόσυχνων ταλαντώσεων, ενώ αν πρέπει να μετρηθούν ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας, ο μετατροπέας πρέπει να έχει όσο το δυνατόν χαμηλή μάζα. Το βάρος εκφράζεται σε γραμμάρια.



Σχήμα 33.

Διάφορα είδη επιταχυνσιομέτρων

Λίγα λόγια είναι απαραίτητα για την τοποθέτηση του επιταχυνσιομέτρου στην επιφάνεια που πρόκειται να μελετήσουμε. Αν η επιφάνεια της οποίας πρόκειται να καταγράψουμε τις δονήσεις είναι μεταλλική, καθαρή και όχι βαμμένη, φτιαγμένη από σιδηρομαγνητικό υλικό, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι το κέλυφος του μετατροπέα είναι μεταλλικό και να χρησιμοποιήσουμε έναν μόνιμο μαγνήτη για τη σύζευξή του με την επιφάνεια. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η μάζα του μόνιμου μαγνήτη προστίθεται σε αυτή του μετατροπέα και επομένως μπορούν να μετρηθούν μόνο χαμηλές συχνότητες.

Για τις περιπτώσεις που η τοποθέτηση του επιταχυνσιομέτρου είναι μόνιμη, απαραίτητη είναι η στιβαρή σύνδεση μετατροπέα και επιφάνειας. Αυτό γίνεται με μια ειδική προεξοχή του επιταχυνσιομέτρου η οποία βιδώνεται στην επιφάνεια μελέτης. Η εφαρμογή αυτή εφόσον έχει γίνει σωστά, μας επιτρέπει τη μέτρηση υψηλών συχνοτήτων.

Η πλέον πρόχειρη τοποθέτηση η οποία συνηθίζεται όταν δεν υπάρχουν απαιτήσεις μεγάλης ακρίβειας, είναι η χρήση ειδικού κεριού. Αυτό μπορεί να γίνει σε επιταχυνσιόμετρα σχετικά μικρής μάζας και για μέτρηση χαμηλών συχνοτήτων μικρότερων των 5kHz. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται δυο επιταχυνσιόμετρα που λειτουργούν με πιεζοκρύσταλλο.



Σχήμα 34.

Επιταχυνσιόμετρα με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο

Το πρώτο επιταχυνσιόμετρο είναι της κατηγορίας που θα χρησιμοποιήσουμε στο πείραμά μας αργότερα και τοποθετείται στην επιφάνεια μέτρησης πρόχειρα παρεμβάλλοντας μεταξύ αυτού και της επιφάνειας μετάδοσης της δόνησης φυσικό κερί. Το δεύτερο τοποθετείται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια μέτρησης, εισχωρώντας σε αυτή για μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης, όπως φαίνεται το συγκεκριμένο βιδωτά, με σπείρωμα. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (quartz) που χρησιμοποιούν, είναι ικανός να παρέχει συνεχόμενη και αξιόπιστη δονητική μέτρηση. Στα επιταχυνσιόμετρα αυτά, επιδιώκεται η κατασκευή κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι εσφαλμένες μετρήσεις από δονήσεις που ενδεχομένως να δημιουργούνται στη μάζα της επιφάνειας του πειράματος από θερμικές μεταβολές.

3. “Μέτρηση ήχου – θορύβου”

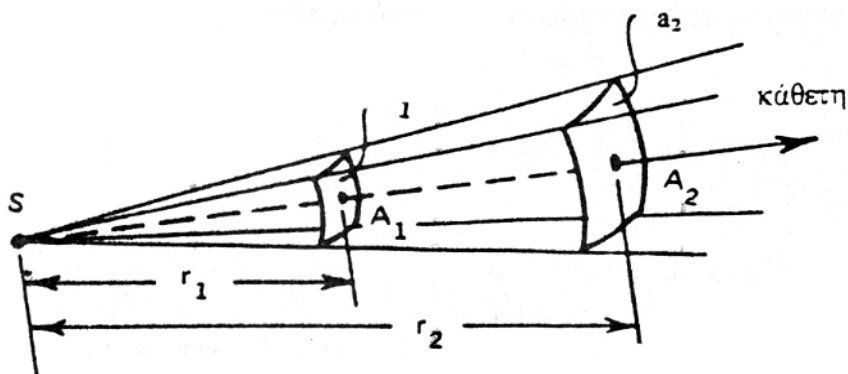
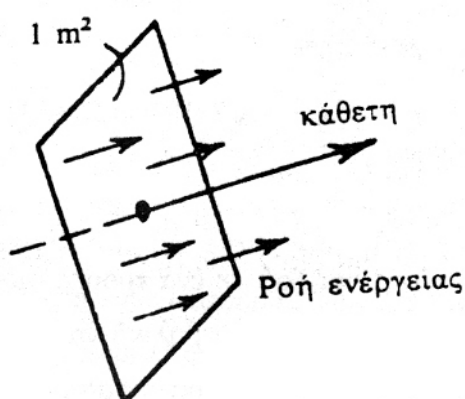
Η μέτρηση του ήχου είναι ουσιαστικά μέτρηση πίεσης επειδή ο ήχος παράγεται από οποιαδήποτε μετατροπή της στατικής τιμής της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι μετατροπείς όμως που χρησιμοποιούνται και η ρουτίνα μέτρησης είναι εντελώς διαφορετική και αυτό μας αναγκάζει να θεωρήσουμε τη μέτρηση του ήχου ως μια ξεχωριστή περίπτωση. Προτού όμως προχωρήσουμε στη διαδικασία μέτρησης θα δώσουμε συνοπτικά τους ορισμούς ορισμένων εννοιών που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ήχου.

Ένα σφαιρικό κύμα που διαδίδεται σε μέσο ισότροπο και ομογενές χωρίς απώλειες θα μοιράζει την ενέργεια που περιέχει σε ολοένα και μεγαλύτερη σφαιρική επιφάνεια ίση με $4\pi r^2$ όπου r η θεωρούμενη κάθε φορά απόσταση. Ορίζουμε ως ένταση I ενός

κύματος την ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή την ισχύ που διαπερνά μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού.

$$I = \frac{P}{S} = \frac{E}{tS} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

όπου P η ισχύς
 E η ενέργεια
 t ο χρόνος
 S η επιφάνεια



Σχήμα 35.

Ομογενής και ισότροπη διάδοση κύματος χωρίς απώλειες.

Η ένταση μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση του πλάτους και της πίεσης ως εξής.

$$I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho v}$$

όπου P η πίεση, ρ η πυκνότητα και v η ταχύτητα του ήχου στο μέσο.

Το σύστημα της ακοής αντιδρά σε ένα τρομερά μεγάλο φάσμα εντάσεων της τάξης του $10^{12}:1$, οπότε για το λόγο αυτό είναι λογικό να εκφράζουμε την ένταση του ήχου σε λογαριθμική κλίμακα. Εκλέγουμε μια ένταση αναφοράς ίση με $I=10\text{W/m}^3$. Η στάθμη έντασης σε decibel ενός ηχητικού κύματος ορίζεται ως εξής:

$$i = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (dB)$$

όπου I είναι η ένταση του κύματος σε W/m^2 .

Είναι σαφές ότι η στάθμη έντασης δεν είναι απόλυτο μέγεθος, αλλά ο λόγος που προκύπτει από τη σύγκριση της έντασης του ήχου με την ένταση αναφοράς I_0 .

Με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να εκφράσουμε τη σχέση δυο οποιονδήποτε εντάσεων. Είναι χρήσιμο να θυμόμαστε ότι ο διπλασιασμός της έντασης του ήχου οδηγεί σε αύξηση της στάθμης κατά 3dB και τούτο γιατί:

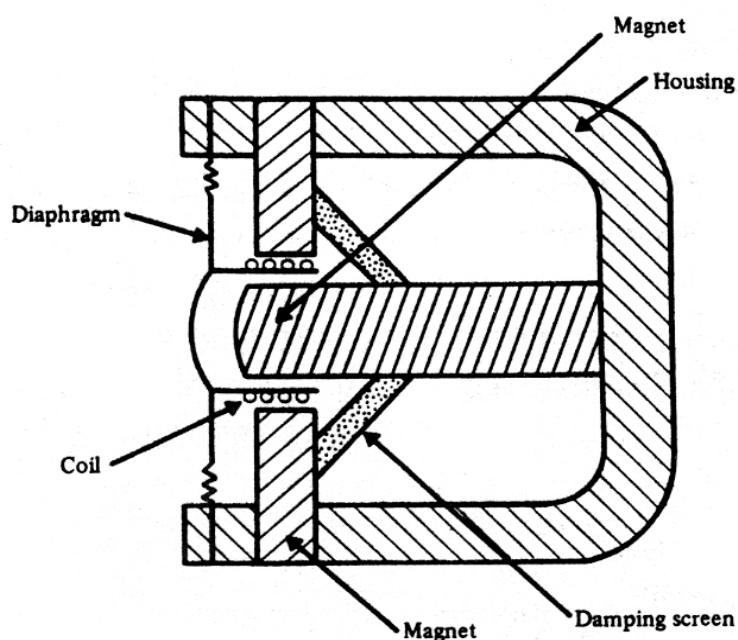
$$10 \log \left(\frac{2I}{I} \right) = 10 \log(2) = 10 \cdot 0,3 = 3dB$$

Όμοια εκλέγουμε μια πίεση αναφοράς ίση με $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ (Pa) και εκφράζουμε οποιαδήποτε άλλη πίεση συναρτήσει της πίεσης αναφοράς. Ορίζουμε κατά αυτόν τον τρόπο τη στάθμη πίεσης ή SPL (Sound pressure Level)

$$SPL(dB) = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

Οι βασικοί μετατροπείς πίεσης που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της στάθμης ενός ήχου είναι τα μικρόφωνα. Στη γενική τους μορφή τα μικρόφωνα αποτελούνται από ένα διάφραγμα, συνήθως μεταλλικό πάνω στο οποίο προσπίπτουν τα ηχητικά κύματα. Από κει και πέρα με κάποια διαδικασία μετατροπής ενέργειας, η ενέργεια αυτή των ηχητικών κυμάτων μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα πλάτους μερικών mV. Τα μικρόφωνα διακρίνονται σε δυναμικά ή κινητού πηνίου και σε πυκνωτικά ή μικρόφωνα πυκνωτή. Στα δυναμικά μικρόφωνα πάνω στο διάφραγμα βρίσκεται στερεωμένο ένα πηνίο, το πηνίο της φωνής που κινείται στο μαγνητικό πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη.

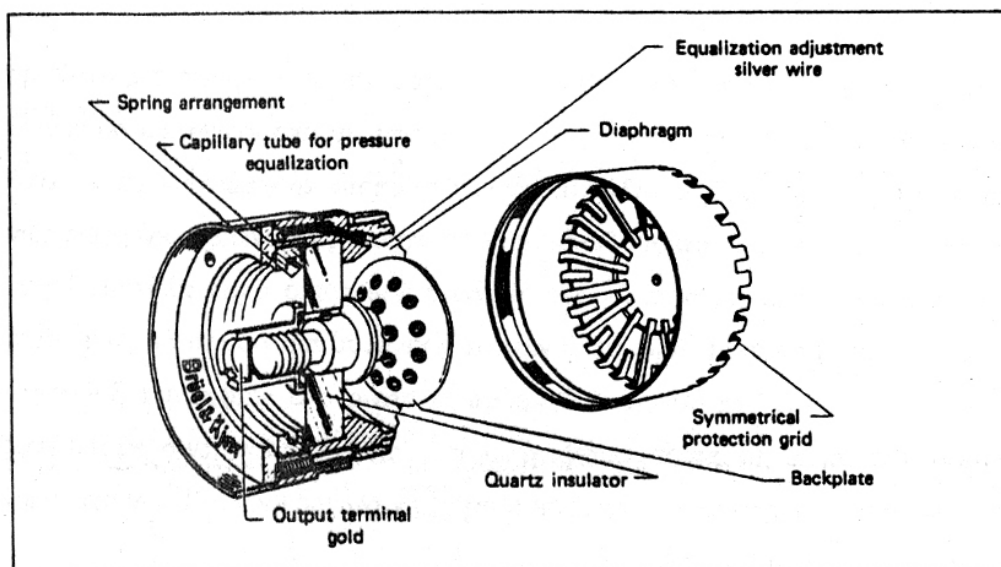
Η κίνηση αυτή οδηγεί δε τάση εξ επαγωγής ανάλογη των ηχητικών κυμάτων που προκάλεσαν την κίνηση.



Σχήμα 36.

Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας δυναμικού μικροφώνου

Τα πυκνωτικά μικρόφωνα χρησιμοποιούνται για αρκετές δεκαετίες, αλλά παρόλο που τα καινούρια μικρόφωνα έχουν κάποιες μικρές τεχνικές βελτιώσεις, ο ήχος τους έχει αλλάξει πολύ λίγο, έτσι ώστε μερικά από τα

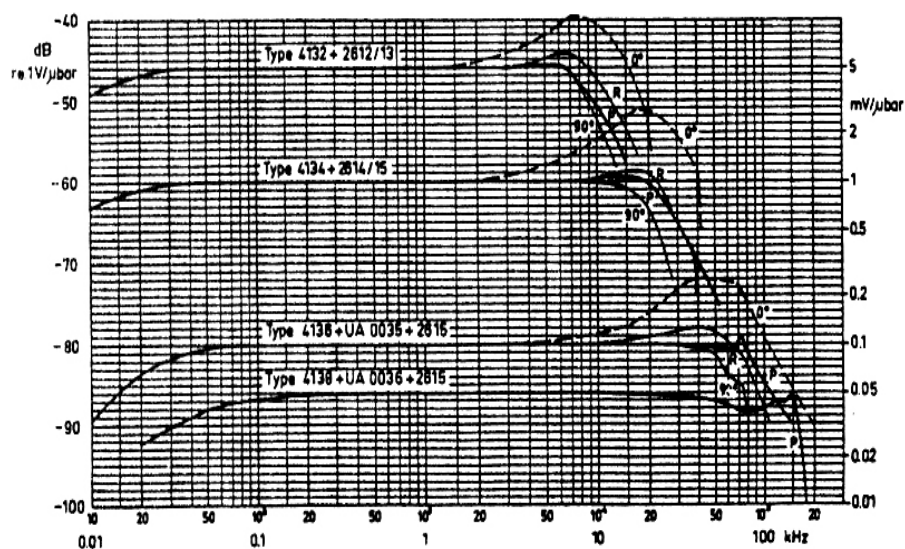


Σχήμα 37.

Τομή μικροφώνου

καλύτερα πυκνωτικά μικρόφωνα να έχουν σχεδιαστεί πάνω από 20 χρόνια πριν. Στο πυκνωτικό μικρόφωνο το διάφραγμα αποτελεί τον κινητό οπλισμό ενός πυκνωτή, ενώ ο άλλος οπλισμός παραμένει ακίνητος. Η πίεση των ηχητικών κυμάτων οδηγεί σε μεταβολή της απόστασης μεταξύ των οπλισμών, επομένως και της χωρητικότητας του πυκνωτή η οποία καταγράφεται σαν ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό φορτίο. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός μικροφώνου είναι η ευαισθησία του, η οποία εκφράζεται σε mV/Pa και η απόκριση συχνότητας. Ως κανόνας, τα πυκνωτικά μικρόφωνα έχουν πιο ελαφρύ διάφραγμα και μεγαλύτερη ευαισθησία ($>10 mV/Pa$) από τα δυναμικά μικρόφωνα. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας επιχρυσωμένο πλαστικό φιλμ για την κατασκευή του διαφράγματος. Έτσι εκτός του μικρού του βάρους, το σύστημα είναι πιο αποδοτικό και ικανό στην καταγραφή αρμονικών στο φάσμα της ανθρώπινης ακοής και όχι μόνο. Τα πυκνωτικά μικρόφωνα θα πρέπει να προτιμώνται σε περίπτωση που ενδιαφέρει η ακρίβεια και η καλή μεταβατική κατάσταση. Το μέγεθος του διαφράγματος διαδραματίζει ρόλο και στην τονική ποιότητα του μικροφώνου, για παράδειγμα προτιμούμε μεγάλης διαμέτρου μικρόφωνα για ηχογράφιση φωνής γιατί προσδίδουν ζεστό και κολακευτικό ήχο. Αντίθετα, τα μικρόφωνα με μικρό διάφραγμα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει η ακρίβεια. Ακόμη και αν είναι σχετικά αποδοτικά, τα πυκνωτικά μικρόφωνα παράγουν τόσο μικρό ηλεκτρικό σήμα, ώστε να χρειάζονται

ενσωματωμένο προενισχυτή για να φέρουν το σήμα σε χρήσιμο επίπεδο. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο τα πυκνωτικά μικρόφωνα έχουν μεγαλύτερο κόστος από τα αντίστοιχα δυναμικά. Επιπροσθέτως, τα πυκνωτικά μικρόφωνα χρειάζονται και μια τάση πόλωσης για να λειτουργήσουν η οποία συνήθως είναι της τάξεως των 48 Volt που ονομάζεται και πηγή τάσης “phantom” και γι αυτό υπάρχει αυτή η ένδειξη σε πολλές κονσόλες μίξης ήχου. Ο όρος αυτός, “phantom”, έχει δοθεί επειδή η πολική αυτή τάση τροφοδοσίας παρέχεται μέσω των ενδεικτικών “leads” του μικροφώνου και δεν χρειάζεται περαιτέρω καλωδίωση. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την απόκριση συχνότητας διαφόρων τύπων πυκνωτικών μικροφώνων που προορίζονται για μετρήσεις ακριβείας.

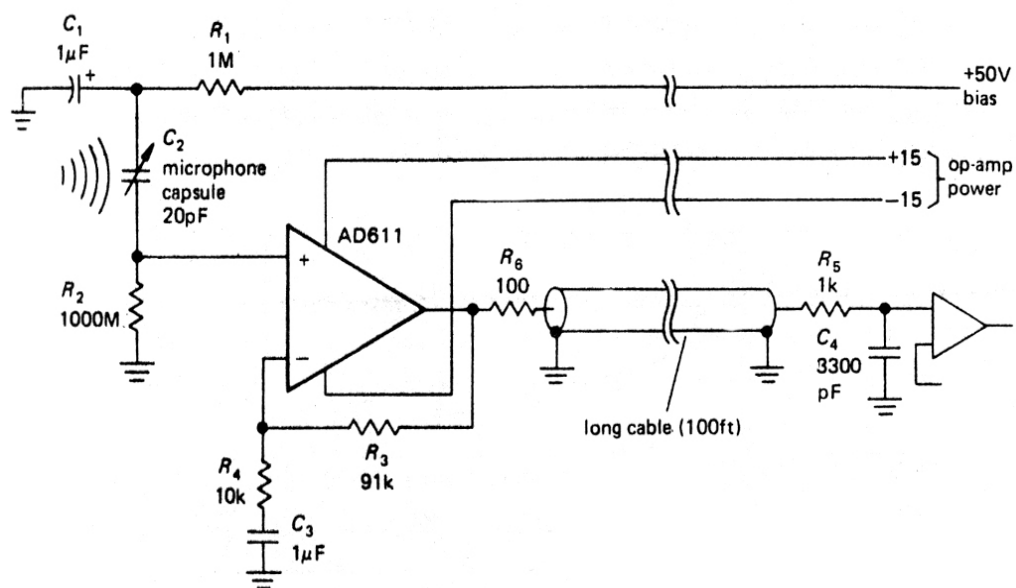


Σχήμα 38.

Απόκριση συχνότητας διαφόρων τύπων πυκνωτικών μικροφώνων

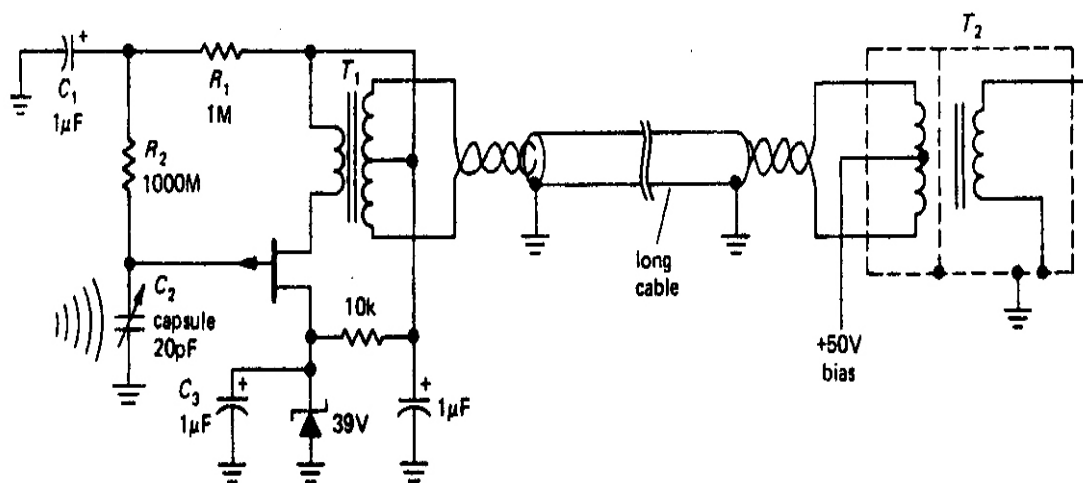
Στα παρακάτω σχήματα (39, 40) φαίνονται δυο εκδοχές για τη χρήση ενός πυκνωτικού μικροφώνου. Στο πρώτο κύκλωμα η κάψα του μικροφώνου που αναπαρίσταται με μια χωρητικότητα 20pF, τροφοδοτείται με τάση πόλωσης 50V και ένας τελεστικός ενισχυτής ενισχύει το σήμα και ταυτόχρονα εκτελεί την προσαρμογή των σύνθετων αντιστάσεων. Στο δεύτερο κύκλωμα χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές για την προσαρμογή αντίστασης, ενώ η τάση πόλωσης εφαρμόζεται στη μεσαία λήψη των μετασχηματιστών. Παρατηρείστε ότι το σήμα μεταφέρεται με

καλώδιο XLR, δηλαδή δυο αγωγούς και γείωση ξεχωριστά για ελαχιστοποίηση του θορύβου και των παρεμβολών.



Σχήμα 39.

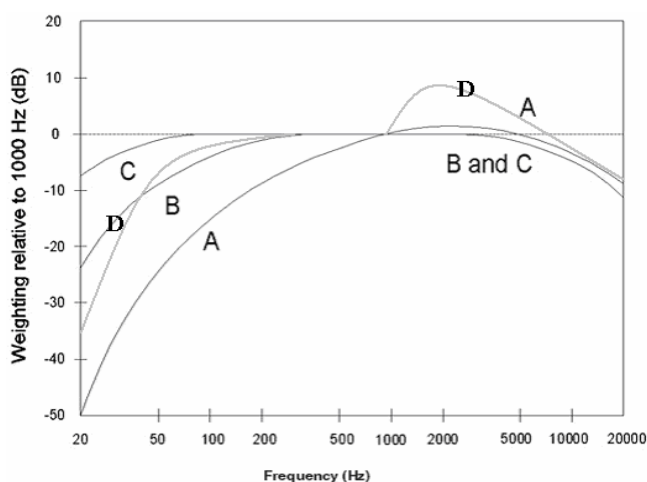
Εφαρμογή λειτουργίας πικνωτικού μικροφώνου με τη χρήση τελεστικού ενισχυτή



Σχήμα 40.

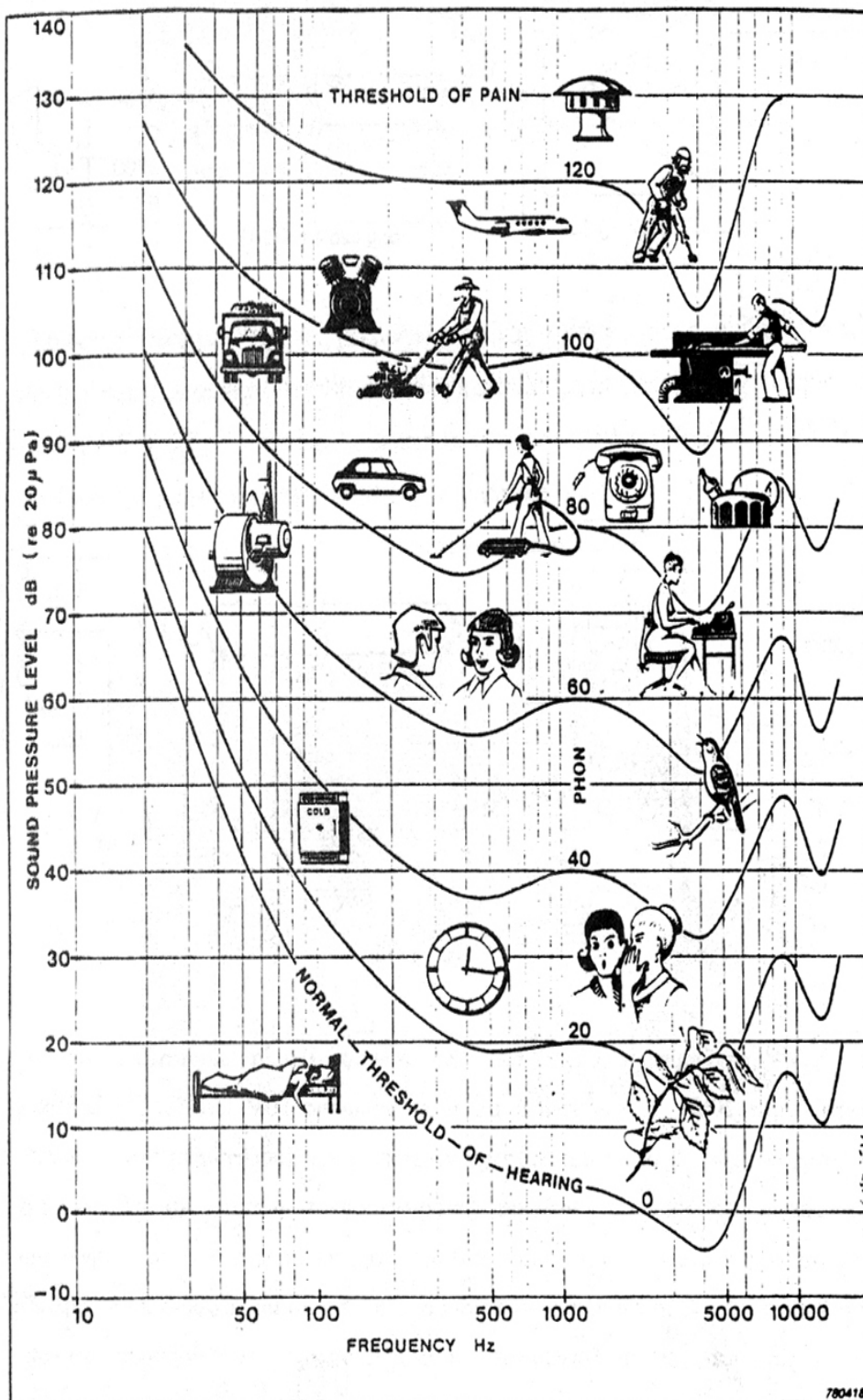
Εφαρμογή λειτουργίας πικνωτικού μικροφώνου με χρήση μετασχηματιστών

Εάν θέλουμε να μετρήσουμε την ενόχληση που προκαλεί ένας ανεπιθύμητος ήχος, κοινώς θόρυβος, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ορισμένες ιδιομορφίες της ανθρώπινης ακοής. Το κατώφλι ακουστότητας ορίζεται ως ο μόλις αντιληπτός ήχος ο οποίος έχει συμφωνημένη ένταση 10W/m^2 στο 1kHz και διάρκεια $0,1\text{sec}$. Το αυτί παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία για κάθε συχνότητα. Επιπροσθέτως η ευαισθησία του αυτιού δεν εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα αλλά και από τη στάθμη. Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας προέκυψαν πειραματικά στη δεκαετία του '30 και έχουν την έννοια ότι το ερέθισμα που παράγεται στον εγκέφαλο είναι το ίδιο κατά μήκος μιας ορισμένης καμπύλης. Παρατηρούμε ότι στις χαμηλές συχνότητες το αυτί μας είναι σχετικά αναισθητο και απαιτείται μεγαλύτερη πραγματική στάθμη πίεσης για να παραχθεί το ίδιο ακουστικό ερέθισμα από ότι στις μεσαίες συχνότητες. Μονάδα ακουστότητας είναι το phon. Κατά σύμβαση στο 1kHz οι μονάδες ακουστότητας συμπίπτουν με τις μονάδες στάθμης, δηλαδή ένας ήχος συχνότητας 1kHz και στάθμης 70dB έχει ακουστότητα 70phon . Σε όλες τις άλλες συχνότητες η στάθμη διαφέρει από την ακουστότητα. Το αυτί είναι μέγιστα ευαίσθητο στα $3,5\text{kHz}$ και μέγιστα αναισθητο στα 20Hz . Όσο η στάθμη του ήχου αυξάνει οι καμπύλες αποκτούν μια πιο επίπεδη μορφή. Από τη στιγμή που το αυτί μας δεν είναι το ίδιο ευαίσθητο σε όλες τις συχνότητες, είναι λογικό στις μετρήσεις να χρησιμοποιούμε κάποιο είδος φίλτρου που προσομοιάζει τις καμπύλες ίσης ακουστότητας. Χρησιμοποιούνται τέσσερα βασικά δικτυώματα A, B, C, και D ανάλογα με τη στάθμη του μετρούμενου θορύβου. Το φίλτρο A είναι αυτό που ευρέως χρησιμοποιείται στις χαμηλές και μέσες εντάσεις.



Σχήμα 41.

Καμπύλες φίλτρων A,B,C και D



Σχήμα 42.

Καμπύλες ίσης ακουστότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

1. “Μελέτη του φάσματος του ήχου”

Οι περισσότεροι ήχοι αποτελούνται από ένα σύνθετο μείγμα δονήσεων, όπως ακριβώς και η μουσική είναι ένα μείγμα από υψηλές και χαμηλές νότες αλλά και μερικές των οποίων ο τόνος δύσκολα καθορίζεται. Ένα ηχητικό φάσμα είναι η αναπαράσταση του ήχου, συνήθως ενός μικρού δείγματος του ήχου, σε συμφωνία με το πλήθος των διαφορετικών συχνοτήτων και συνήθως παρουσιάζεται σαν ένα γράφημα της δύναμης ή πίεσης συναρτήσει της συχνότητας. Η πίεση μετράται σε decibel και η συχνότητα σε Hertz (δονητικός παλμός ανά sec). Μπορούμε να υποθέσουμε ότι το ηχητικό φάσμα είναι σαν μια συνταγή ήχου, όπου παίρνουμε μια ποσότητα από κάθε συχνότητα και τοποθετώντας τες μαζί έχουμε έναν πλήρη ήχο.

Για να μετρήσουμε το φάσμα του ήχου συνήθως χρησιμοποιούμε:

- Ένα μικρόφωνο το οποίο μετράει την πίεση του ήχου για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα,
- Έναν ενισχυτή μετρήσεων,
- Ένα αναλογικό ή ψηφιακό μετατροπέα ο οποίος μετατρέπει τις μετρήσεις αυτές σε μια σειρά αριθμών (αντιπροσωπεύοντας την τάση του μικροφώνου) σαν συνάρτηση του χρόνου και
- Έναν υπολογιστή ο οποίος αναλαμβάνει την επεξεργασία των αριθμών αυτών.

Μπορούμε να δούμε εμπειρικά τη δημιουργία ενός φάσματος αν τραγουδήσουμε νότες ή τις παίξουμε με κάποιο μουσικό όργανο σε ένα μικρόφωνο το οποίο είναι συνδεδεμένο με υπολογιστή ο οποίος έχει το κατάλληλο hardware και software. Αν αλλάζουμε κάθε φορά την ένταση, το πλάτος του φάσματος θα μεταβάλλεται ανάλογα με αυτή καθώς επίσης αλλάζοντας τον τόνο αλλάζει και η συχνότητα. Επίσης αλλαγές στο ηχητικό φάσμα μπορούν να παρατηρηθούν και κατά την αλλαγή της χροιάς.

2.α. “Τι είναι το decibel”

Το decibel (dB) είναι μια λογαριθμική μονάδα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μιας αναλογίας. Η αναλογία αυτή μπορεί να είναι ισχύς, τάση, ένταση όπως και πολλά άλλα μεγέθη. Για να κατανοήσουμε όμως τις λογαριθμικές μονάδες, ας μιλήσουμε με νούμερα.

Υποθέτουμε ότι έχουμε δυο ηχεία τα οποία παίζουν τον ίδιο ήχο, όμως το πρώτο με ένταση P_1 και το άλλο με ένταση P_2 , όπου $P_1 < P_2$. Η διαφορά σε ντεσιμπέλ μεταξύ των δυο ηχείων δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$10 \log(P_2/P_1) \text{ dB}$$

όπου ο λογάριθμος έχει βάση το 10.

Εάν το δεύτερο ηχείο παράγει διπλάσια ισχύ από το πρώτο, η διαφορά σε dB είναι:

$$10 \log(P_2/P_1) = 10 \log 2 = 3 \text{ dB}$$

Εάν το δεύτερο ηχείο παράγει ήχο δεκαπλάσιας ισχύος από το πρώτο, τότε η αντίστοιχη διαφορά θα ήταν:

$$10 \log(P_2/P_1) = 10 \log 10 = 10 \text{ dB}$$

Τέλος, αν η ισχύς του δεύτερου ηχείου ήταν ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη του πρώτου, η διαφορά σε dB θα ήταν:

$$10 \log(P2/P1) = 10 \log 1000000 = 60\text{dB}$$

2.β. “Τα decibel σε σχέση με την πίεση που ασκεί ο ήχος”

Ο ήχος συνήθως μετράται με μικρόφωνα τα οποία ανταποκρίνονται αναλογικά στην πίεση του ήχου P. Η ισχύς ενός ηχητικού κύματος ισούται με το τετράγωνο της πίεσης. Επίσης ισχύει η σχέση : $\log x^2 = 2 \log x$, οπότε έχουμε τον παράγοντα 2 σαν πολλαπλασιαστέο κατά τη μετατροπή της πίεσης του ήχου σε decibel. Η διαφορά της πίεσης αυτής μεταξύ δύο ήχων P1 και P2 ορίζεται ως εξής:

$$20 \log(P1/P2)\text{dB}$$

όπου ο λογάριθμος έχει βάση το 10.

Όταν το decibel χρησιμοποιείται για να εκφράσει ένα επίπεδο έντασης για ένα συγκεκριμένο ήχο παρά για μια αναλογία, τότε το επίπεδο αναφοράς πρέπει να επιλέγεται. Για παράδειγμα, για την ένταση του ήχου με μέσο διάδοσης τον αέρα, το επίπεδο αναφοράς είναι συνήθως τα 20μPa, ή 0.02 mPa που ισοδυναμεί με 20 δισεκατομμυριοστά της μιας ατμόσφαιρας. Αυτό είναι περίπου και το όριο της ευαισθησίας του ανθρώπινου αυτιού.

Έτσι αν δούμε μια πίεση ήχου της τάξεως των 86dB, σημαίνει ότι:

$$20 \log(P2/P1) = 86\text{dB}$$

όπου P1 είναι η πίεση που ασκεί ο ήχος στο επίπεδο αναφοράς, ενώ το P2 είναι το αντίστοιχο του ήχου που μελετάμε. Διαιρώντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης με το 20 έχουμε

$$\log(P2/P1) = 4.3\text{dB}$$

Όμως 4 είναι ο λογάριθμος του 10000 ενώ το 0.3 είναι ο λογάριθμος του 2, οπότε αυτός ο ήχος είναι 20000 φορές μεγαλύτερος από το επίπεδο αναφοράς. Τα 86dB λοιπόν μπορεί να είναι δυνατά αλλά όχι επικίνδυνα για το ανθρώπινο αυτί, αρκεί βέβαια να μην διαρκέσουν για πολύ χρόνο.

Το επίπεδο των 0dB αντιστοιχεί στη μέτρηση της πίεσης του ήχου όταν ισοδυναμεί με το επίπεδο αναφοράς. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν έχουμε:

$$20\log(P_{\text{μετρ.}}/P_{\text{αναφ.}}) = 20\log 1 = 0\text{dB}$$

Οπότε τα 0dB δεν σημαίνουν ότι δεν υπάρχει ήχος, αλλά ότι είναι ίσος σε ασκούμενη πίεση με αυτόν του επιπέδου αναφοράς. Με την ίδια λογική μπορούμε να έχουμε και αρνητική πίεση ήχου.

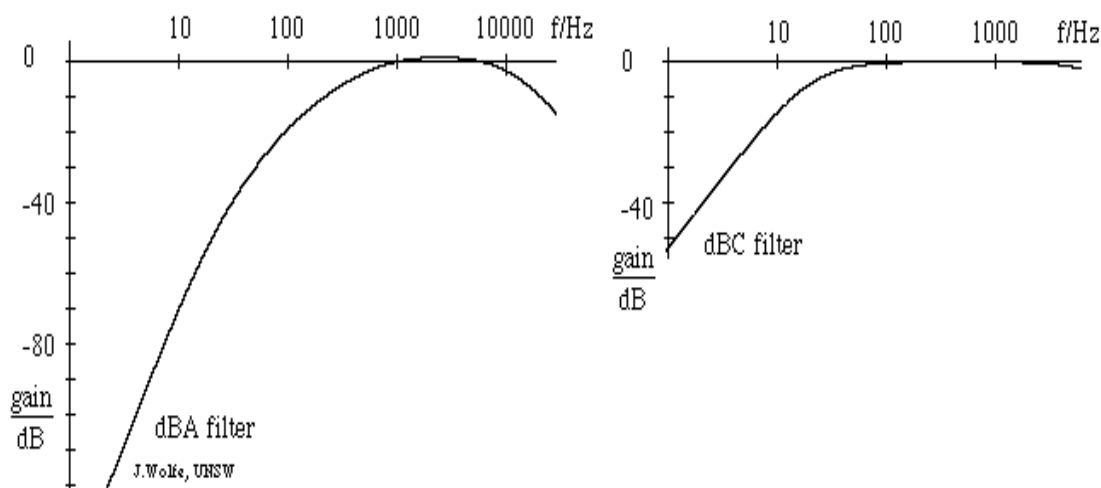
2.γ. “Γιατί χρησιμοποιούμε τα *decibels*”

Το ανθρώπινο αυτί είναι ικανό να αντιληφθεί ήχους σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, τόσο ώστε η αναλογία της πίεσης του ήχου από το επίπεδο που προκαλεί μόνιμη βλάβη στον άνθρωπο προς αυτό που αντιστοιχεί στο ελάχιστο που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί είναι μεγαλύτερη από ένα εκατομμύριο. Για παράδειγμα, ο λογάριθμος του 10^6 είναι το 6, οπότε η αναλογία αυτή αντιστοιχεί σε μια διαφορά 120dB. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα που είναι πιο εύχρηστη για τόσο μεγάλο εύρος. Αλλά και η αίσθηση της ακοής του ανθρώπου λειτουργεί σε λογαριθμική κλίμακα, οπότε η αυξομείωση της έντασης του ήχου χρησιμοποιώντας τα decibel είναι αναλογική με την αντίληψη της αντίστοιχης αυξομείωσης από το ανθρώπινο αυτί.

Όμως η ανθρώπινη ακοή δεν ανταποκρίνεται το ίδιο σε όλες τις συχνότητες αλλά είναι περισσότερο ευαίσθητη στο εύρος των συχνοτήτων μεταξύ των 1kHz και 4kHz, για τις ηχητικές μετρήσεις χρησιμοποιούμε κάποια φίλτρα τα οποία ανταποκρίνονται σε συχνότητες παρόμοιες με αυτές που αντιλαμβάνεται το αυτί. Όταν για παράδειγμα χρησιμοποιούμε το φίλτρο A, η πίεση δίνεται σε dB(A). Τα επίπεδα πίεσης που μετρούνται με το φίλτρο A είναι εύκολο να μετρηθούν και χρησιμοποιούνται ευρέως, αλλά δεν είναι ακριβώς αντίστοιχα της έντασης του ήχου

επειδή το φίλτρο δεν έχει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με το ανθρώπινο αυτί. Για να καθορίσουμε την ένταση ενός ήχου, χρειάζεται να λάβουμε υπ όψη κάποιες ιδανικές καμπύλες οι οποίες αναπαριστούν τη ανταπόκριση του αυτιού στις διάφορες συχνότητες. Η μονάδα μέτρησης της έντασης είναι το **stone**, το οποίο είναι ορισμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αντιστοιχεί σε επίπεδο πίεσης στη συχνότητα του 1kHz.

Εκτός από τα φίλτρα A που μιλήσαμε παραπάνω και οι μετρήσεις της κλίμακας αυτής είναι σημεία καμπύλης, υπάρχουν και τα φίλτρα C, που οι μετρήσεις στην κλίμακά τους για αρκετές οκτάβες είναι πρακτικά σημεία ευθείας γραμμής. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται μόνο για μετρήσεις σε πολύ υψηλά ηχητικά επίπεδα. Αντίστοιχα οι μετρήσεις σε αυτή την κλίμακα εκφράζονται σε dB(C). Ωστόσο υπάρχει και το φίλτρο B το οποίο όμως χρησιμοποιείται πολύ σπάνια και σε ενδιάμεση κλίμακα των άλλων δυο φίλτρων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η απόκριση του φίλτρου A αριστερά και του φίλτρου C δεξιά, στην αύξηση των dB μέχρι το 1kHz.



Σχήμα 43.

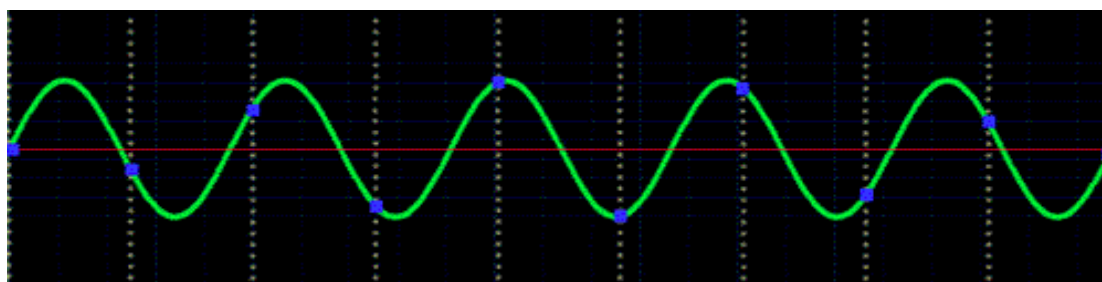
Απόκριση των φίλτρων A και B στην αύξηση των dB

3. “Το θεώρημα της δειγματοληψίας (Nyquist)”

Είναι γεγονός ότι η συχνότητα δειγματοληψίας καθορίζει το όριο της ακουστικής συχνότητας η οποία θα αναπαραχθεί ψηφιακά. Ένας από τους πιο σημαντικούς κανόνες δειγματοληψίας είναι το **θεώρημα του Nyquist**, το οποίο υποστηρίζει ότι η υψηλότερη συχνότητα η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί, είναι μικρότερη από το μισό της τιμής της συχνότητας δειγματοληψίας.

$$f_{\max} = \frac{f_s}{2}$$

Έτσι λοιπόν αν θέλουμε ένα πλήρες ακουστικό φάσμα 20kHz, πρέπει η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι πάνω από 40kHz. Αν δεν το λάβουμε αυτό υπ’ όψη μας, θα έχουμε κάποια δυσάρεστα αποτελέσματα όσον αφορά το πείραμά μας. Για παράδειγμα έχουμε την ημιτονοειδή κυματομορφή που φαίνεται παρακάτω.

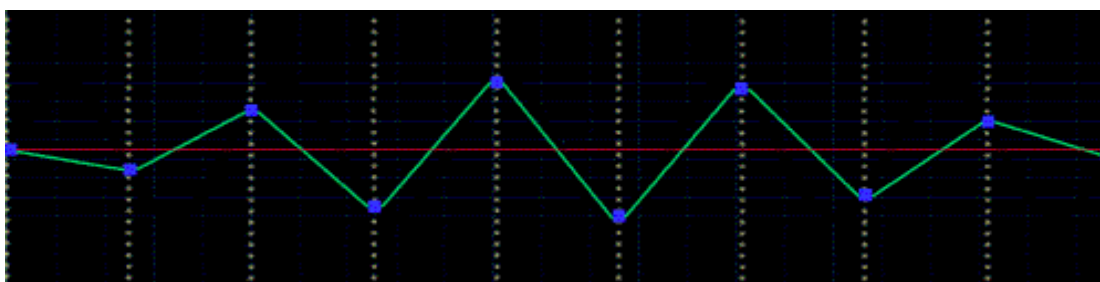


Σχήμα 44.

Αναλογικό σήμα εισόδου ημιτονοειδούς μορφής.

Οι διακεκομμένες κάθετες γραμμές αντιπροσωπεύουν τα διαστήματα μεταξύ της λήψης δειγμάτων, ενώ οι μπλε τελείες είναι τα σημεία τομής των μετρήσεων με την κυματομορφή, κατά τη μετατροπή του πραγματικού σήματος από αναλογικό σε

ψηφιακό. Αν το φάσμα της δειγματοληψίας είναι μικρότερο από αυτό που λέει το θεώρημα του Nyquist, η ανακατασκευή της κυματομορφής παρουσιάζει το πρόβλημα που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 45.

Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό με συχνότητα μικρότερη από αυτή του θεωρήματος Nyquist

Όπως βλέπουμε δεν έχει καμία σχέση με το σήμα που είχαμε στην είσοδο. Αυτό το σήμα είναι ψευδές, δεν αντιστοιχεί στην πραγματικότητα και δεν φαίνεται σαν μουσική κυματομορφή, αλλά σαν λάθος μετατροπή σε ψηφιακή μορφή του αναλογικού σήματος εισόδου. Γι αυτό το λόγο, για να πραγματοποιήσουμε μια τέτοια μετατροπή (από αναλογική σε ψηφιακή μορφή), χρησιμοποιούμε ένα χαμηλοπερατό φίλτρο το οποίο αφαιρεί όλα τα σήματα πάνω από τη συχνότητα του Nyquist. Βέβαια για να επιτύχουμε την ακρίβεια στις μετρήσεις που θέλουμε, είναι απαραίτητο να πάρουμε πολλά δείγματα του ήχου που μελετάμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. “Μέτρηση της ακουστικής πίεσης”

Απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση των μετρήσεων είναι η τοποθέτηση της κιθάρας σε σταθερή οριζόντια θέση, έτσι ώστε να έχουμε ελεύθερη ταλάντωση της ηχητικής της πλάκας. Ταυτόχρονα με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να αποφύγουμε την επίδραση εξωτερικών παραγόντων που μπορούν να αλλοιώσουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Στη συνέχεια τοποθετούμε ένα πυκνωτικό μικρόφωνο σε απόσταση 20cm από την ηχητική οπή και με θέση έτσι ώστε να “βλέπει” προς το τελευταίο τάστο της ταστιέρας. Η διάταξη που χρησιμοποιούμε αυτή τη φορά αποτελείται από:

- Πυκνωτικό μικρόφωνο ACO Pacific
- Προενισχυτής μετρήσεων ACO Pacific με κέρδος 40dB
- Χαμηλοπερατό φίλτρο Butterworth 10kHz 4^{ης} τάξης
- Κάρτα δειγματοληψίας
- Software ανάλυσης Matlab

Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 40kHz και η ευαισθησία του μικροφώνου είναι $S=17,4 \text{ mV/Pa}$, ενώ η πίεση που μετράται από το μικρόφωνο υπολογίζεται σε Pa δίνεται από την παρακάτω σχέση :

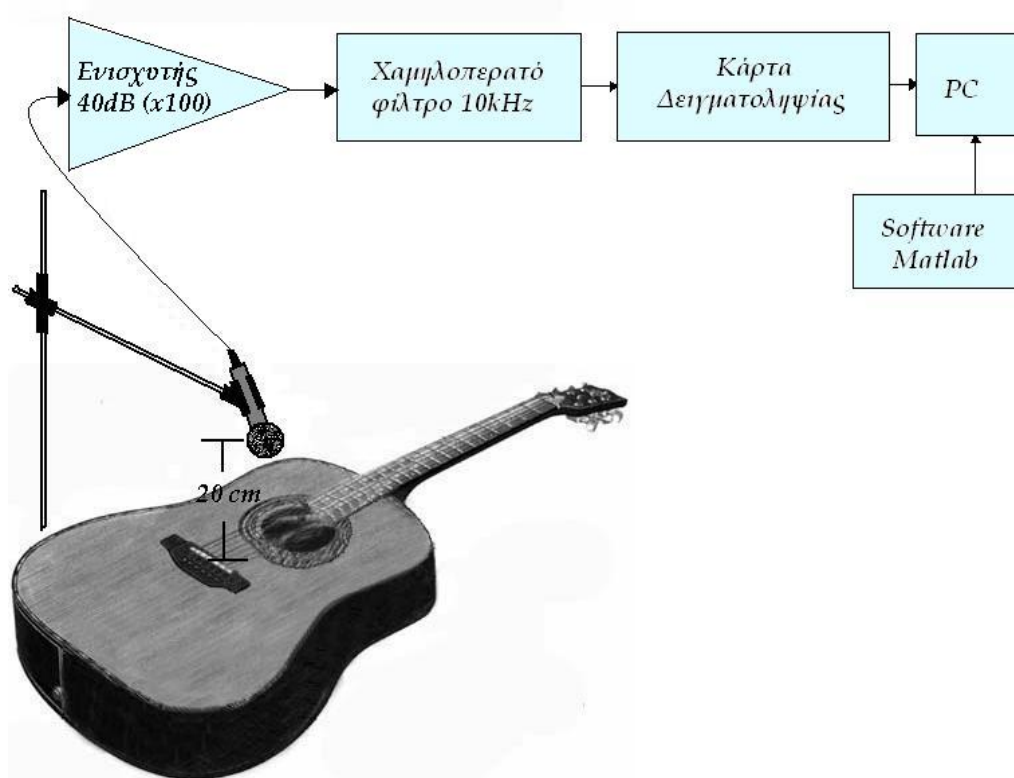
$$p = \frac{V_{out}}{100 \cdot 17,4 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Pa})$$

Η διαδικασία του πειράματος περιγράφεται παρακάτω.

Διεγείρουμε τις χορδές μια – μια προσπαθώντας να ασκούμε πάντα την ίδια δύναμη, όμως δεν μετράμε κατευθείαν τις επιδράσεις της δόνησης αυτής επάνω στο καπάκι όπου διοχετεύεται το κύμα ταλάντωσης μέσω των χορδών, αλλά στον αέρα. Ο

αέρας είναι το μέσο διάδοσης της ταλάντωσης του καπακιού, οπότε η πίεση αυτή που προκαλείται σε αυτόν από τη δόνησή του καπακιού καταγράφεται από το μικρόφωνο. Με τη σειρά του το μικρόφωνο μετατρέπει αυτό το σήμα της πίεσης σε ηλεκτρικό, στη συνέχεια ενισχύεται από τον προενισχυτή και κατευθύνεται στην κάρτα δειγματοληψίας του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το μικρόφωνο όπως φαίνεται κι από το σχήμα που ακολουθεί, τοποθετείται σε μικρή απόσταση από την ηχητική οπή της κιθάρας και αυτό γίνεται για να βελτιώσουμε το λόγο του σήματος προς το θόρυβο. Σαν θόρυβο ορίζουμε την αντήχηση του δωματίου, η οποία αυξάνει με την ελάττωση της συχνότητας του ήχου που καταγράφουμε. Επειδή η κιθάρα δεν παράγει συχνότητες πάνω από 100Hz, για να έχουμε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα μειώνοντας τον παράγοντα του θορύβου, μπορούμε να πάρουμε πολλές μετρήσεις και να εξάγουμε το μέσο όρο.

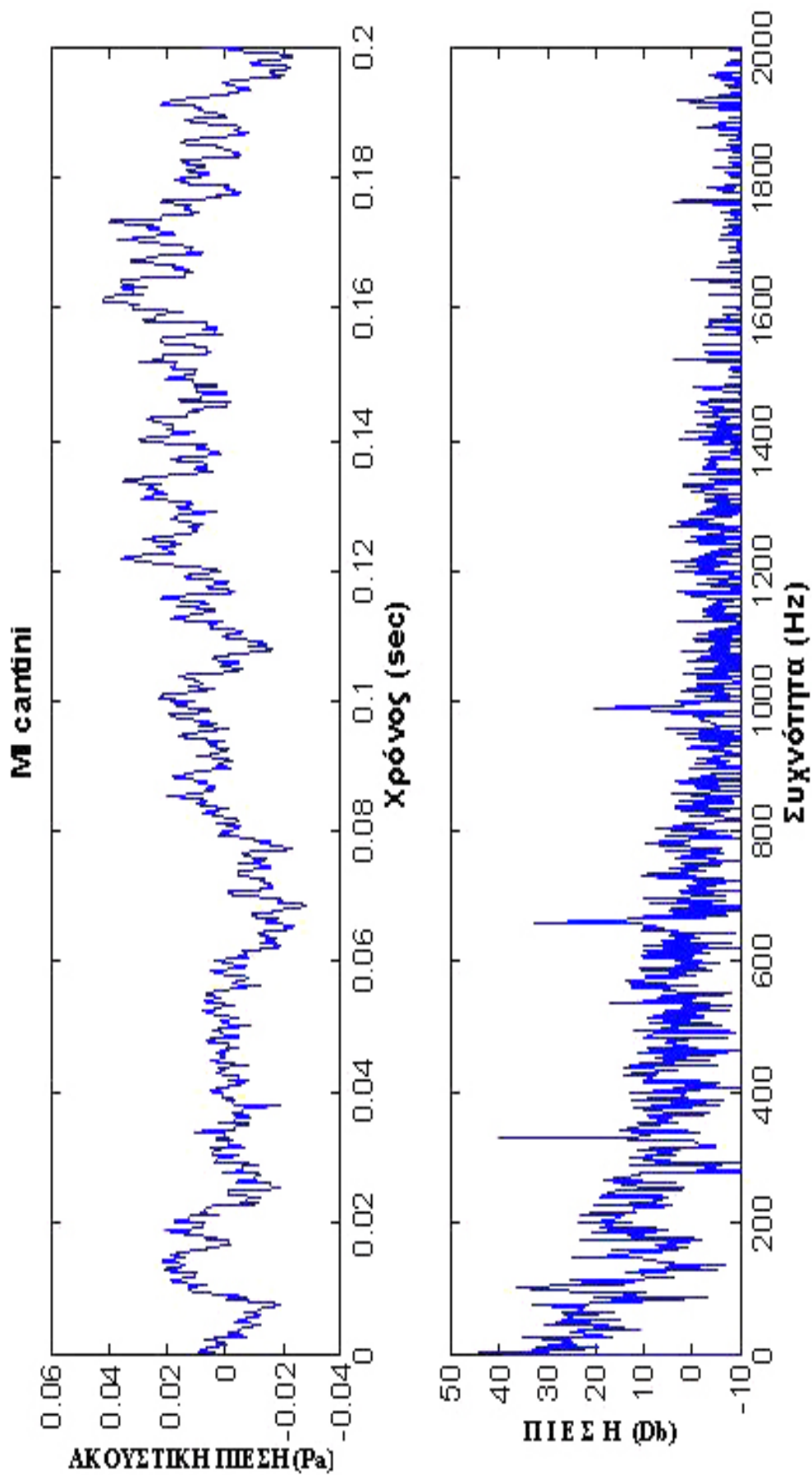
Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 46.

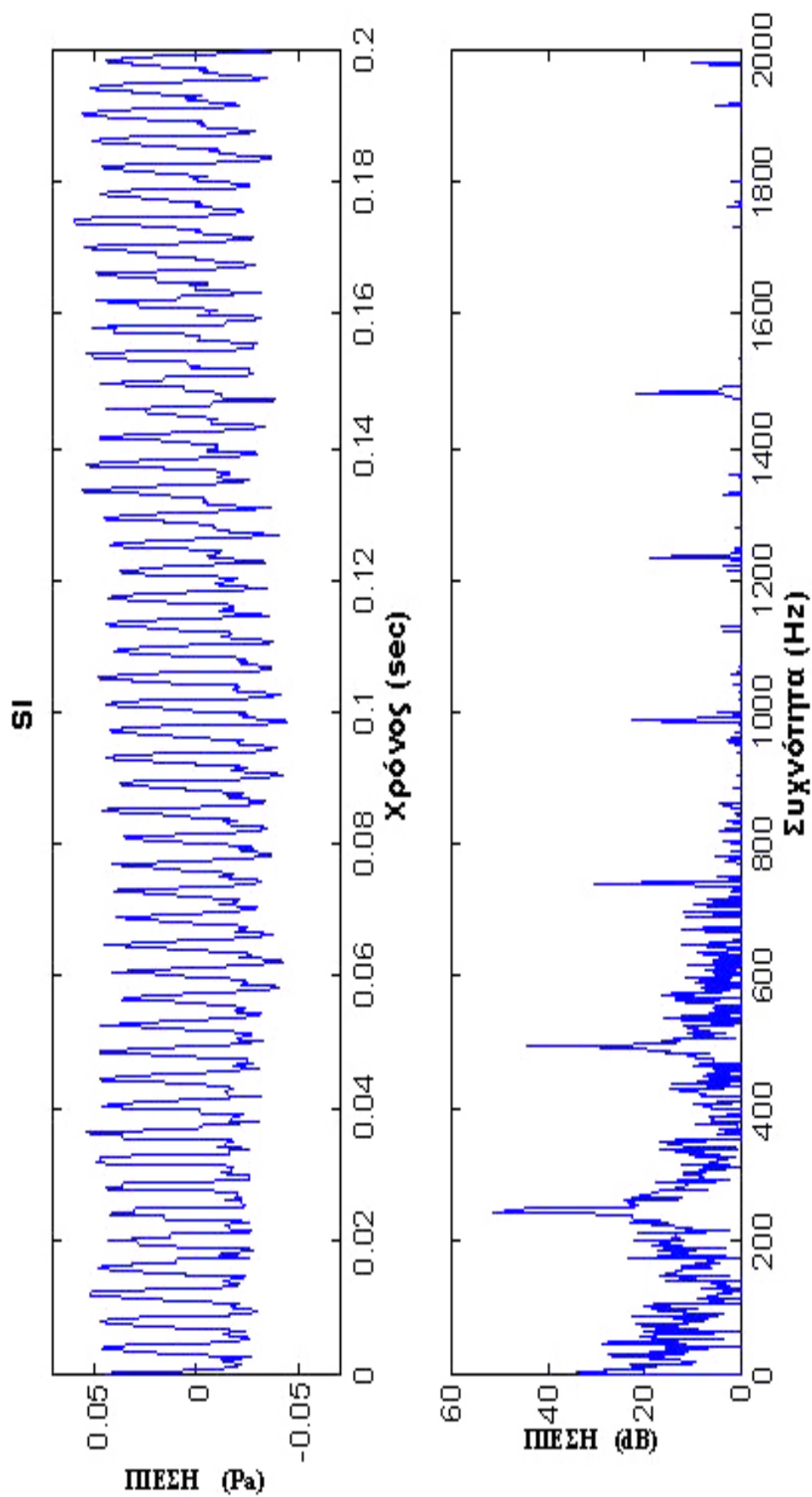
Πειραματική διάταξη πειστικής συμπεριφοράς

Τα φάσματα των συχνοτήτων κάθε χορδής προκύπτουν με επεξεργασία μέσω software ανάλυσης Matlab



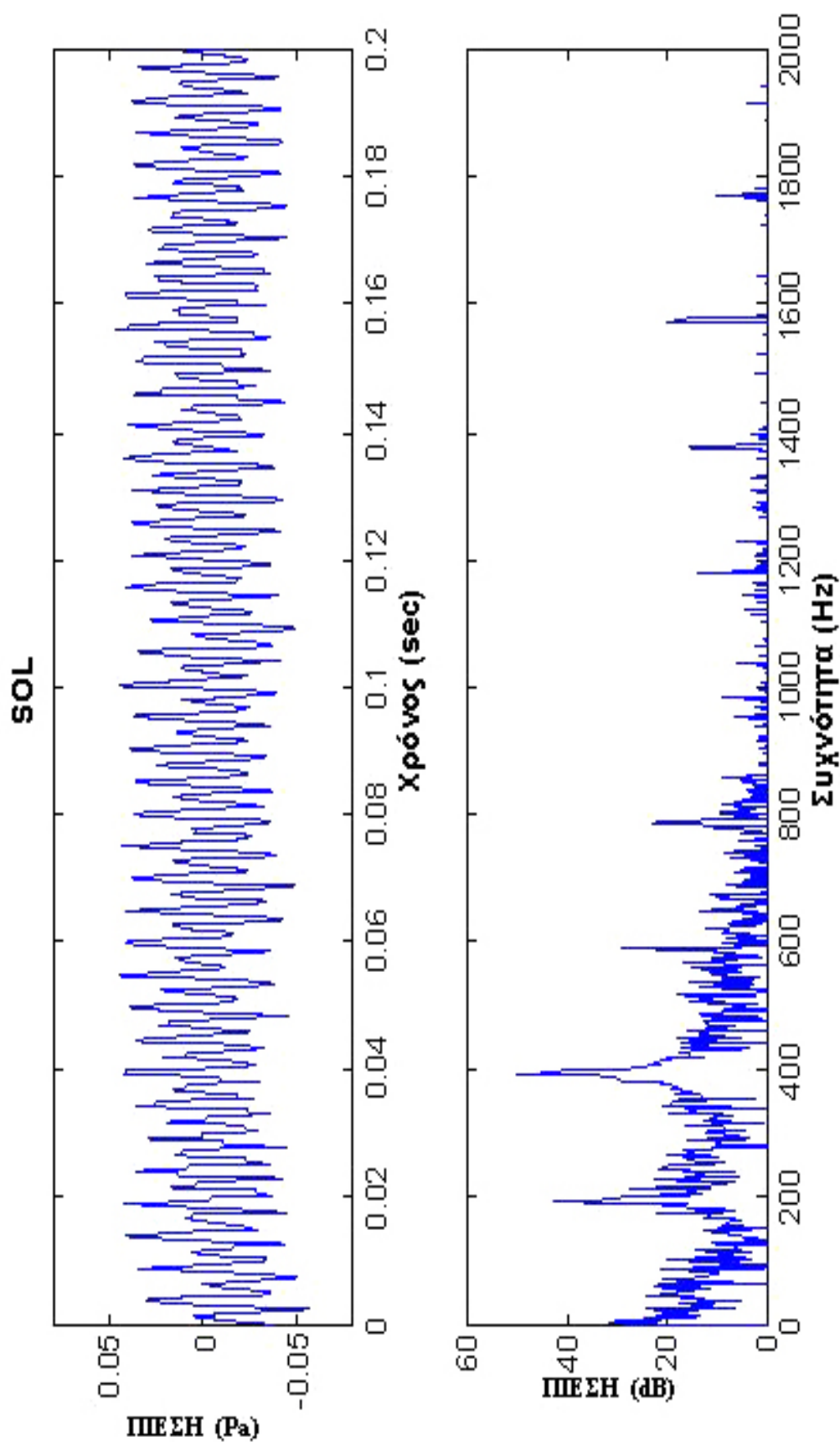
Σχήμα 47.

Κατατομωρή της χορδής Mh Cantini κα αντίστοιχο φάσμα



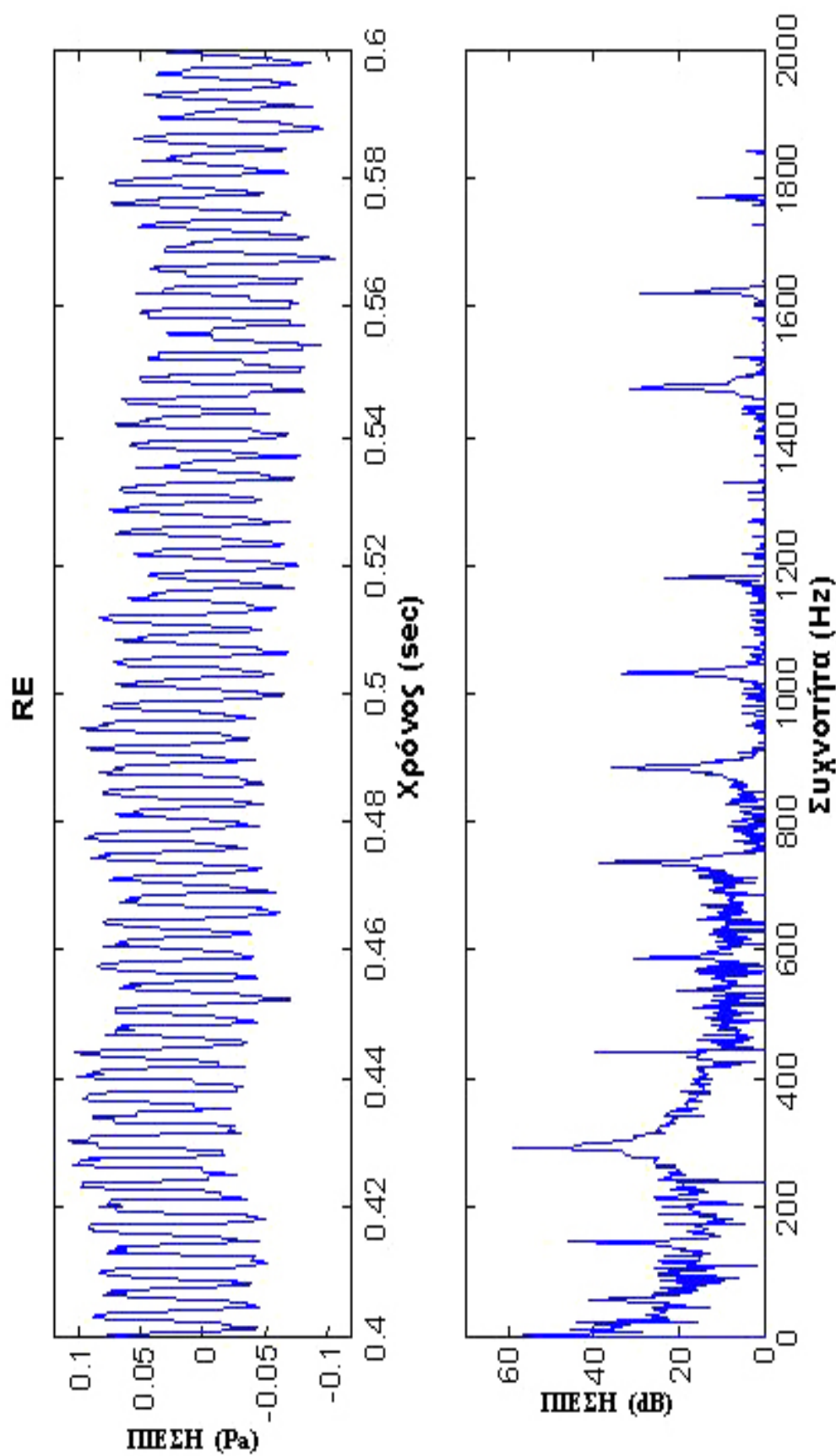
Σχήμα 48.

Κατατομωμένη της χορδής Si και αντίστοιχο φάσμα



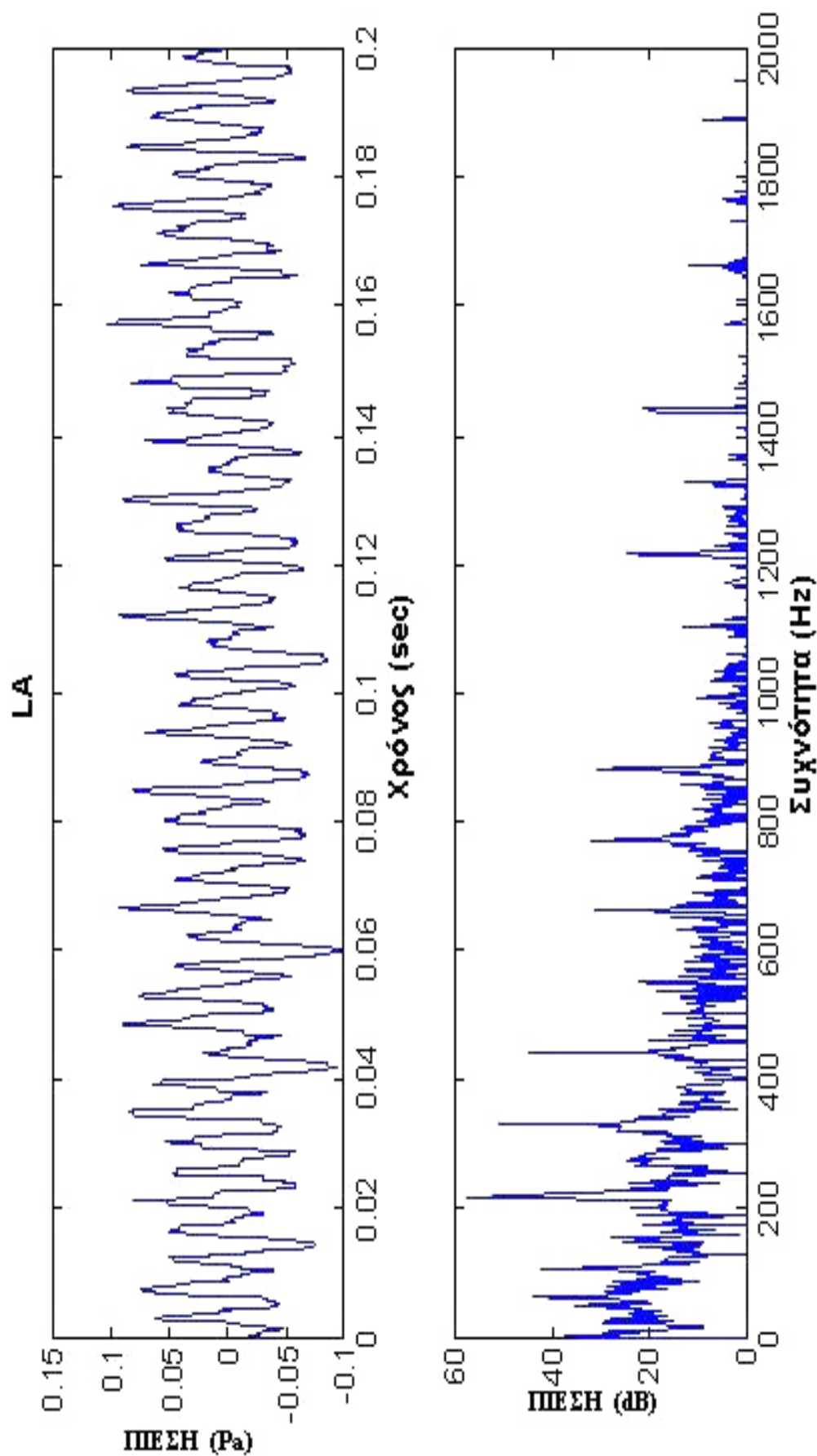
Σχήμα 49.

Κομματομορφή της χορδής Sol και αντίστοιχο φάσμα



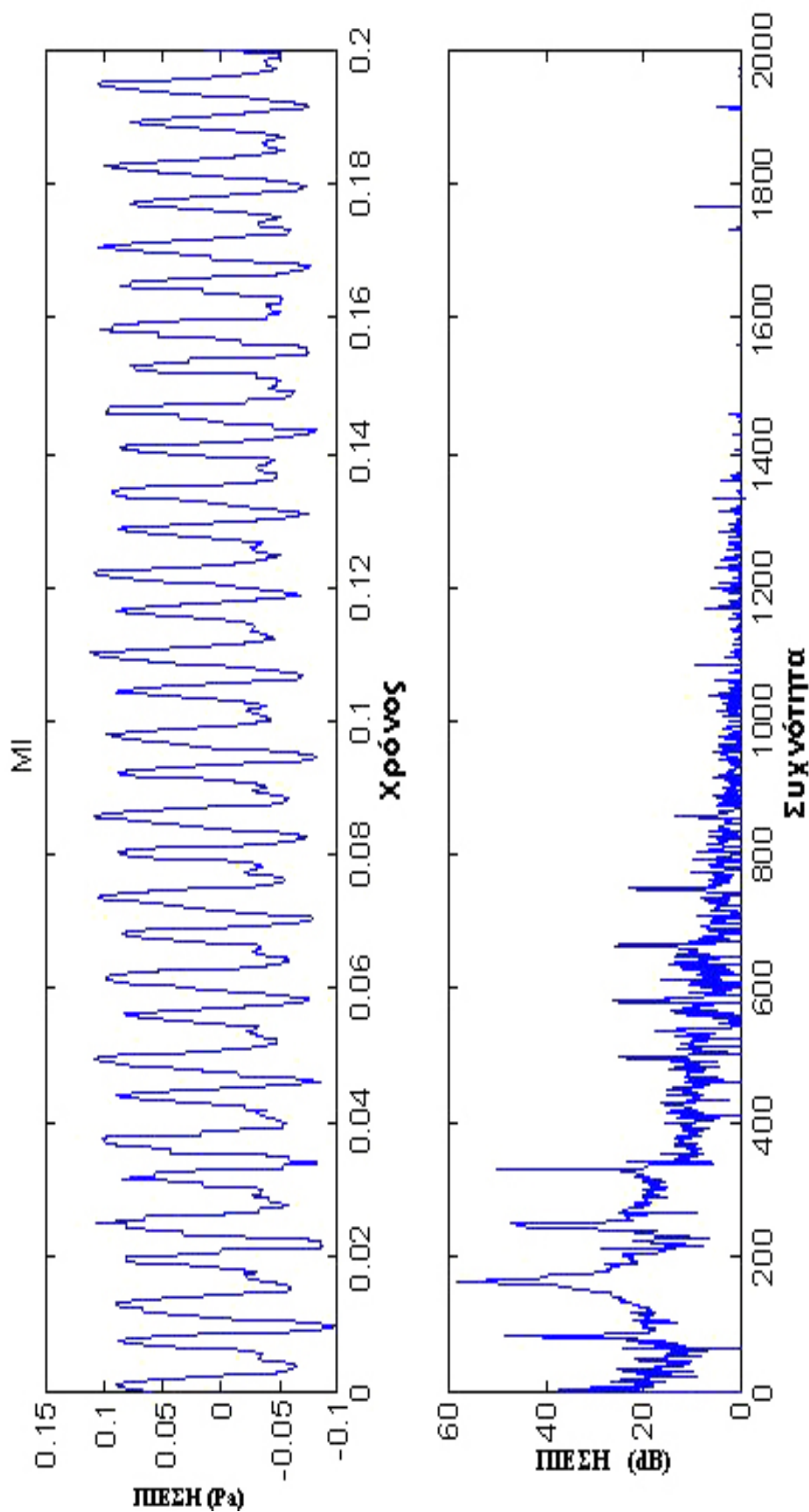
Σχήμα 5θ.

Κατατομική της χορδής Re na αντίστοιχο φάσμα



Σχήμα 51.

Κατατομική χορδής La και αντίστοιχο φάσμα

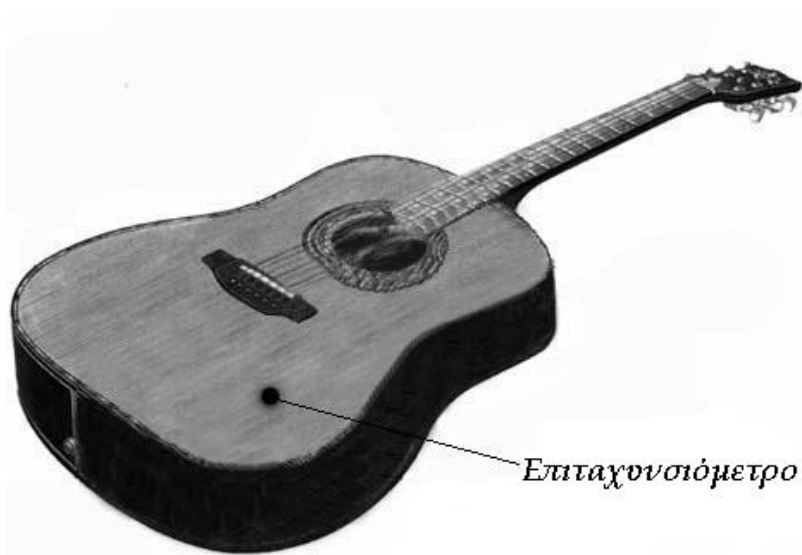


Σχήμα 52.

Κυματομορφή χορδής Mi και αντίστοιχο φάσμα

2. “Μέτρηση της Δόνησης”

Για να μετρήσουμε τη δόνηση που παράγεται στο σώμα της κιθάρας κατά την διέγερση της κάθε χορδής, ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία. Κατ’ αρχάς τοποθετούμε ένα επιταχυνσιόμετρο το οποίο λειτουργεί με πιεζοκρύσταλλο, το οποίο στερεώνουμε στο σημείο εκείνο του καπακιού που πραγματοποιεί σημαντική ταλάντωση κατά τη διέγερση της χορδής, έτσι ώστε να πάρουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα στις μετρήσεις μας. Γι αυτό λοιπόν επιλέξαμε να τοποθετήσουμε το επιταχυνσιόμετρο στο σημείο που φαίνεται στο σχήμα 47.



Σχήμα 53.

Θέση τοποθέτησης επιταχυνσιόμετρου για τη διεξαγωγή του πειράματος

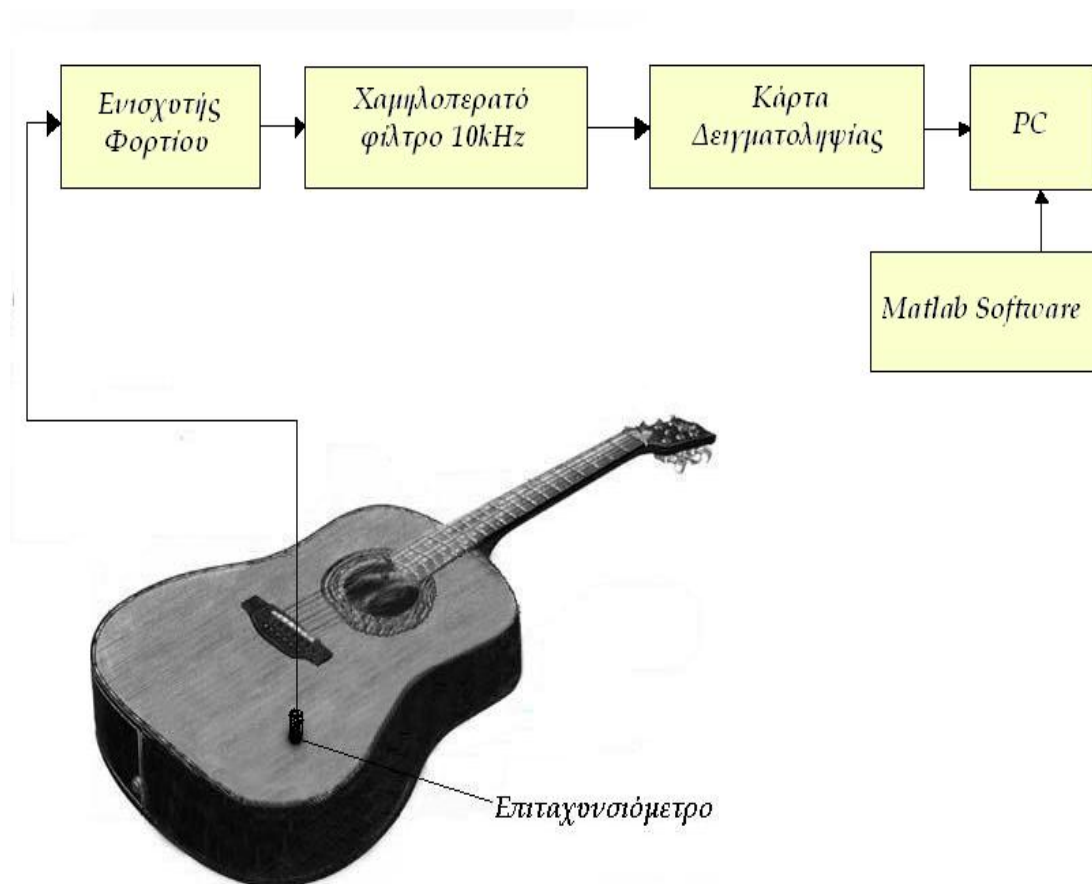
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιούμε αποτελείται από το επιταχυνσιόμετρο, το οποίο είναι συνδεδεμένο με έναν προενισχυτή μετρήσεων, στη συνέχεια συνδέουμε μια κάρτα δειγματοληψίας που στέλνει τα αποτελέσματα σε έναν υπολογιστή που τα αναλύει με το πρόγραμμα Matlab. Ο εξοπλισμός για την πραγματοποίηση των μετρήσεων είναι ο ακόλουθος.

- Επιταχυνσιόμετρο B&K 4121
- Προενισχυτής μετρήσεων B&K 2965
- Κάρτα δειγματοληψίας

- Software ανάλυσης matlab
- Χαμηλοπερατό φίλτρο Butterworth 10kHz

Πρέπει να σημειώσουμε ότι η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 46kHz όπου έχουμε ένα πλούσιο φάσμα ήχου.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



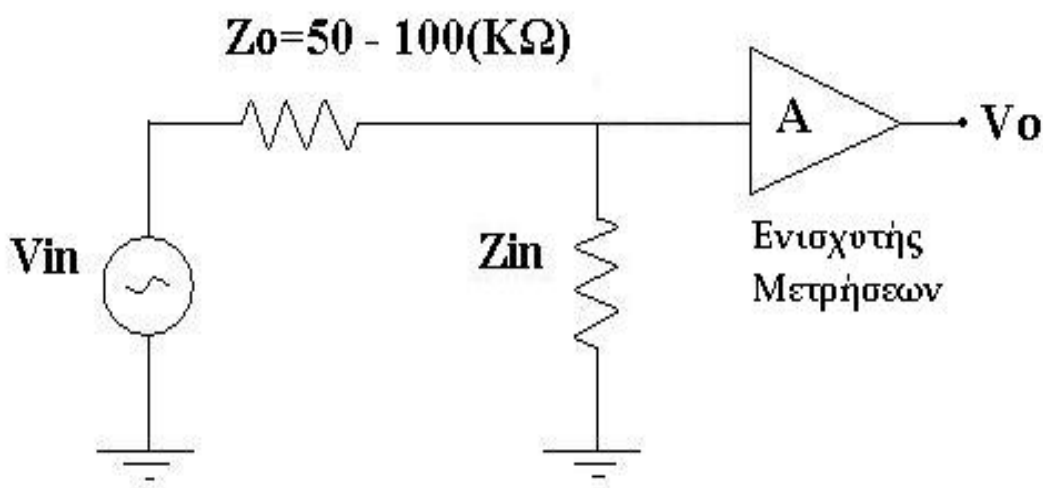
Σχήμα 54.

Πειραματική διάταξη δονητικής συμπεριφοράς

Η διαδικασία του πειράματος είναι η ίδια με του προηγούμενου πειράματος. Διεγείρουμε τις χορδές της κιθάρας μια - μια ασκώντας πάντα την ίδια δύναμη ώστε να διατηρούμε τις συνθήκες του πειράματος σταθερές όσο μπορούμε. Κατά τη διέγερση των χορδών δονείται η ηχητική πλάκα της κιθάρας και κατά συνέπεια ο

πιεζοκρύσταλλος, οπότε παράγει ένα ηλεκτρικό φορτίο. Το φορτίο αυτό ενισχύεται μέσω του ενισχυτή και οι μετρήσεις καταγράφονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή σαν κυματομορφή. Η επιλογή του μέγιστου εύρους μετρήσεων είναι 10kHz και η υψηλότερη νότα είναι η Mi cantini στα 248Hz. Έτσι λοιπόν μας δίνεται η δυνατότητα μέτρησης 40 αρμονικών, αν και στην πράξη η όλη ενέργεια της δόνησης κατανέμεται στους 4 με 5 πρώτους αρμονικούς. Αυτές οι κυματομορφές είναι γραφικές παραστάσεις του πλάτους ταλάντωσης συναρτήσει με το χρόνο (msec) και τη συχνότητα (Hz) και αναλύουμε τις αρμονικές τους κάθε φορά.

Για να πάρουμε μέγιστο σήμα από το αισθητήριο, δηλαδή το επιταχυνσιόμετρο, πρέπει να τοποθετήσουμε μια κατάλληλη αντίσταση στον ενισχυτή όπως φαίνεται στη διάταξη του παρακάτω σχήματος. Κάθε συσκευή έχει μια τυπική αντίσταση εξόδου, έστω $Z_{out}=100K\Omega$ και υποθέτουμε ότι παράγει ένα σήμα πλάτους 1mV.



Σχήμα 55.

Προσαρμογή αντίστασης για την επίτευξη μέγιστου σήματος στην έξοδο

Συγκεκριμένα για τη διάταξη του σχήματος, αν η αντίσταση εισόδου είναι $Z_{in}=100K\Omega$ τότε η είσοδος στον ενισχυτή που προκύπτει από το διαιρέτη τάσης είναι:

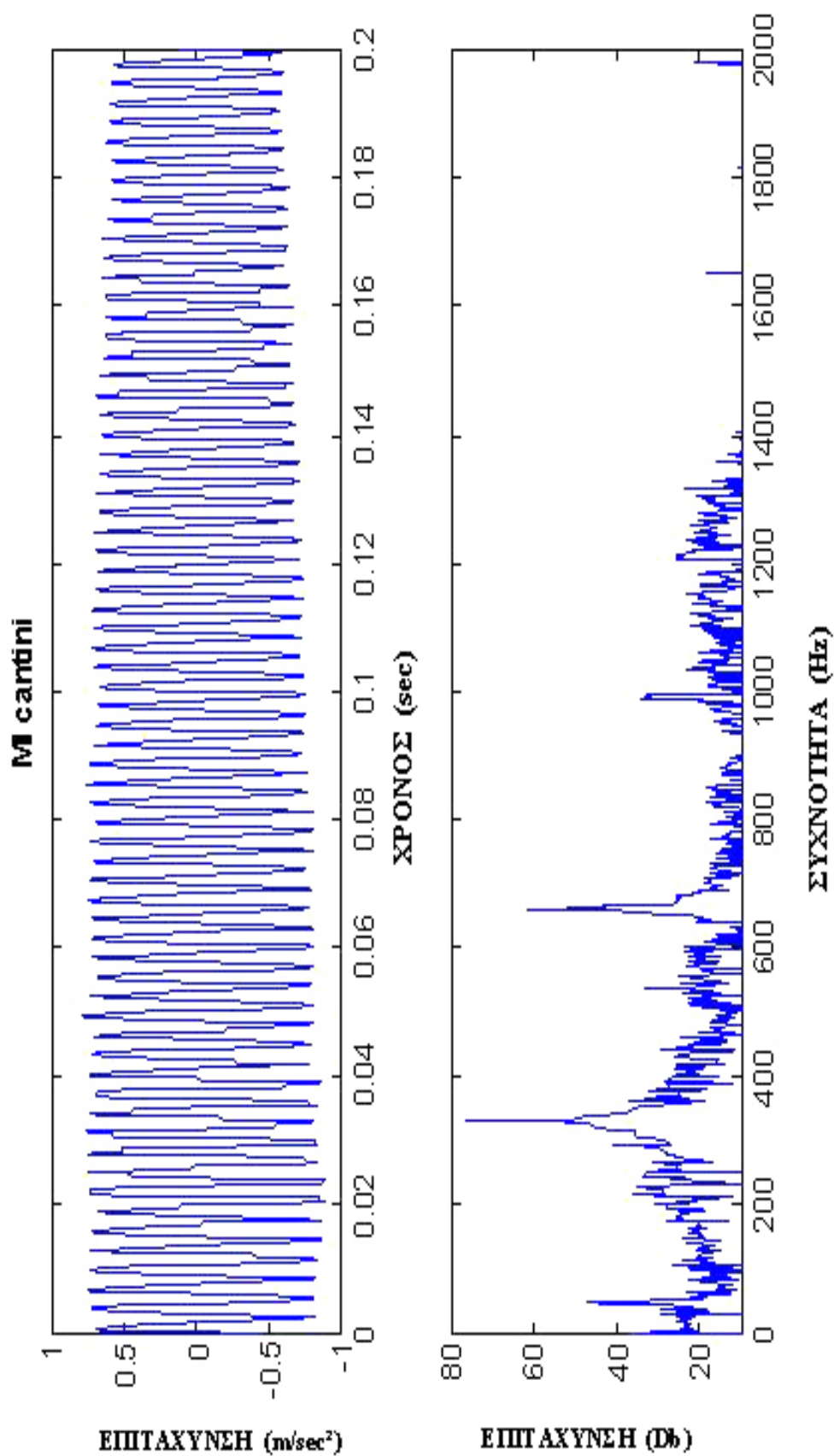
$$V_{out} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_o} V_{in}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές που είπαμε, έχουμε:

$$V_{out} = \frac{100\text{K}\Omega}{100\text{K}\Omega + 100\text{K}\Omega} \cdot 1\text{mV} = 0,5\text{mV}$$

Με αυτόν τον τρόπο δηλαδή χάνουμε το μισό σήμα. Οπότε για να έχουμε $V_{out} = V_{in}$ πρέπει η Z_{in} να είναι πολύ μεγαλύτερη της Z_{out} , τουλάχιστον 10 φορές και στην συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζουμε να ισχύει $Z_{in} > 1\text{M}\Omega$.

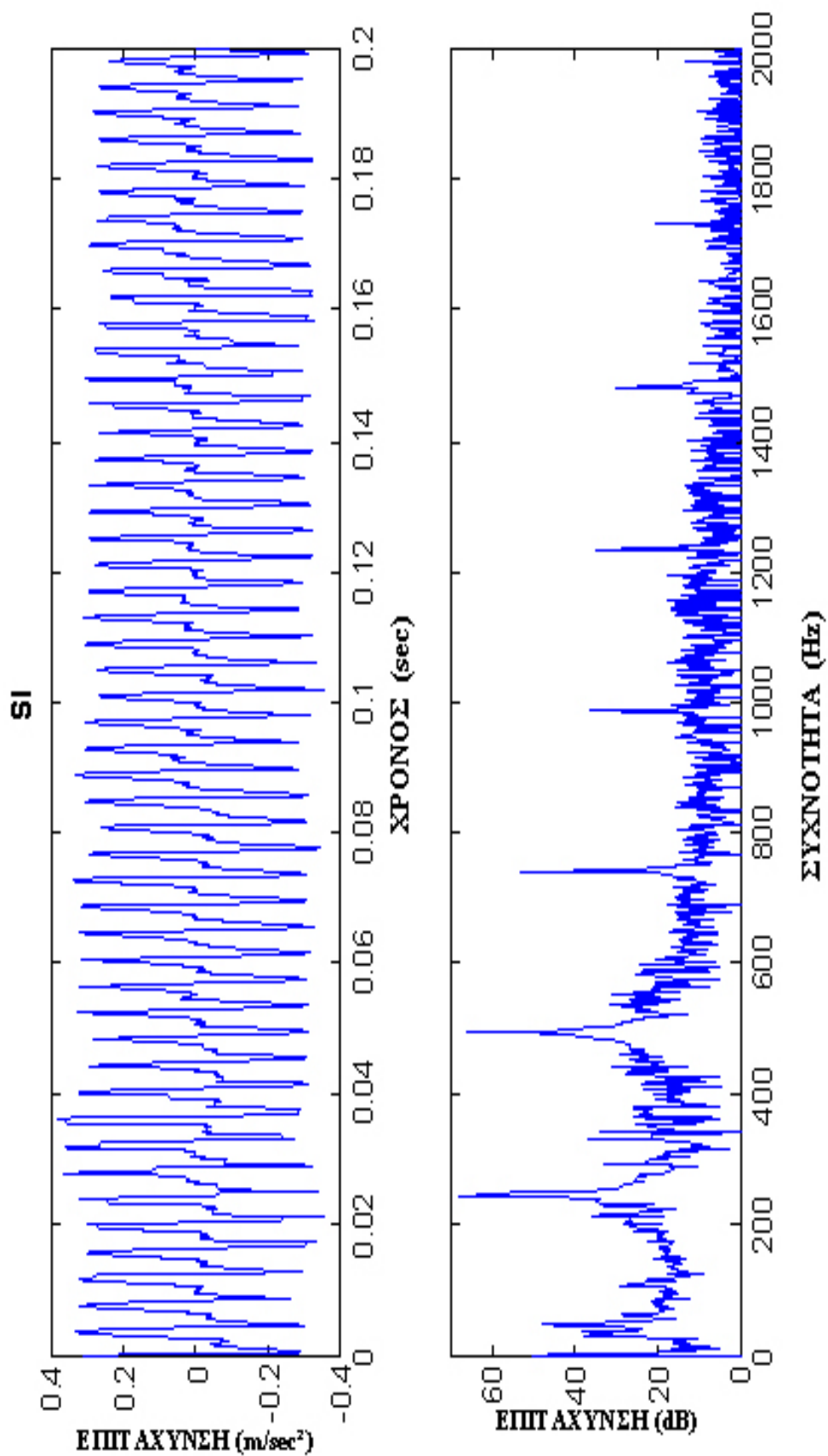
Τα φάσματα των αντίστοιχων χορδών προκύπτουν μέσω επεξεργασίας με software ανάλυσης Matlab και είναι τα ακόλουθα.



ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)

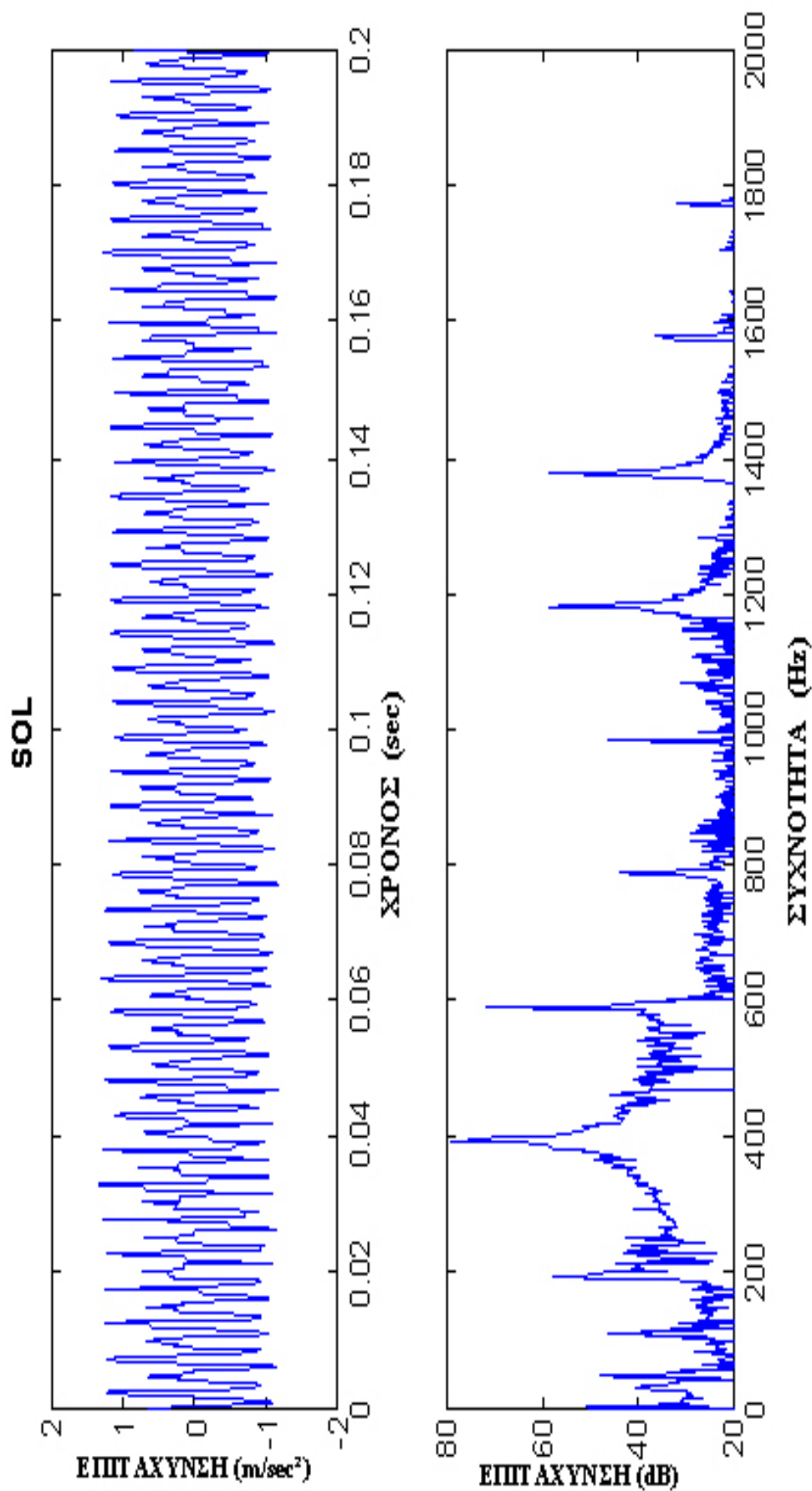
Σχήμα 56.

Κατατομογραφία της χορδής M cantini και αντίστοιχο φάσμα



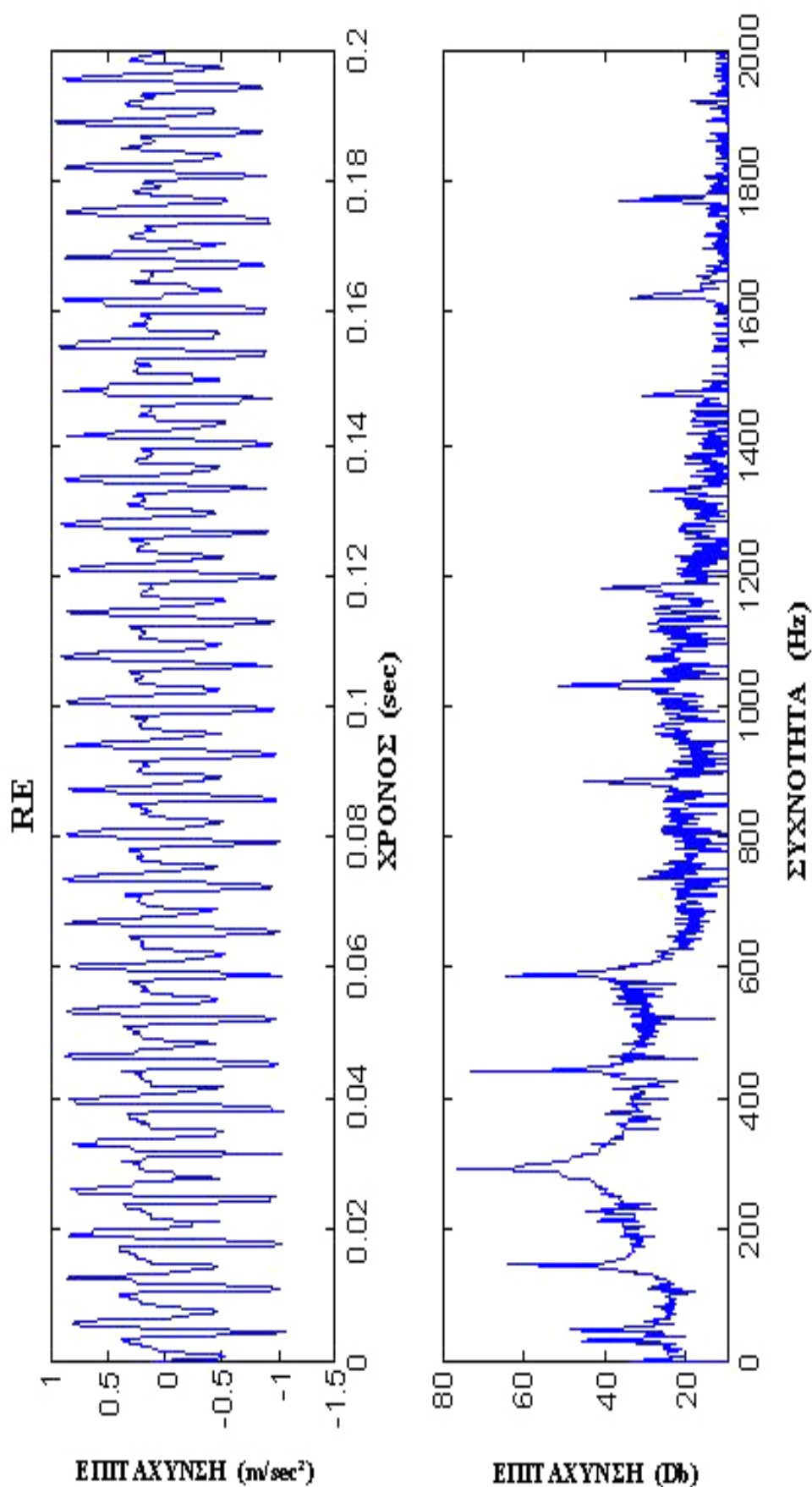
Σχήμα 57.

Κατατομογραφία της χορδής Si και αντίστοιχο φάσμα



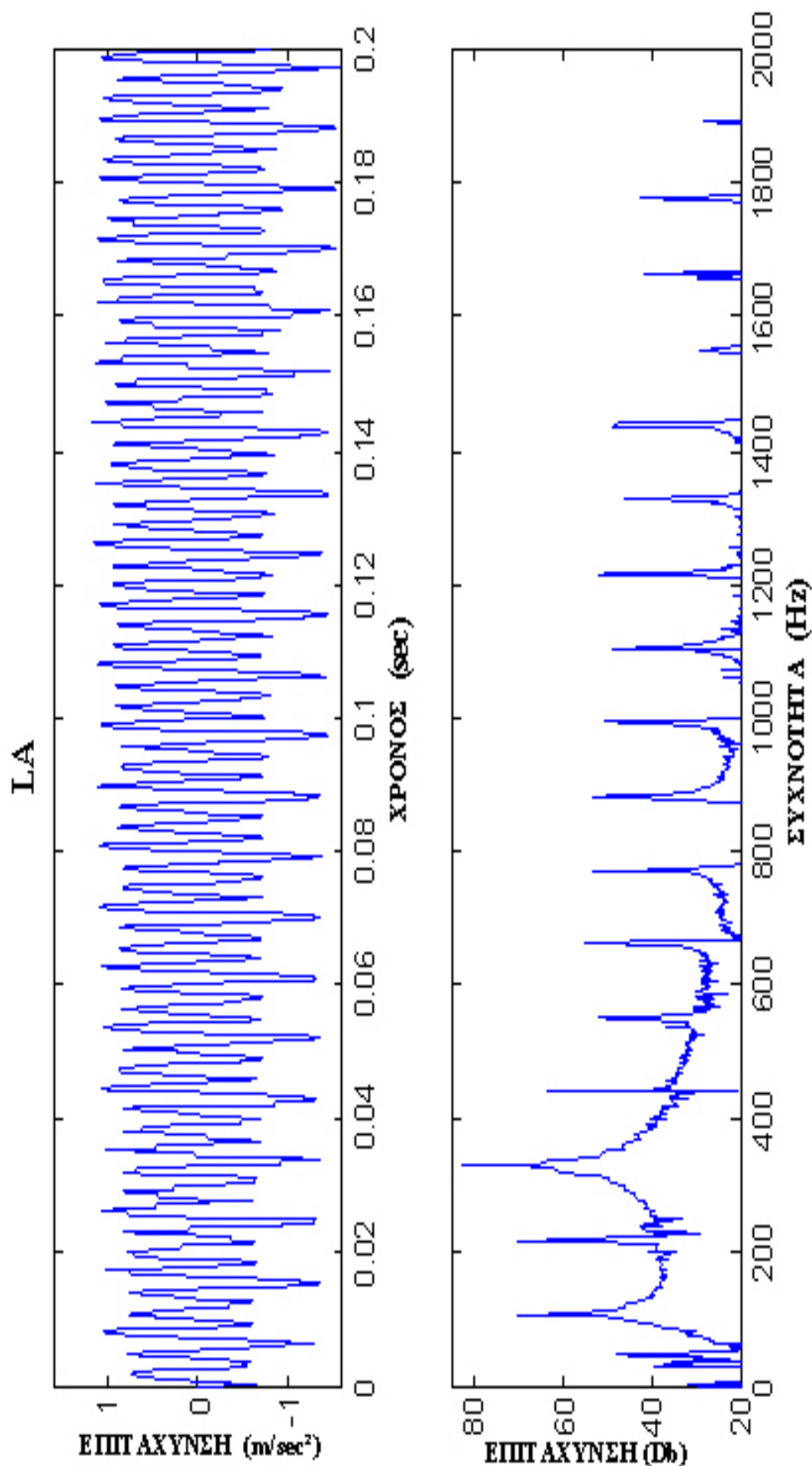
Σχήμα 58.

Κατατομογραφία της χορδής Sol και αντίστοιχο φάσμα



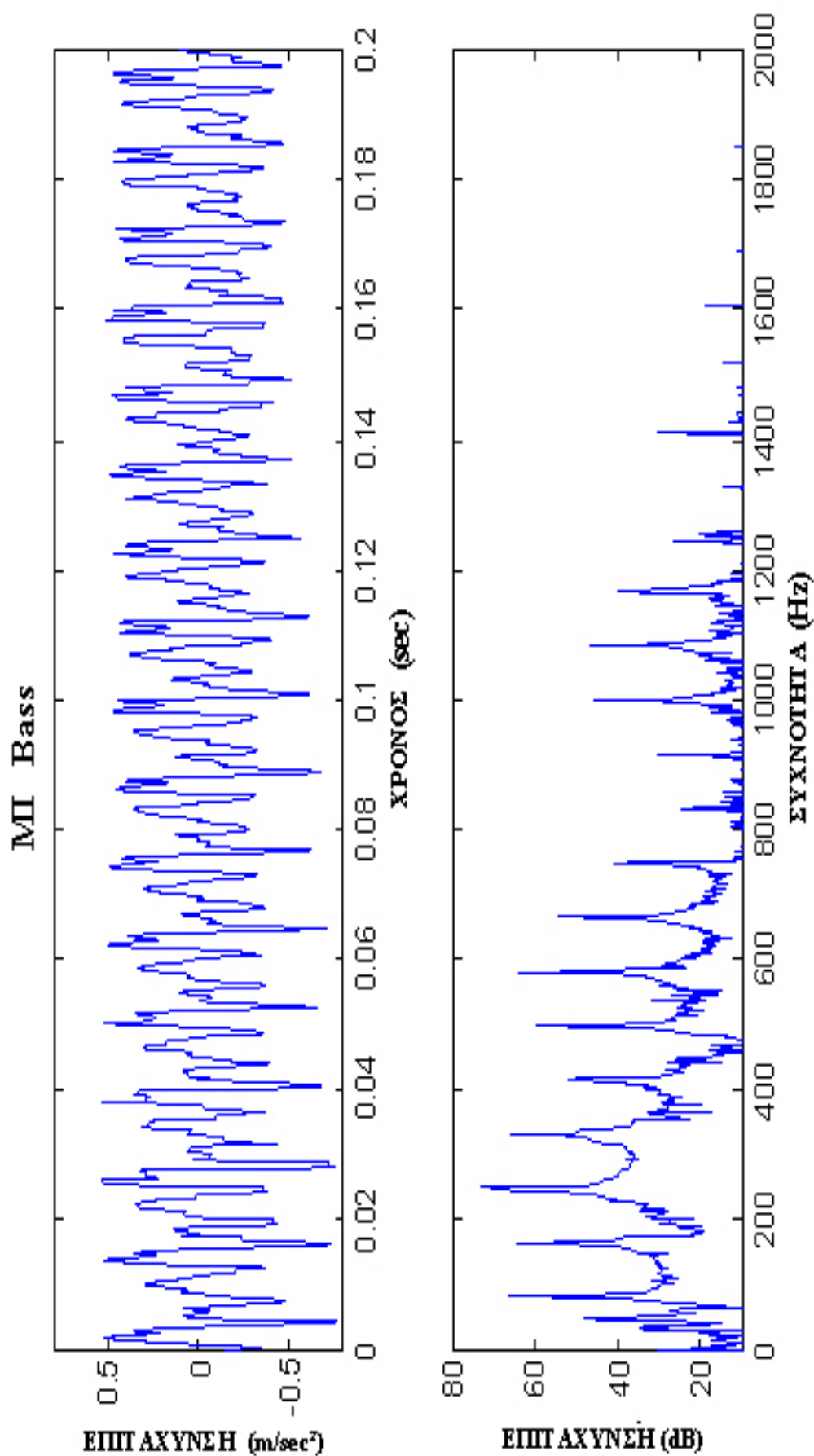
Σχήμα 59.

Καταμορφωτή χορδής Re και αντίστοιχο φάσμα



Σχήμα 6θ.

Κατατομωρή της χορδής La κα αντίστοιχο φάσμα



Σχήμα 61.
Κατατομωρή της χορδής Mi και αντίστοιχο φάσμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Αναλύοντας λοιπόν τις κυματομορφές της επιτάχυνσης και της πίεσης που προκαλούνται από τη δόνηση της ηχητικής πλάκας της κιθάρας, μπορούμε να παρατηρήσουμε την κατανομή και την ενέργεια των αρμονικών συχνοτήτων που παράγονται κατά τη διέγερση της κάθε χορδής. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε την κάθε νότα χωριστά ώστε να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δυο πειραμάτων και να δούμε τι διαφορά υπάρχει στον ήχο από την παραγωγή του, μέχρι να φτάσει τελικά στ' αφτιά μας. Αναλύοντας πρώτα τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων, μπορούμε να παραθέσουμε τα εξής για κάθε χορδή χωριστά.

1.α. “Αποτελέσματα Ακουστικών Μετρήσεων”

- **Χορδή: Mi Cantini**

Από το φάσμα των συχνοτήτων της χορδής Mi, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η περισσότερη ενέργεια κατανέμεται στον δεύτερο και τρίτο αρμονικό στα 40dB και 35dB αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες αρμονικές έχουν διαφορά 40dB κάτω σε σχέση με τη θεμελιώδη συχνότητα των 45dB περίπου, οπότε χάνονται στο θόρυβο και δεν γίνονται αντιληπτές από το αυτί. Παρατηρούμε επίσης ότι υπάρχουν αρκετές μη

αρμονικές συχνότητες. Έτσι λοιπόν το πραγματικό εύρος των συχνοτήτων εκτείνεται μέχρι τα 1000Hz.

- **Χορδή: Si**

Για τη χορδή Si παρατηρούμε κατ' αρχάς ότι το σήμα είναι περιοδικό σε σχέση με το χρόνο. Εδώ η ενέργεια μετατοπίζεται και σε αρμονικούς υψηλότερης τάξης και έχουμε συνολικά έξι αρμονικούς με ισχυρότερους τον δεύτερο και τρίτο από τα 50 dB, έως τον πέμπτο των 20dB. Έτσι λοιπόν το εύρος των συχνοτήτων εκτείνεται έως τα 1500Hz.

- **Χορδή: Sol**

Από τη γραφική παράσταση της πίεσης σε σχέση με το χρόνο, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ο ήχος είναι περιοδικός. Από τη γραφική παράσταση του φάσματος των συχνοτήτων, παρατηρούμε ότι ο δεύτερος αρμονικός έχει περισσότερη ενέργεια από τον πρώτο, ενώ στο σύνολό τους φτάνουν τους εννέα. Αν και ο πέμπτος είναι ιδιαίτερα εξασθενημένος που θεωρείται σχεδόν αμελητέος σε ένταση, ο όγδοος είναι αρκετά ισχυρός. Η μέγιστη πίεση που ασκείται είναι περίπου 50dB και το εύρος των συχνοτήτων εκτείνεται έως τα 1800Hz.

- **Χορδή: Re**

Για τη χορδή Re παρατηρούμε ότι ο δεύτερος αρμονικός είναι σημαντικά πιο ισχυρός από τους υπόλοιπους και φτάνει τα 60dB, ενώ στο σύνολο έχουμε δώδεκα αρμονικούς με ισοκατανομή της ενέργειας στους ανώτερους. Βλέπουμε λοιπόν το εύρος των συχνοτήτων εκτείνεται έως τα 1800Hz.

- **Χορδή: La**

Στη χορδή La παρατηρούμε σχετικά με την ενέργεια των αρμονικών ότι ο δεύτερος, τρίτος και τέταρτος είναι πιο ισχυροί από τον θεμελιώδη. Έτσι ο δεύτερος αρμονικός των 60dB περίπου, είναι σχεδόν 20dB πάνω από τον θεμελιώδη των 40dB. Βλέπουμε επίσης ότι φτάνουμε μέχρι τον 17^ο αρμονικό των 1900Hz ενώ υπάρχουν και αρκετές υποαρμονικές συχνότητες μέχρι τα 1000Hz.

- **Χορδή: Mi bass**

Από την κυματομορφή της πίεσης σε σχέση με τη συχνότητα για τη χορδή Mi, παρατηρούμε ότι ο ήχος είναι περιοδικός. Από το φάσμα των συχνοτήτων βλέπουμε ότι υπερिσχύουν οι πρώτοι τέσσερις αρμονικοί, ενώ οι υπόλοιποι είναι αρκετά κάτω. Η μέγιστη πίεση ασκείται από τον δεύτερο αρμονικό και είναι περίπου 60dB ενώ οι υπόλοιποι εκτείνονται μέχρι τον ένατο στα 742Hz. Οι υπόλοιποι είναι αρκετά ασθενείς ώστε να χάνονται στο θόρυβο.

1.β. Παρατηρήσεις

Κάποιες γενικές παρατηρήσεις που μπορούμε να κάνουμε, αφορούν την ενέργεια των αρμονικών και την έκτασή τους στο εύρος των συχνοτήτων. Αρχίζοντας από τη χορδή Mi cantini, παρατηρούμε ότι η μέγιστη πίεση που ασκείται είναι 40dB και οι αρμονικοί έχουν ισχύ μέχρι τον τέταρτο στα 1000Hz. Καθώς προχωρούμε σε πιο μπάσες χορδές αυξάνει η πίεση σε dB των αρμονικών και κατά συνέπεια η ισχύς των ανώτερων αρμονικών, ώστε να φτάσουμε στη χορδή La να γίνεται αντιληπτός ο 17^{ος} αρμονικός στα 1900Hz. Επίσης μπορούμε να σημειώσουμε ότι οι υποαρμονικές και μη αρμονικές συχνότητες είναι περισσότερες και πιο ευδιάκριτες στις πιο πρώτες χορδές. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μπάσες χορδές έχουν πιο ζεστό, ογκώδη και συγκεκριμένο ήχο.

2.α. “ Αποτελέσματα δονητικών μετρήσεων”

- **Χορδή: Mi cantini**

Για τη χορδή Mi cantini παρατηρούμε κατ' αρχάς ότι το σήμα της επιτάχυνσης σε σχέση με το χρόνο είναι περιοδικό με κάποια σταδιακή απόσβεση η οποία αρχίζει να γίνεται αισθητή στα 0.1sec. Όσον αφορά τώρα την επιτάχυνση σε σχέση με τη συχνότητα βλέπουμε ότι μοιάζει αρκετά με την αντίστοιχη των ακουστικών μετρήσεων, δηλαδή η περισσότερη ενέργεια περιέχεται στον δεύτερο αρμονικό, με τη διαφορά όμως ότι είναι κατά πολύ πιο ισχυρός από τον πρώτο και πλησιάζει τα 80dB.

Όπως και στις ακουστικές μετρήσεις φτάνουμε μέχρι τα 1000Hz και έχουμε πολλές μη αρμονικές συχνότητες.

- **Χορδή: Si**

Και για τη χορδή Si βλέπουμε περίπου τα ίδια αποτελέσματα στα αποτελέσματα των μετρήσεων, με τη διαφορά ότι έχουμε περισσότερους υψηλούς αρμονικούς. Ο δεύτερος αρμονικός είναι και ο πιο ισχυρός, αλλά φτάνει σχεδόν τα 70dB ενώ στο ακουστικό πείραμα έφτανε τα 50dB και ο τελευταίος αρμονικός είναι ο όγδοος στα 1800Hz.

- **Χορδή: Sol**

Κι εδώ έχουμε πολλές ομοιότητες, δηλαδή η περισσότερη ενέργεια συσσωρεύεται στον δεύτερο αρμονικό, μόνο που είναι κατά 20dB ισχυρότερος του αντίστοιχου στην ακουστική μέτρηση. Και εδώ έχουμε αρμονικούς μέχρι τα 1800Hz, αλλά έχουμε σημαντική ενέργεια στους αρμονικούς άνω του πέμπτου, σε αντίθεση με τις ακουστικές μετρήσεις που ήταν ασθενέστεροι.

- **Χορδή: Re**

Εδώ παρατηρούμε σημαντικές διαφορές στην ενέργεια των τεσσάρων πρώτων αρμονικών, οι οποίοι είναι κατά πολύ πιο ισχυροί από τους υπόλοιπους, αλλά και τους αντίστοιχους των ακουστικών μετρήσεων. Το πλήθος των αρμονικών παρόλα αυτά είναι το ίδιο και στα δυο πειράματα και εκτείνεται μέχρι τα 1800Hz.

- **Χορδή: La**

Για τη χορδή La παρατηρούμε ότι η επιτάχυνση σε σχέση με το χρόνο είναι μια περιοδική κυματομορφή. Στο φάσμα των συχνοτήτων τώρα, παρατηρούμε ότι ο τρίτος αρμονικός είναι πολύ ισχυρός, ενώ έχουμε απώλειες στους μεσαίους και υψηλότερους αρμονικούς. Στο πλήθος τους οι αρμονικοί είναι ίδιοι με εκείνους των ακουστικών μετρήσεων και εκτείνονται μέχρι τα 1900Hz.

- **Χορδή: Mi bass**

Τέλος για τη χορδή Mi παρατηρούμε ότι οι αρμονικοί έχουν μεγάλη ενέργεια μέχρι και τον ένατο σε αντίθεση με τις ακουστικές μετρήσεις που περιοριζόταν μέχρι

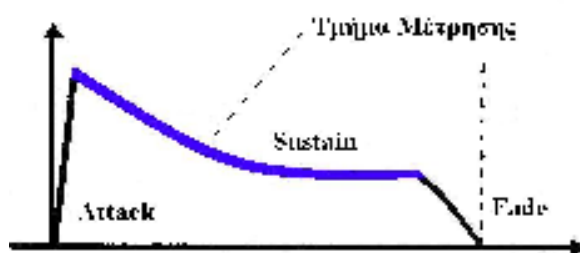
τον τέταρτο. Οι αρκετά ισχυροί αρμονικοί ώστε να γίνονται αντιληπτοί φτάνουν μέχρι τα 1400Hz, ενώ στις ακουστικές μετρήσεις δεν ξεπερνούσαν τα 800Hz.

2.β. Παρατηρήσεις

Με το πείραμα των δονητικών μετρήσεων παρατηρούμε ότι οι αρμονικοί είναι ισχυρότεροι σε ενέργεια, αφού φτάνουν τα 80dB. Επίσης οι διαφορές με τις ακουστικές μετρήσεις γίνονται μεγαλύτερες καθώς περνάμε στις πιο μπάσες χορδές, όπου έχουν περισσότερη ενέργεια και οι αρμονικοί μεσαίων και μεγαλύτερων τάξεων. Τέλος πρέπει να πούμε πως όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι διαφορές μεταξύ της πίεσης και της δόνησης, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες στο ξύλο της κιθάρας.

3. “Γενικές παρατηρήσεις”

Μια γενική παρατήρηση είναι ότι η μέση τιμή των δειγμάτων της πίεσης που ασκείται δεν είναι μηδέν (0) όπως θα έπρεπε, αλλά αυτό συμβαίνει επειδή μετράμε ένα τμήμα της κυματομορφής, αυτό που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 46.



Σχήμα 62.

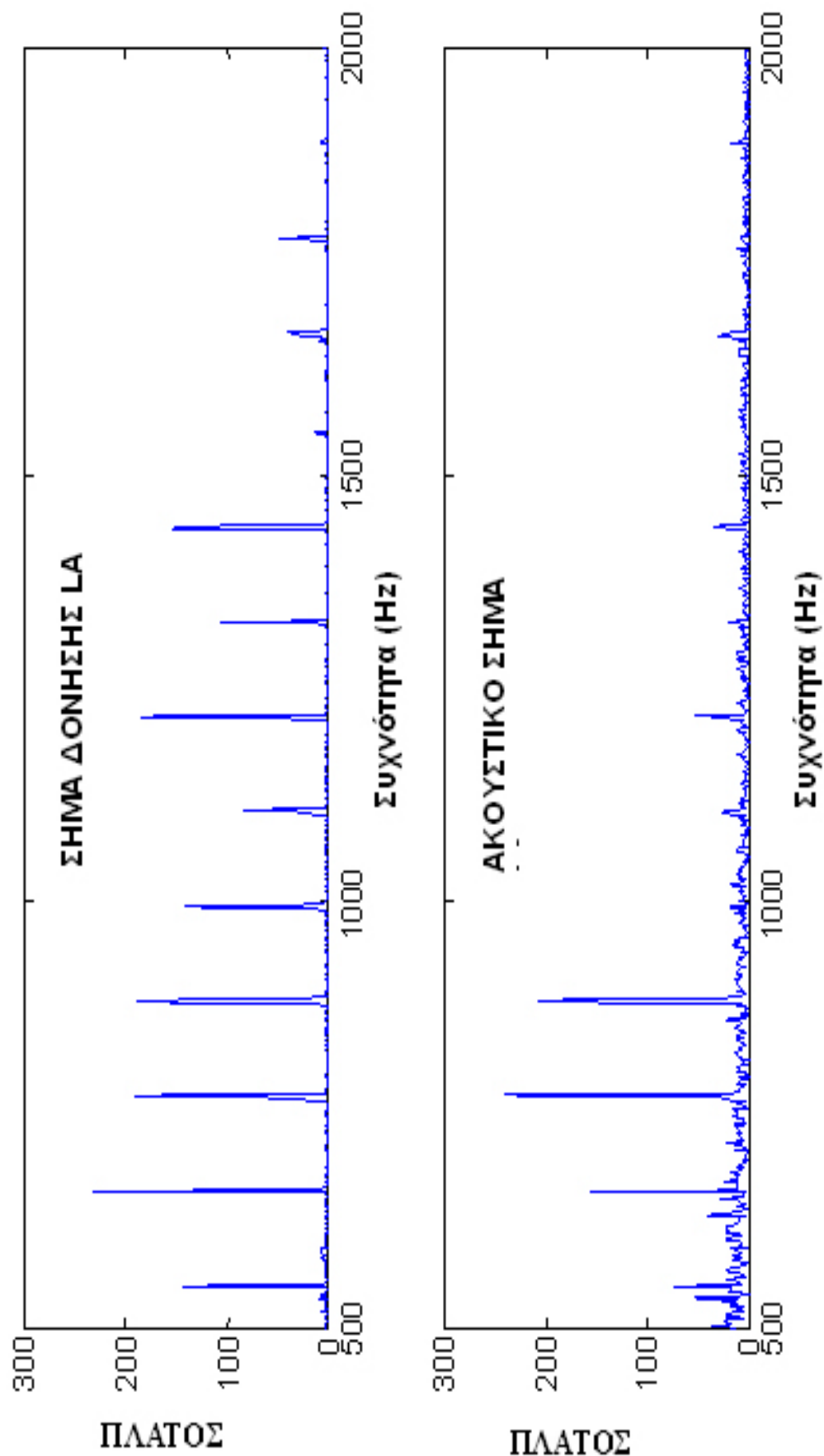
Τμήμα μέτρησης κυματομορφής του δείγματος πίεσης

Έτσι λοιπόν καταγράφονται πάλι οι κυματομορφές που θέλουμε με το αρμονικό φάσμα των συχνοτήτων και συγκρίνοντάς τες με τις αντίστοιχες μετρήσεις των δονητικών μετρήσεων μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την πραγματική

υπόσταση του ήχου και το πώς φτάνει τελικά στ' αυτιά μας. Πρέπει όμως να πούμε πως στο αποτέλεσμα που παίρνουμε σαν γραφική παράσταση στο τέλος του πειράματος, εκτός από την κατασκευαστική ποιότητα του σώματος της κιθάρας που παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση των συχνοτήτων, σημαντική είναι και η ποιότητα των χορδών.

4. “Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη χορδή La”

Για να γίνουν πιο κατανοητά τα αποτελέσματα των δυο πειραμάτων, συγκρίνουμε μεμονωμένα το ακουστικό με το σήμα δόνησης της χορδής La από το παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το σήμα δόνησης περιέχει πολύ περισσότερους αρμονικούς οι οποίοι εκτείνονται μέχρι τα 1500Hz σε σχέση με το ακουστικό σήμα που οι αρμονικοί του δεν φτάνουν τα 1000Hz. Όσον αφορά το πλάτος τους τώρα, είναι το ίδιο και για τα δυο πειράματα για τους πιο ισχυρούς ενεργειακά αρμονικούς, ενώ οι υπόλοιποι έχουν σημαντικές διαφορές. Ο λόγος που υπάρχουν αυτές οι διαφορές στην ακουστική από τη δονητική μέτρηση, οφείλεται στις απώλειες που έχουμε κατά τη μετάδοση του κύματος στο ξύλο. Έτσι ώστε ενώ το επιταχυνσιόμετρο μετράει το κύμα ταλάντωσης της ηχητικής πλάκας της κιθάρας, αυτό το ίδιο κύμα δεν είναι δυνατόν να γίνει αντιληπτό από το μικρόφωνο εφ' όσον πολλές από τις αρμονικές συχνότητες του κύματος απορροφώνται από το σώμα της κιθάρας. Μπορούμε λοιπόν γενικεύοντας το συμπέρασμα, να πούμε ότι εφόσον η λειτουργία του αφτιού μας είναι πιο κοντά στη λειτουργία του μικροφώνου, δεν αντιλαμβανόμαστε ούτε κι εμείς την πραγματική φύση του κύματος ταλάντωσης, αλλά το ακούμε κατά προσέγγιση.



Σχήμα 63.

Σύγκριση των φασμαμάτων των κατεχομορφώνδονησης και πίεσης για τη χορδή La (110Hz)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λουκάς Χαδέλης : “*Τεχνολογία της Μουσικής*”
2. Χαράλαμπος Σπυρίδης: “*Η Φυσική της Μουσικής*”
3. Σπύρος Λουτρίδης : “*Τεχνολογία Μετρήσεων*”, Τ.Ε.Ι Λάρισας, 2000

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις στο Internet

1. science@unsw. The university of New South Wales·Sydney·Australia
 - Helmholtz resonance
 - How harmonics are harmonics
 - Research in guitar acoustics
 - What is a decibel
 - What is a sound spectrum
 - Strings, standing waves and harmonics
 - Chladni patterns of guitar plates
2. www.sospubs.co.uk Hi-Tech Music Recording Magazine
 - Choosing a microphone. Microphone types & Uses
3. www.digitalrecordings.com