



Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης

2026

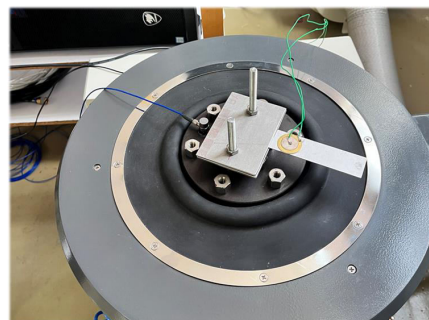
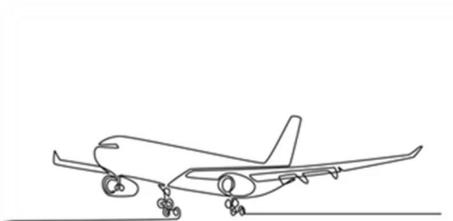
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΜΙΣΤΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΠΛΟΪΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΜΙΣΤΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΠΛΟΪΑ

Νυσταζάκης Αντώνιος (AM 2020010138)

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Παναγιώτης Αλευράς

Χανιά, Ιούλιος 2026



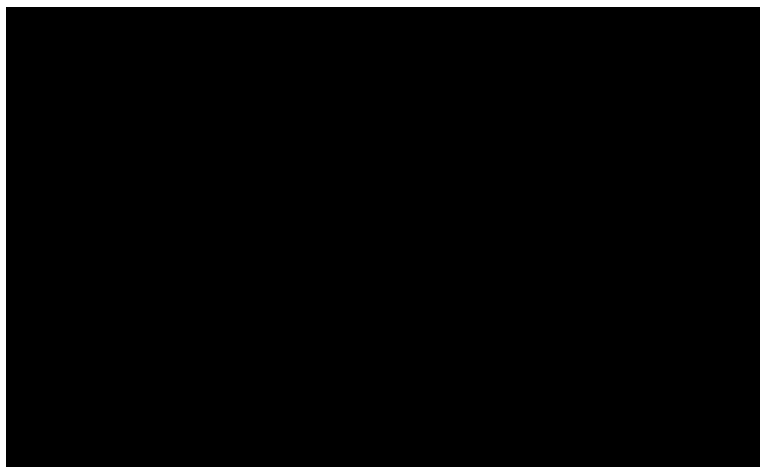
<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ



Θόρυβος αεροδρομίων ανω των
100dB



Η ενέργεια αυτή σήμερα
χάνεται



Αξιοποίηση με συγκομιστή
ακουστικής ενέργειας

2026

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΜΙΣΤΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΠΛΟΪΑ



<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ



- Acoustic Energy Harvesting
- Μέθοδοι συγκομιδής ακουστικής ενέργειας
 - Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο
- Σχεδιασμός συγκομιστή ακουστικής ενέργειας
 - Προσομοίωση στο λογισμικό ANSYS
- Κατασκευή συγκομιστή ακουστικής ενέργειας
 - Πειραματικές μετρήσεις εργαστηρίου
- Μετρήσεις σε περιβάλλον αεροδρομίου
 - Συμπεράσματα
 - Προτάσεις για μελλοντική έρευνα
 - Ερωτήσεις



ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Acoustic Energy Harvesting

Η συγκομιδή της
ακουστικής ενέργειας
του περιβάλλοντος και
μετασχηματισμός σε
ηλεκτρική ενέργεια μέσω
της κατασκευής ενός
συγκομιστή ακουστικής
ενέργειας

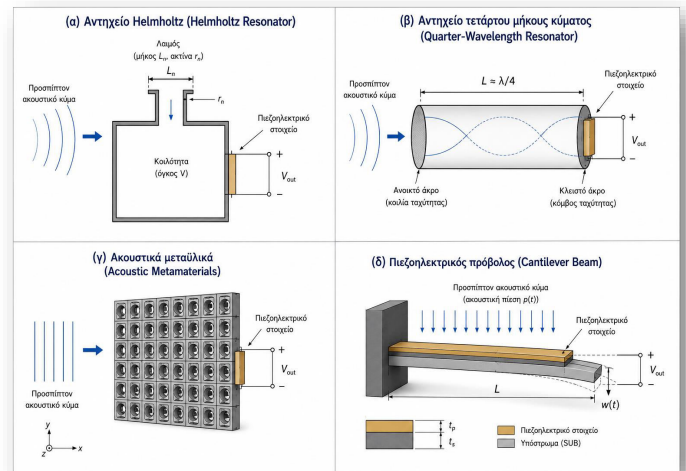


<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Συγκομιστές
με αντηχείο
HelmholtzΣυγκομιστές
με αντηχείο
τετάρτου
μήκους
κύματοςΣυγκομιστές
βασισμένοι
σε ακουστικά
μεταλλικάΣυγκομιστές
ενέργειας
βασισμένοι σε
πιεζοηλεκτρικό
πρόβολο

Αποτελείται από:

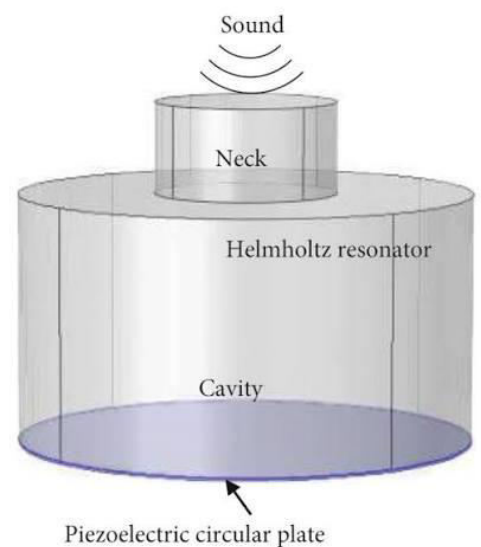
- Αντηχείο Helmholtz
- Πιεζοηλεκτρικό ή ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο

Πλεονεκτήματα

- Ενίσχυση της ηχητικής πίεσης σε μία συγκεκριμένη συχνότητα
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση

Μειονεκτήματα

- Στενό εύρος συχνοτήτων λειτουργίας



Συγκομιστές με αντηχείο τετάρτου μήκους κύματος

Αποτελείται από:

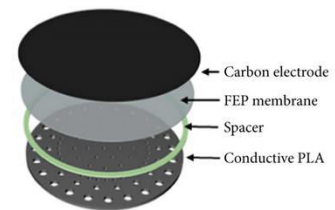
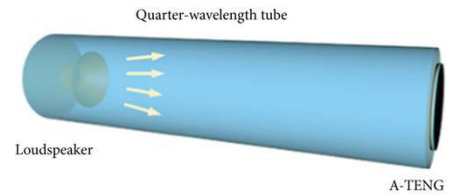
- έναν σωλήνα κλειστό στο ένα άκρο και ανοικτό στο άλλο
- Μετατροπέας ενέργειας (συνήθως πιεζοηλεκτρικού τύπου)

Πλεονεκτήματα

- Μεγαλύτερη αποδοτικότητα στις χαμηλές συχνότητες

Μειονεκτήματα

- Απαιτούν σχετικά μεγάλες γεωμετρικές διαστάσεις



Quarter-Wavelength Resonator

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Συγκομιστές βασισμένοι σε ακουστικά μεταϋλικά

Τα ακουστικά μεταϋλικά:

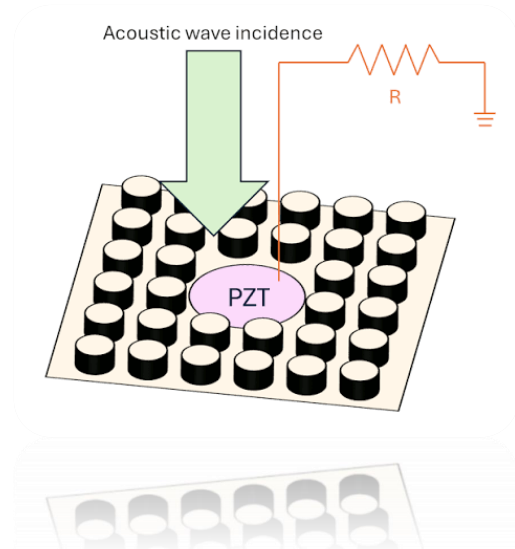
- ελέγχουν και κατευθύνουν τη διάδοση ηχητικών κυμάτων
- συγκεντρώνουν και εγκλωβίζουν την ηχητική ενέργεια σε πολύ μικρούς όγκους

→ αυξάνουν σημαντικά την τοπική ηχητική πίεση

→ παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ

Πλεονεκτήματα

- μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό
- περισσότερες από μία συχνότητες συντονισμού



Acoustic Metamaterials

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Συγκομιστές ενέργειας βασισμένοι σε πιεζοηλεκτρικό πρόβολο

Αποτελείται από:

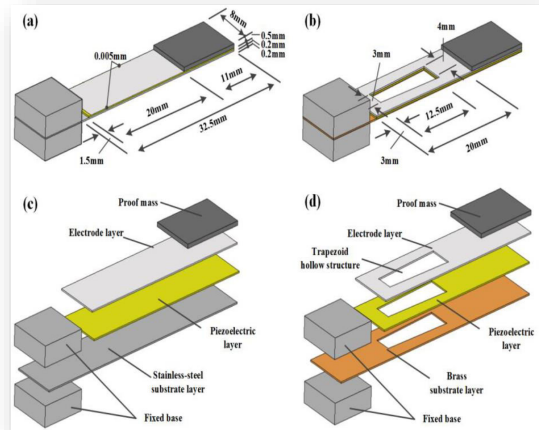
- πρόβολο (cantilever beam) πακτωμένος στο ένα άκρο και ελεύθερος στο άλλο
- πιεζοηλεκτρικό υλικό

Πλεονεκτήματα

- απλή κατασκευή
- χαμηλό κόστος
- υψηλή απόδοση στην εκμετάλλευση δονήσεων χαμηλών συχνοτήτων

Μειονεκτήματα

- Περιορισμένο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας
- Μειωμένη αποδοτικότητα σε περιοχές διέγερσης εκτός συχνότητας συντονισμού



- Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες μεθόδους μετατροπής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και το αντίστροφο

Άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

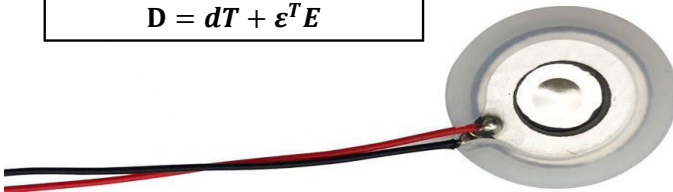
- παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου από μηχανική τάση

$$D = dT + \epsilon^T E$$

Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

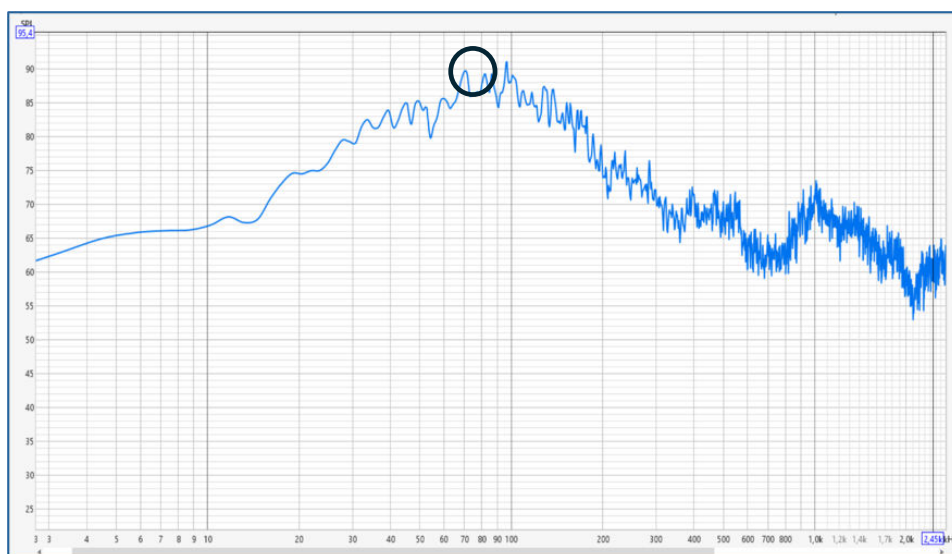
- παραμόρφωση λόγω ηλεκτρικού πεδίου

$$S = s^E T + d^t E$$





ROOM EQ WIZARD:



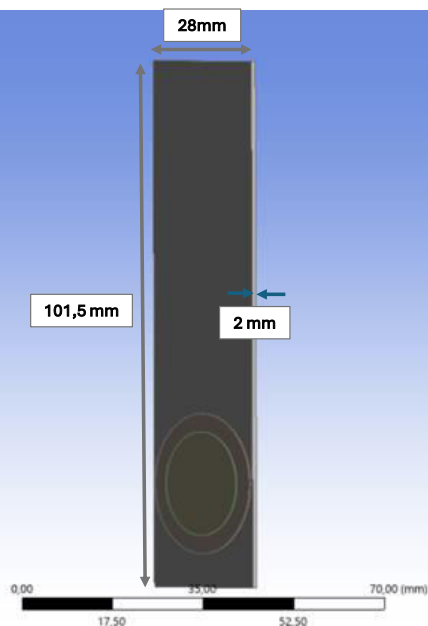
Εύρεση συχνότητας στόχου (target frequency)

Λήψη μετρήσεων θορύβου στο αεροδρόμιο
Ανάλυση μετρήσεων στο λογισμικό Room
EQ Wizard
Εύρεση συχνότητας με μεγαλύτερη ένταση

TARGET FREQUENCY=70 Hz

Επιλογή γεωμετρίας και υλικών
κατασκευής

Επιλογή γεωμετρίας και υλικών κατασκευής



Εύρεση συχνότητας στόχου (target frequency)

Λήψη μετρήσεων θορύβου στο αεροδρόμιο
Ανάλυση μετρήσεων στο λογισμικό Room EQ Wizard
Εύρεση συχνότητας με μεγαλύτερη ένταση

Προσομοίωση στο Ansys

Coupled Field Modal Analysis
Coupled Field Harmonic Analysis

Επιλογή γεωμετρίας και υλικών κατασκευής

Σχεδίαση προβόλου στο λογισμικό Ansys



Προσομοίωση στο λογισμικό Ansys

<http://www.m3.tuc.gr>



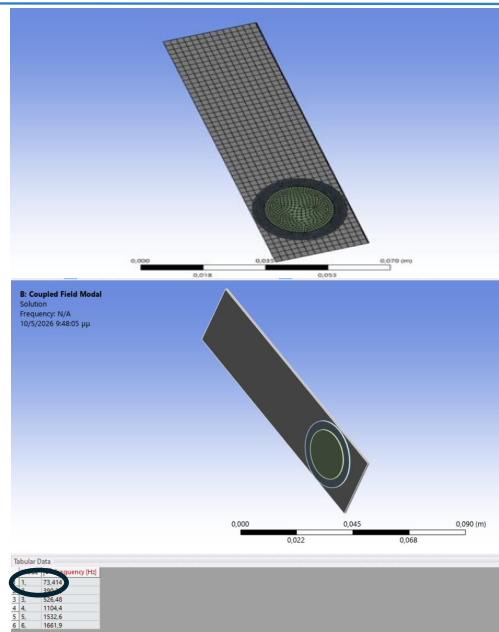
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

- Meshing: δημιουργία πλέγματος
- Ορισμός:
 - Fixed Support: βάση του beam-σημείο πάκτωσης
 - Voltage coupling: επάνω επιφάνεια πιεζοηλεκτρικού
 - Voltage(Ground): κάτω επιφάνεια πιεζοηλεκτρικού-σημείο επαφής με beam
- Coupled Field Modal Analysis



Συχνότητα πρώτης ιδιομορφής 73 Hz



Προσομοίωση στο λογισμικό Ansys

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

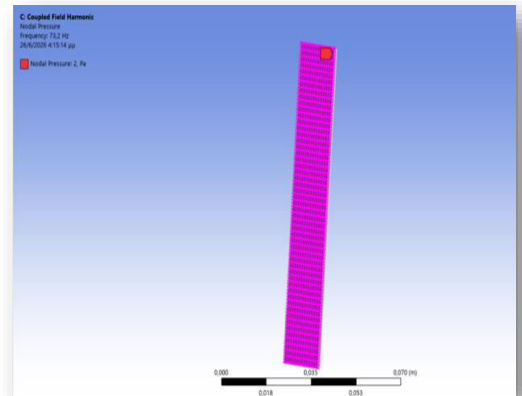
ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Coupled Field Harmonic Analysis

- ❖ Εφαρμογή ακουστικού φορτίου (Sound Pressure Level → Pa)

$$P = P_0 \cdot 10^{\frac{SPL}{20}}$$

Επίπεδο θορύβου (db)	Ηχητική πίεση (Pa)
70	0,0632
80	0,2
90	0,6324
100	2



- ❖ Προσομοίωση πίεσης που μετατρέπεται σε παραμόρφωση
- ❖ Υπολογισμός ηλεκτρικής τάσης στο πιεζοηλεκτρικό



Προσομοίωση στο λογισμικό Ansys

<http://www.m3.tuc.gr>

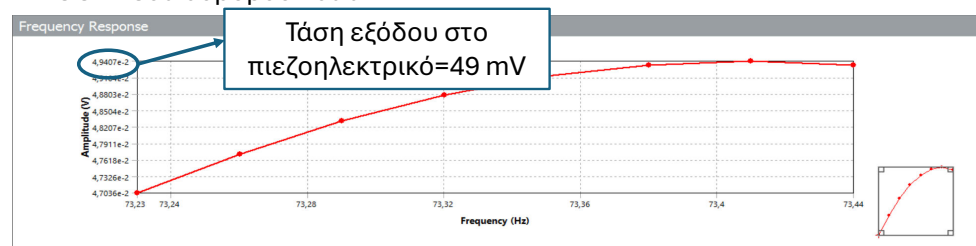


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

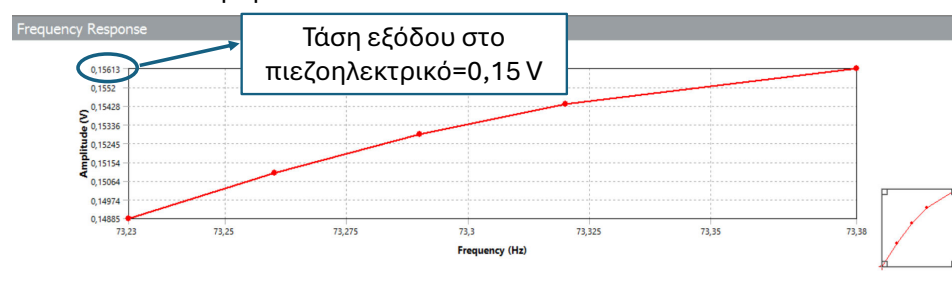
ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Frequency Response

- ❖ Σε επίπεδα θορύβου 70db:



- ❖ Σε επίπεδα θορύβου 80db:



Προσομοίωση στο λογισμικό Ansys

<http://www.m3.tuc.gr>

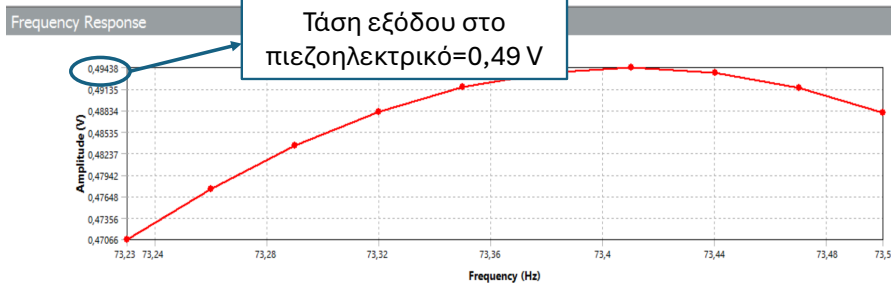


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

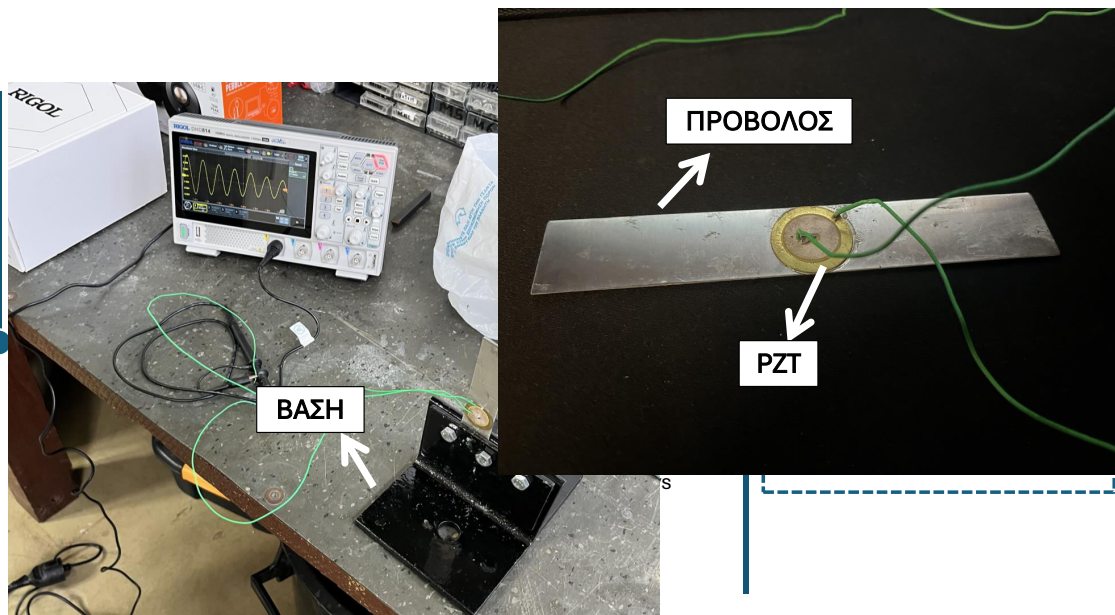
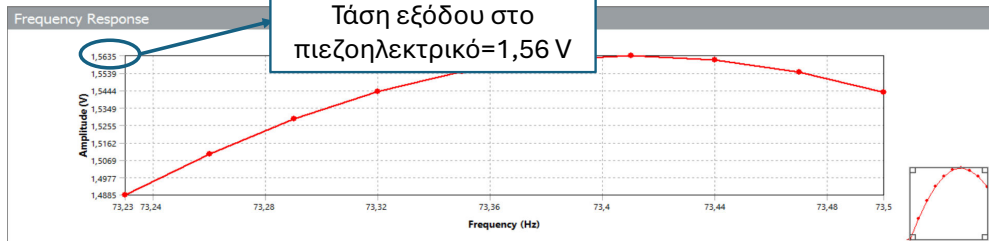
ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

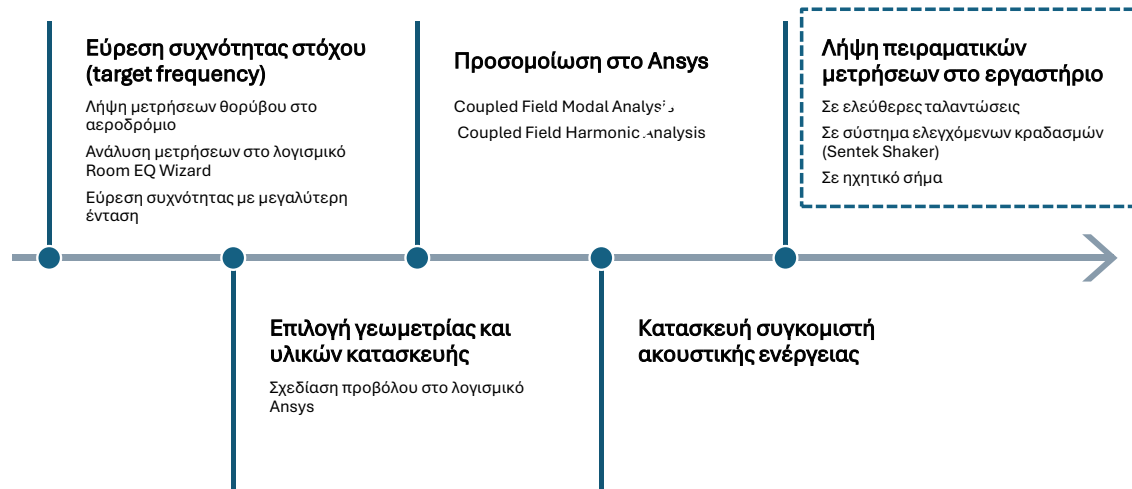
Frequency Response

❖ Σε επίπεδα θορύβου 90db:



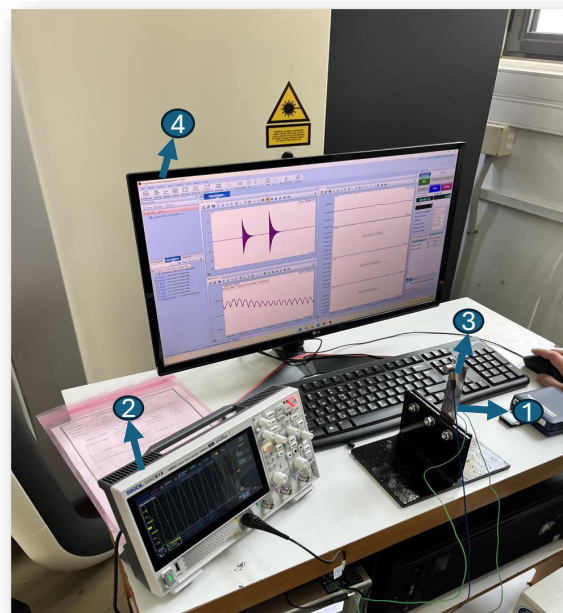
❖ Σε επίπεδα θορύβου 100db:





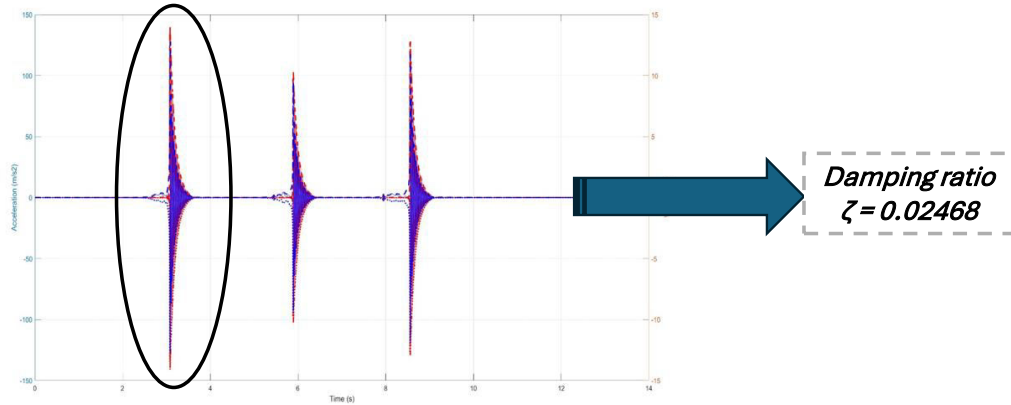
Πειραματική διάταξη σε ελεύθερες ταλαντώσεις

- 1 *Pzt Cantilever Beam*
- 2 *Παλμογράφος*
- 3 *Επιταχυνσιόμετρο*
- 4 *Λογισμικό Crystal Instruments EDM*



Επεξεργασία μετρήσεων στη MATLAB

- Διάγραμμα Τάσης-Επιτάχυνσης
- Υπολογισμός συντελεστή απόσβεσης ταλάντωσης (ζ)

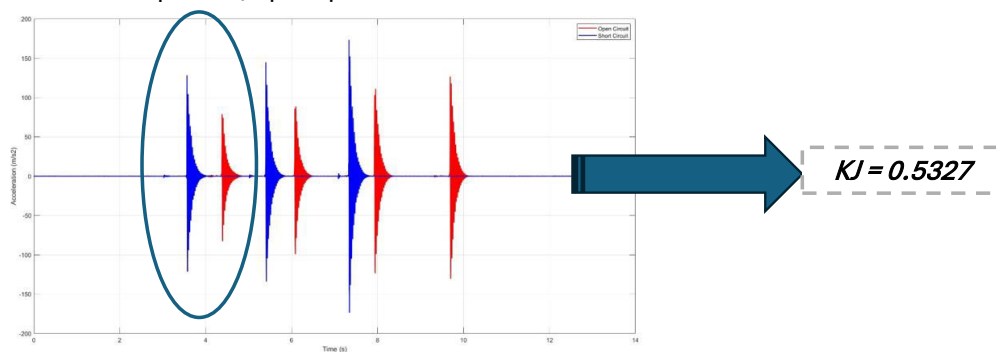


Υπολογισμός συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης k

$$k = \sqrt{\frac{f_{oc}^2 - f_{sc}^2}{f_{sc}^2}} \quad 0 < k < 1$$

όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο καλύτερη η σύζευξη

- Μετρήσεις επιταχύνσεων σε ελεύθερες ταλαντώσεις υπό ανοιχτό και κλειστό κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού

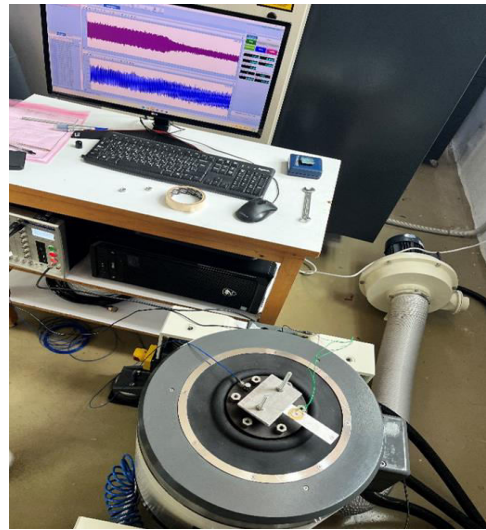


- ❖ Λήψη πειραματικών μετρήσεων με χρήση συστήματος ελεγχόμενων κραδασμών (Sentek shaker)

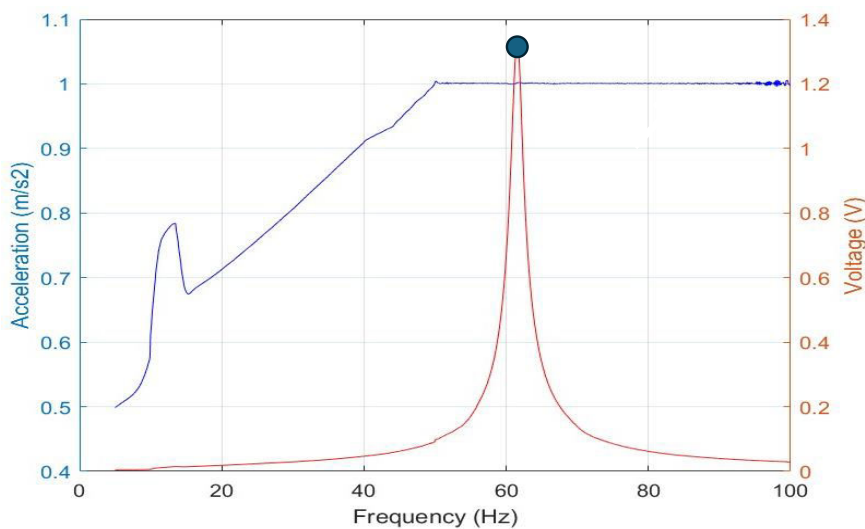
Προσομοίωση σε:

- συχνοτικό φάσμα 0-100 Hz
- επίπεδα επιβαλλόμενης επιτάχυνσης 0.5g, 1m/s², 1g

Μελέτη απόκρισης συχνότητας και τάσης
συγκομιστή ακουστικής ενέργειας



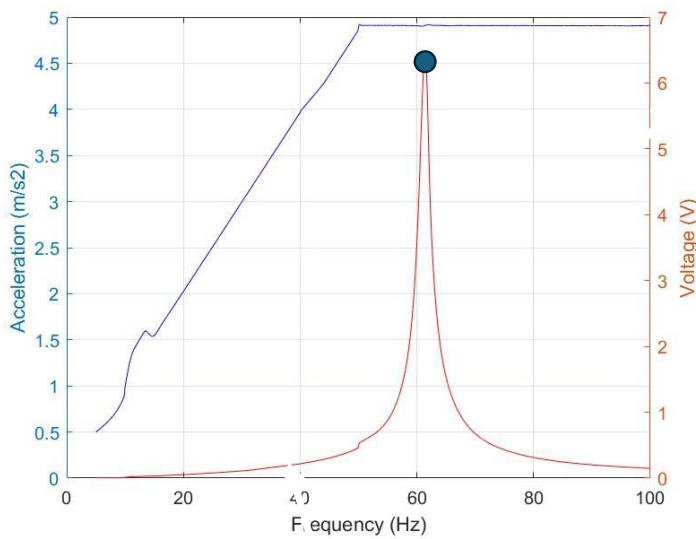
- Λήψη πειραματικών μετρήσεων με χρήση συστήματος ελεγχόμενων κραδασμών (Sentek shaker)



Σε επιτάχυνση 1 m/s²

- Συχνότητα συντονισμού=62 Hz
- Μέγιστη τάση πιεζοηλεκτρικού=1,3 V

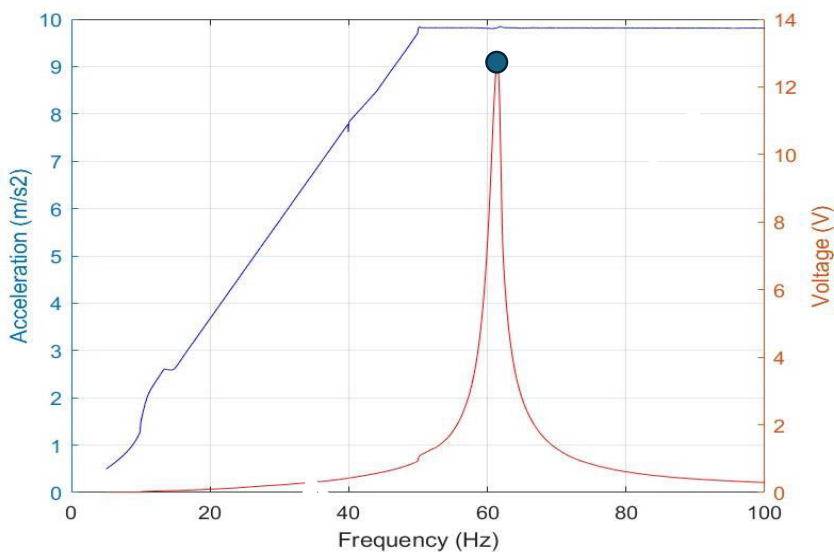
- Λήψη πειραματικών μετρήσεων με χρήση συστήματος ελεγχόμενων κραδασμών (Sentek shaker)



Σε επιτάχυνση $0,5g \approx 4,905 \text{ m/s}^2$

- Συχνότητα συντονισμού=62 Hz
- Μέγιστη τάση πιεζοηλεκτρικού=6,5V

- Λήψη πειραματικών μετρήσεων με χρήση συστήματος ελεγχόμενων κραδασμών (Sentek shaker)



Σε επιτάχυνση $1g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$

- Συχνότητα συντονισμού=62 Hz
- Μέγιστη τάση πιεζοηλεκτρικού=13 V

- Λήψη πειραματικών μετρήσεων με χρήση ηχητικού σήματος

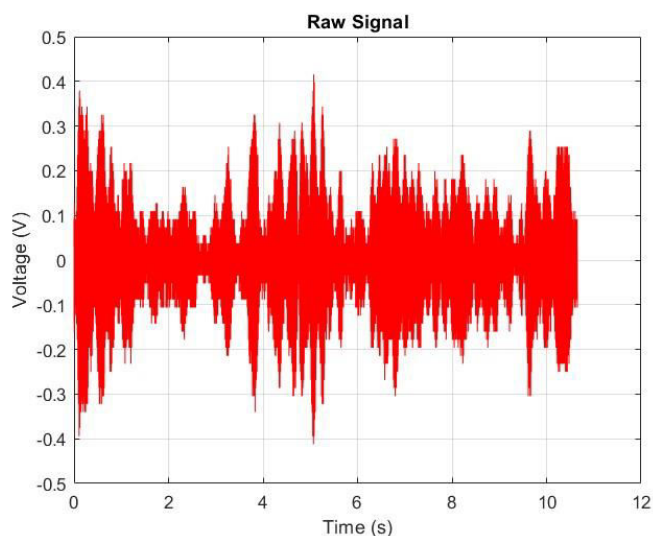


Προσομοίωση ηχητικού σήματος απογείωσης αεροσκαφών



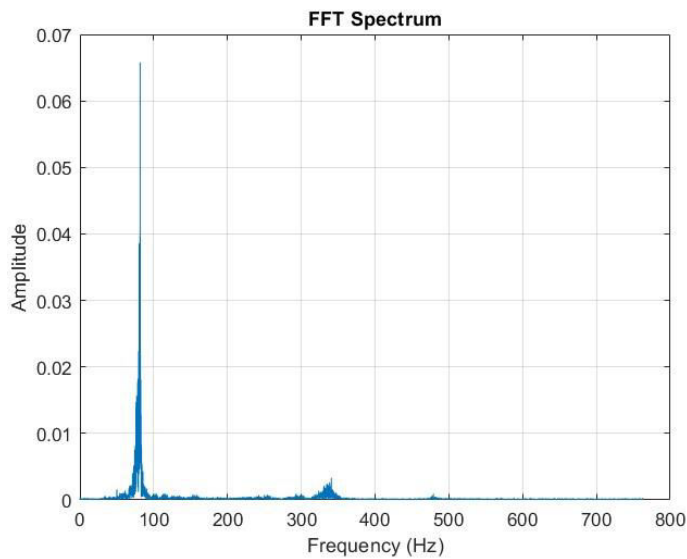
Λήψη πειραματικών μετρήσεων από παλμογράφο Picoscope

- Σχεδιασμός γραφικής παράστασης σήματος στην MATLAB



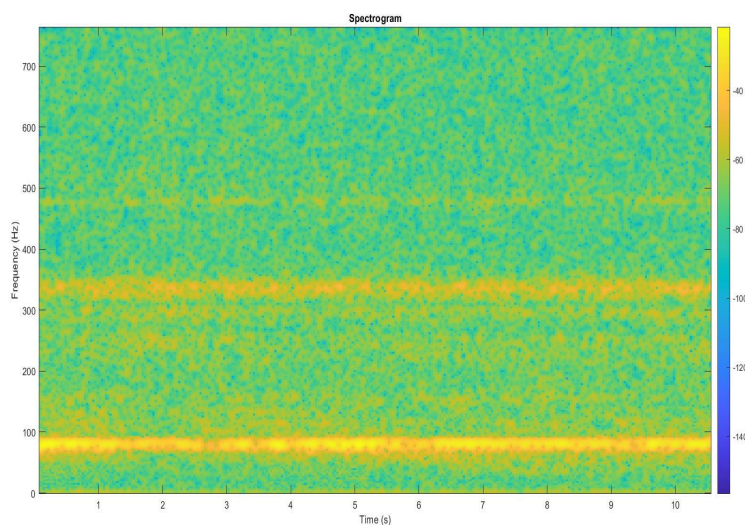
- Σήμα τάσης (κατακόρυφος άξονας) συναρτήσει του χρόνου (οριζόντιος άξονας) μιας απογείωσης (11s)
- Διακυμάνσεις τάσης -0,4 V έως +0,4 V
- Μέγιστη τάση στα 4-6 s

- Σχεδιασμός διαγράμματος FFT σήματος στην MATLAB



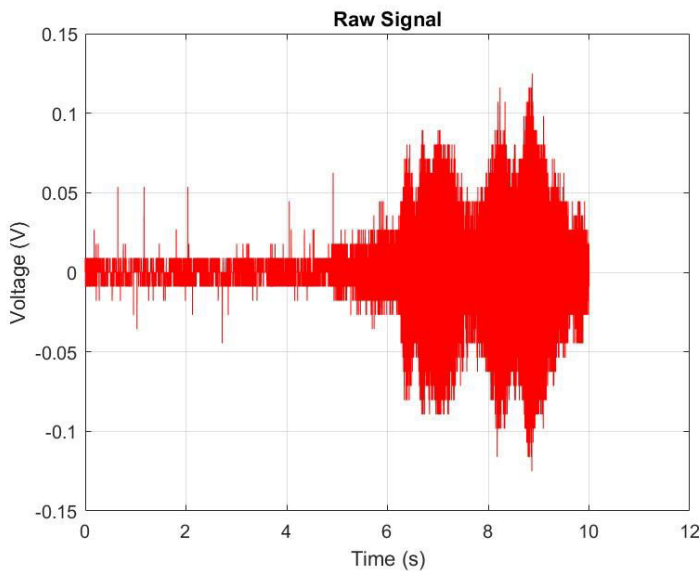
- Φάσμα συχνοτήτων με μεγαλύτερη ένταση σε χρονικό διάστημα σήματος
- Μεγαλύτερη ενέργεια σήματος γύρω από τα 70–80 Hz

- Σχεδιασμός Spectrogram στην MATLAB



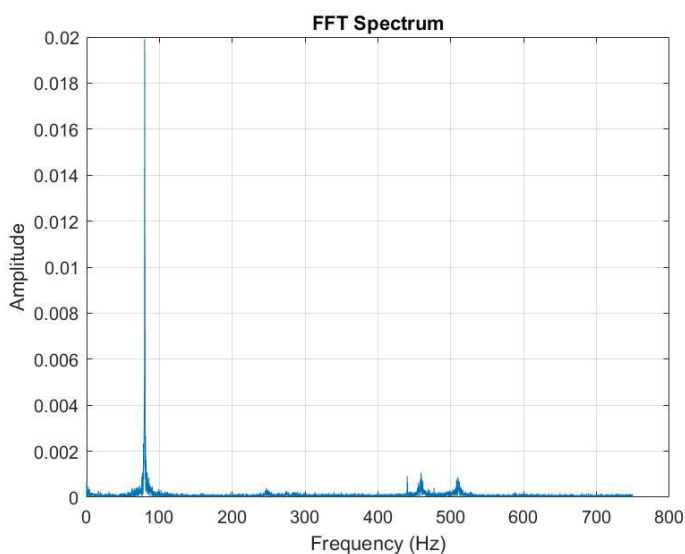
- Αποτυπώνει ένταση συχνοτήτων (Hz) στο πεδίο του χρόνου (s)
- Κυρίαρχη συχνότητα στα 70-80 Hz
- Εμφάνιση αυξημένης ισχύος γύρω από 330–350 Hz λόγω αρμονικών συχνοτήτων

- Σχεδιασμός γραφικής παράστασης σήματος MATLAB



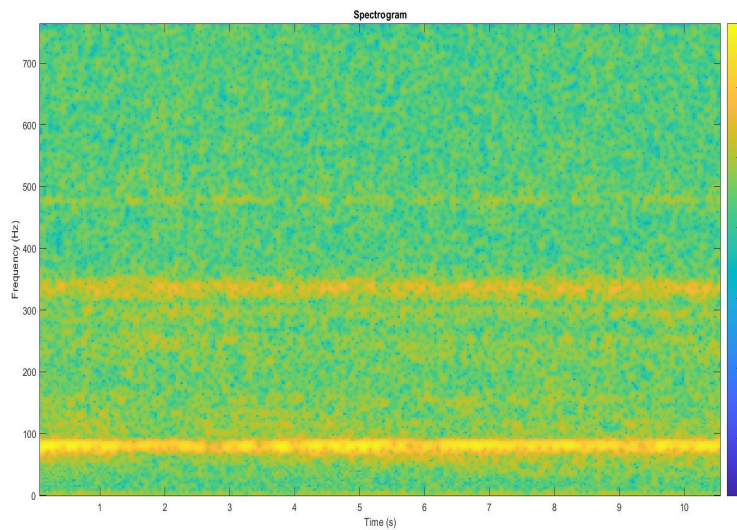
- Σήμα τάσης (κατακόρυφος άξονας) συναρτήσει του χρόνου (οριζόντιος άξονας) μιας απογείωσης (10s)
- Διακυμάνσεις τάσης -0,12 V έως +0,12 V
- Μέγιστη τάση στα 8-10 s (ταχύτητα απόφασης αφους)

- Σχεδιασμός διαγράμματος FFT σήματος στην MATLAB



- Μεγαλύτερη ενέργεια του σήματος σε 70–80 Hz
- Μικρότερες κορυφές σε 450 και άνω των 500 Hz λόγω αρμονικών ή ανεπιθύμητο θόρυβο του συστήματος

• Σχεδιασμός Spectrogram στην MATLAB



- Αποτυπώνει ένταση των συχνοτήτων (Hz) στο πεδίο του χρόνου (s)
- Κυρίαρχη συχνότητα στα 70-80 Hz
- Εμφάνιση αυξημένης ισχύος στα 350 Hz λόγω αρμονικών ή ανεπιθύμητο θόρυβο του συστήματος



Μετρήσεις σε περιβάλλον αεροδρομίου

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ



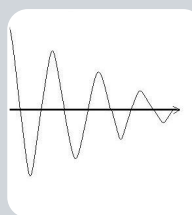
**Μετρήσεις
συχνότητας
στο
αεροδρόμιο**

- Target Frequency 70 Hz



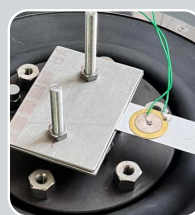
Modal & Harmonic Response Analysis

- 1^η ιδιοσυχνότητα 73 Hz
- Τάση πιεζοηλεκτρικού σε 70,80,90,100 db



Free vibrations

- $\zeta=0.02468$
- KJ-0.5327



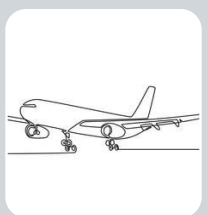
Sentek Shaker

- Τάση pzt υπό διέγερση 1 m/s^2 , 0,5g και 1 g



**Ηχητικό
σήμα Α/Γ**

- Βασική συχνότητα 70-80 Hz
- Μέγιστη τάση 0,4 V



Αεροδρόμιο

- Κυρίαρχη συχνότητα ίση με 70-80 Hz
- Μέγιστη τάση 0.15 V



Συμπεράσματα

<http://www.m3.tuc.gr>



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Χρήση καλύτερου
εξοπλισμού μέτρησης
συχνότητας

- Ακριβής προσδιορισμός εύρους συχνοτήτων με μεγαλύτερη ένταση στο αεροδρόμιο

Ανάλυση θορύβου στο
αεροδρόμιο

- Τοποθέτηση συγκομιστή ακουστικής ενέργειας σε σημείο διαδρόμου Α/Γ με μεγαλύτερο θόρυβο

Μελέτη συγκομιστή
υπό κλειστό κύκλωμα

- Ανάλυση απόκρισης σε διαφορετικές τιμές συνδεόμενης αντίστασης και υπολογισμός παραγόμενης ισχύος

Ανάλυση δυνατότητας
πρακτικής αξιοποίησης
συγκομιστή

- Χρήση συγκομιστή για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε αισθητήρες στην αεροπλοΐα



Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

<http://www.m3.tuc.gr>

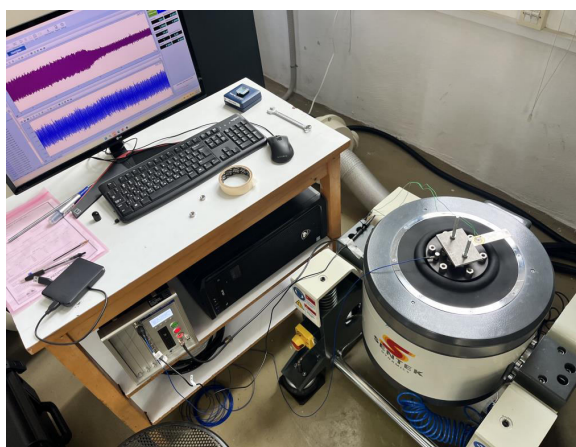


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Ευχαριστώ πολύ για την προσοχή σας!

Ερωτήσεις?



School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

<http://www.m3.tuc.gr>

ΝΥΣΤΑΖΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ