



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ**



**ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΡΑΔΑΣΜΩΝ ΣΕ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ LASER**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΑΡΙΑΣ – ΕΥΓΕΝΙΑΣ ΔΡΟΣΟΥ**

**Επίβλεψη:
Καθηγητής Κ. Μαθιουδάκης
Λέκτορας Ν. Αρετάκης**

Αθήνα, Ιούλιος 2010

*Αφιερώνεται
στην οικογένεια μου*

“Μέτρηση κραδασμών σε στροβιλομηχανές με χρήση συστήματος Laser”

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μέτρηση των κραδασμών σε στροβιλομηχανές με χρήση συστήματος λέιζερ και πιο συγκεκριμένα με χρήση της συσκευής Industrial Laser Doppler Vibrometer Type 8338. Αναζητήθηκαν αρχικά στη διεθνή βιβλιογραφία πληροφορίες σχετικές με τη χρήση ανάλογων συστημάτων όπως και τα στοιχεία που προέκυψαν από την εφαρμογή τους στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Ακολουθεί μια πρώτη γνωριμία με το σύστημα λέιζερ όπου και παρουσιάζονται τα εργονομικά χαρακτηριστικά του, η αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζεται η λήψη των μετρήσεων καθώς και κάποια βασικά στοιχεία της θεωρίας των ταλαντώσεων. Δίδονται επίσης οδηγίες για την επιλογή των κατάλληλων για την κάθε περίπτωση παραμέτρων και για την προετοιμασία και τη συνδεσμολογία της συσκευής, ώστε να είναι έτοιμη προς χρήση.

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της πιστοποίησης του LDV, κατά την οποία πραγματοποιείται μια σειρά δοκιμών ώστε να επαληθευτεί η ακριβής λειτουργία του οργάνου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μέτρησης. Ως μέτρο σύγκρισης για τον έλεγχο της ακρίβειας λαμβάνεται ο βαθμονομητής επιταχυνσιόμετρων Calibration Exciter Type 4294. Οι πρώτες δοκιμές αφορούν στη μελέτη της συμπεριφοράς του LDV στις περιπτώσεις που η δέσμη του λέιζερ προσπίπτει στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες. Προσαρμόζουμε επίσης πάνω στο διεγέρτη επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας ώστε να μελετηθεί η απόκριση του συστήματος σε σχέση με την τραχύτητα της επιφάνειας. Στις επόμενες δοκιμές μεταβάλλουμε την απόσταση του LDV από το διεγέρτη σε ευθεία γραμμή, ώστε να μελετηθεί η ευαισθησία των μετρήσεων σε σχέση με την απόσταση. Στις αρχικές δοκιμές μεταβάλλουμε κάθε φορά την εστίαση ώστε να έχουμε πάντα τη βέλτιστη δυνατή για την κάθε απόσταση, ενώ στις επόμενες διατηρείται σταθερή η εστίαση όπως αυτή ρυθμίζεται για κάποια συγκεκριμένη απόσταση αναφοράς. Τέλος, ελέγχεται η απόκριση του συστήματος όταν μεταξύ του LDV και του διεγέρτη παρεμβάλλονται καθρέπτες, οι οποίοι εκτρέπουν τη δέσμη του λέιζερ και την κατευθύνουν στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες.

Στην τελευταία ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του LDV για τη μέτρηση των κραδασμών σε διατάξεις αεριοστροβίλων του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π. Η πρώτη σειρά μετρήσεων πραγματοποιείται στη διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών, όπου παράλληλα με το LDV χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των κραδασμών και συμβατικά επιταχυνσιόμετρα στις ίδιες θέσεις της μηχανής, ώστε να διαπιστωθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και η αξιοπιστία του συστήματος λέιζερ. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια ακόμη σειρά δοκιμών στη διάταξη του μικρού στροβιλοκινητήρα AMT Olympus στο δοκιμαστήριο του εργαστηρίου. Στην περίπτωση αυτή, το LDV αποτελεί τη μοναδική μέθοδο μέτρησης των κραδασμών της μηχανής.

“Vibration measurements for turbomachinery applications using Laser Doppler Vibrometer”

Summary

The purpose of this diploma thesis is the measurement of vibrations for turbomachinery applications with use of Laser Doppler Vibrometer type 8338. Initially, in order to find information relative to the use of analogous systems and elements that resulted from their use in various industrial applications, the international bibliography is researched. We are also accustomed to the laser system by presenting its ergonomic characteristics, its principle of operation as well as certain basic elements of vibrations' theory. Guidelines are also given towards the choice of the suitable parameters and the preparation and the linking of the device, so that it is ready to use.

Afterwards the certification process of the LDV is presented, while several tests are performed so that the precise operation of the device under specific conditions of measurement is verified. The Calibration Exciter Type 4294 is considered here as a means of comparison for the control of the LDV's precision. The first series of tests concerns the study of the LDV's behavior in cases that the laser beam aims at the exciter under various angles. Surfaces of different roughness are fitted to the exciter so that the system's response concerning the roughness of the surface is studied.

In the second series of tests the LDV's straight line distance from the exciter is altered, so that the sensitivity of the measurements concerning the distance is studied with or without focus regulation. In the initial tests focus is each time adjusted in order to achieve the optimal possible for each distance, while in the following tests the focus is maintained constant as it is regulated for a certain specific reference distance. Finally, the system's response is checked when mirrors are interfered between the LDV and the exciter, that divert the laser beam and direct it towards the exciter under various angles.

In the last section the results of the LDV's application for the measurement of vibrations on turbomachinery components of gas turbine engines at the Laboratory of Thermal Turbomachines of N.T.U.A are presented. The first measurements concern the counter rotating blade rows engine, where the LDV is used simultaneously with conventional accelerometers for the vibrations' measurement, so that the convergence of the results of the two methods and the reliability of laser system are verified. Afterwards, another series of tests is realized on the AMT Olympus small turbomachine located in the laboratory's test cell. In this case, the LDV constitutes the unique method for the measurement of the machine's vibrations.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Από τη θέση αυτή αισθάνομαι το χρέος και την επιθυμία να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Κ. Μαθιουδάκη, καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., οι συμβουλές και οι κατευθύνσεις του οποίου υπήρξαν πολύτιμες για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο λέκτορα κ. Ν. Αρετάκη για την ενασχόληση, την υπομονή και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών όπως και στο τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π. για την άψογη συνεργασία μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1.1
1.1	Κραδασμοί.....	1.1
1.2	Μέθοδοι μέτρησης των κραδασμών.....	1.2
1.3	Laser Doppler Vibrometers (LDV).	1.3
1.4	Πλεονεκτήματα των LDV έναντι των επιταχυνσιομέτρων.....	1.4
1.5	Βιβλιογραφική διερεύνηση.	1.5
1.5.1	Ανίχνευση δομικών βλαβών.....	1.6
1.5.2	Βιοϊατρικές εφαρμογές.	1.6
1.5.3	Βαθμονόμηση.....	1.7
1.5.4	Ανίχνευση βλαβών σε εφαρμογές πολιτικών μηχανικών.....	1.7
1.5.5	Μέτρηση κραδασμών σε θαλάμους καύσης.....	1.7
1.5.6	Μέτρηση κραδασμών σε μεγάλες πτερωτές.....	1.8
1.6	Όρια της τρέχουσας τεχνολογίας των LDV.....	1.8
1.6.1	Ανάλυση των LDV.....	1.8
1.6.2	Αξιολόγηση της αβεβαιότητας.....	1.8
1.6.3	Η απόσταση στησίματος των LDV.....	1.9
1.6.4	Χωρική ανάλυση των SLDV.....	1.9
1.6.5	Περιβαλλοντικές συνθήκες.	1.10
1.6.6	Αναλογία σήματος προς θόρυβο.....	1.10
1.7	Η παρούσα διπλωματική.....	1.10
2	Εισαγωγή στη μέθοδο μετρήσεων	2.1
2.1	Γενική περιγραφή του Industrial Laser Doppler Vibrometer Type 8338..	2.1
2.2	Η αρχή λειτουργίας.....	2.3
2.3	Επιλογή ρυθμίσεων.....	2.5
2.3.1	Επιλογή του εύρους της ταχύτητας των μετρήσεων.....	2.5
2.3.2	Επιλογή φίλτρων αποκοπής συχνοτήτων.....	2.6
2.4	Επιλογή βέλτιστης απόστασης.....	2.7
2.5	Επεξεργασία χρονικών σημάτων.....	2.7

2.6	Διεξαγωγή των μετρήσεων.	2.8
2.6.1	Προετοιμασία.	2.9
2.6.2	Καλωδίωση κι έναρξη λειτουργίας.	2.9
2.6.3	Λήψη μετρήσεων.	2.10
2.7	Προτεινόμενες εφαρμογές του VH-1000-D.	2.11
3	Πιστοποίηση του VH-1000-D.	3.1
3.1	Χαρακτηριστικά λειτουργίας του Calibration Exciter Type 4294.	3.1
3.2	Ακρίβεια των μετρήσεων συναρτήσει της γωνίας και της τραχύτητας.	3.3
3.3	Ακρίβεια των μετρήσεων συναρτήσει της απόστασης.	3.14
3.3.1	Με ρύθμιση της εστίασης για κάθε μέτρηση.	3.14
3.3.2	Με ρύθμιση της εστίασης μόνο στην απόσταση αναφοράς.	3.16
3.4	Ακρίβεια των μετρήσεων συναρτήσει της παρεμβολής καθρεπτών.	3.22
3.4.1	Με παρεμβολή ενός καθρέπτη.	3.22
3.4.2	Με παρεμβολή τριών καθρεπτών.	3.25
3.5	Συμπεράσματα.	3.28
4	Μέτρηση κραδασμών σε στροβιλομηχανές.	4.1
4.1	Διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.	4.1
4.1.1	Μετρήσεις στην ένατη ώρα της μηχανής.	4.6
4.1.2	Μετρήσεις στη δωδέκατη ώρα με χρήση τριών καθρεπτών.	4.9
4.1.3	Μετρήσεις στη δωδέκατη ώρα με ανάκλιση του VH-1000-D.	4.12
4.1.4	Μετρήσεις στη δωδέκατη ώρα με χρήση ηλεκτρομαγνήτη.	4.15
4.2	Κινητήρας AMT Olympus.	4.17
4.2.1	Μετρήσεις στην τρίτη ώρα με παρεμβολή διπλού τζαμιού.	4.19
4.2.2	Μετρήσεις στην τρίτη ώρα χωρίς παρεμβολή διπλού τζαμιού.	4.22
4.2.3	Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.	4.26
4.3	Περιορισμοί από τη χρήση των φίλτρων συχνοτήτων.	4.27
4.4	Συμπεράσματα.	4.28
4.4.1	Διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.	4.28
4.4.2	Κινητήρας AMT Olympus.	4.29
5	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις.	5.1

5.1	Ανακεφαλαίωση.	5.1
5.2	Συμπεράσματα και προτάσεις.	5.2
5.2.1	Πιστοποίηση του VH-1000-D.	5.2
5.2.2	Διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.	5.3
5.2.3	Κινητήρας AMT Olympus.	5.4
6	Βιβλιογραφία	6.1
Π1	Τεχνικές Προδιαγραφές του VH-1000-D	1
Π1.1	Προδιαγραφές του Industrial Laser Doppler Vibrometer – Type 8338.	1
Π1.2	Βαθμονόμηση του VH-1000-D.	2
Π1.2.1	Ηλεκτρονική βαθμονόμηση.	2
Π1.2.2	Μηχανική βαθμονόμηση.	2
Π1.3	Τεχνικά σχέδια του VH-1000-D.	3
Π2	Calibration Exciter Type 4294	1
Π2.1	Προδιαγραφές του Calibration Exciter Type 4294.	2
Π3	Piezoelectric Accelerometer Type 8341	1
Π3.1	Προδιαγραφές του Piezoelectric Accelerometer Type 8341.	1
Π3.2	Τεχνικά σχέδια του Piezoelectric Accelerometer Type 8341.	2

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια του πρώτου κεφαλαίου παρατίθενται κάποια στοιχεία από τη θεωρία των κραδασμών και στη συνέχεια αναφέρονται οι συμβατικές μέθοδοι μέτρησής τους. Ακολουθεί η παρουσίαση μιας εναλλακτικής μεθόδου που αφορά στη μέτρηση των κραδασμών με χρήση συστήματος λείζερ και γίνεται επίσης εκτενής αναφορά στα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου, στα όρια εφαρμογής της, όπως και σε κάποιες προηγμένες τεχνολογικές εφαρμογές στις οποίες έχει ήδη δοκιμαστεί με επιτυχία. Στο τέλος του κεφαλαίου δίδεται περιληπτικά και η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.1 Κραδασμοί.

Οι κραδασμοί αποτελούν ταχέως μεταβαλλόμενα μεγέθη που εμπεριέχουν διαγνωστική πληροφορία. Προκύπτουν από τις χρονικά μεταβαλλόμενες δυνάμεις που δημιουργούνται σε μια μηχανή, είτε με αλληλεπίδραση κινητών και σταθερών στερεών σωμάτων είτε με αλληλεπίδραση στερεών σωμάτων και ρευστού. Σαν γενικός κανόνας, μια καλά σχεδιασμένη μηχανή έχει χαμηλό επίπεδο κραδασμών που αυξάνει όσο επιδεινώνεται η κατάσταση της. Ένα σώμα υφίσταται κραδασμό όταν μέρος του εκτελεί μια ταλαντωτική κίνηση γύρω από μια θέση αναφοράς. Αν η κίνηση αυτή μπορεί να περιγραφεί από μια ημιτονοειδή συνάρτηση πρόκειται για αρμονική κίνηση, η οποία μπορεί κατά κανόνα να αναλυθεί σε αρμονικές συνιστώσες. Ας δούμε λοιπόν πώς περιγράφεται μια αρμονική κίνηση.

Όπως οποιαδήποτε κίνηση, έτσι και ο κραδασμός μπορεί να περιγραφεί με την εναλλακτική χρήση τριών κινηματικών μεγεθών, της θέσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Για μια αρμονική κίνηση έχουμε:

$$x = x_0 \cdot \sin \omega t \quad (1.1)$$

$$u = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot x_0 \cdot \cos \omega t \quad (1.2)$$

$$a = \frac{du}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot x_0 \cdot \sin \omega t \quad (1.3)$$

Το επίπεδο κραδασμών χαρακτηρίζει το πόσο έντονη είναι η κίνηση και μπορεί να χαρακτηριστεί από το πλάτος της ταλάντωσης, τη μέση ενεργό τιμή (RMS) ή

ακρότατες τιμές, οποιουδήποτε από τα τρία παραπάνω μεγέθη. Έχει βρεθεί από εμπειρία ότι η καταλληλότερη ποσότητα για να χαρακτηρίσει το επίπεδο κραδασμών μιας μηχανής είναι η μέση ενεργός τιμή του σήματος ταχύτητας κραδασμών. Γι' αυτό το μέγεθος έχουν μάλιστα συνταχθεί τυποποιήσεις που δίνουν τα επιτρεπτά όρια του επιπέδου αυτού για ολόκληρες κατηγορίες μηχανών. Πιστεύεται ότι το γεγονός ότι πιο κατάλληλο είναι το σήμα της ταχύτητας οφείλεται στο ότι η ταχύτητα στο τετράγωνο εκφράζει κινητική ενέργεια. Συνεπώς, η μέση ενεργός τιμή εκφράζει την κινητική ενέργεια της δονούμενης επιφάνειας λαμβάνοντας υπόψη τις συνεισφορές από όλο το πεδίο συχνοτήτων.

Ας σημειωθεί ότι όταν επιχειρείται φασματική ανάλυση είναι σκόπιμο να εξετάζεται το ποια είναι η περιοχή ενδιαφέροντος. Όπως δείχνουν οι προηγούμενες σχέσεις για τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση, η εξέταση ή η μέτρηση της θέσης δίνει βάρος σε συνιστώσες χαμηλών συχνοτήτων, ενώ για την επιτάχυνση αυτό συμβαίνει στις υψηλές συχνότητες. Η φασματική ανάλυση ενός χρονικού σήματος με χρήση του μετασχηματισμού Fourier μπορεί να μας δώσει το αρμονικό περιεχόμενο του σήματος, δηλαδή το μέγεθος των επιμέρους συνιστωσών του στις διάφορες συχνότητες. Η επισκόπηση του φάσματος ισχύος μας δείχνει αμέσως τις συχνότητες στις οποίες έχουμε συνιστώσες σημαντικού μεγέθους. Οι μετασχηματισμοί αυτοί πραγματοποιούνται σήμερα κυρίως με τη βοήθεια των αλγορίθμων Ταχέως Μετασχηματισμού Fourier (FFT- Fourier Fast Transform). [1]

1.2 Μέθοδοι μέτρησης των κραδασμών.

Η μέτρηση των κραδασμών μπορεί να γίνει για ένα από τα τρία μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα κραδασμό, δηλαδή τη μετατόπιση, την ταχύτητα ή την επιτάχυνση.

Η μετατόπιση μετριέται με αισθητήρες δινορευμάτων (eddy current) που αλλιώς ονομάζονται και αισθητήρες προσέγγισης (proximity probe). Η αρχή στην οποία βασίζεται η λειτουργία τους είναι η μεταβολή της αυτεπαγωγής ενός συστήματος που αποτελείται από έναν ηλεκτρομαγνήτη προσαρμοσμένο κοντά στην κινούμενη επιφάνεια. Η μεταβολή του διακένου μεταξύ του ηλεκτρομαγνήτη και της κινούμενης επιφάνειας γίνεται αισθητή σαν αλλαγή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών (αυτεπαγωγής) και μετριέται μέσω αυτών. Το πλεονέκτημα μιας μέτρησης αυτού του είδους, είναι ότι δεν έρχεται σε επαφή με την κινούμενη επιφάνεια και οι αισθητήρες δεν περιλαμβάνουν κινούμενα τμήματα. Συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της μετατόπισης μιας στρεφόμενης ατράκτου. Για τη διεξαγωγή όμως μετρήσεων ακριβείας θα πρέπει η στρεφόμενη επιφάνεια να μην έχει ανωμαλίες.

Ένα μειονέκτημα αυτού του τύπου μέτρησης είναι η μικρή δυναμική περιοχή (δηλαδή ο λόγος μέγιστης προς ελάχιστης τιμής που μπορεί να μετρηθεί), δεδομένου ότι η μετατόπιση κραδασμών είναι συνήθως πολύ μικρή στις υψηλές συχνότητες και είναι κάτω από τη διακριτική ικανότητα του οργάνου. Θεωρητικά η δυναμική περιοχή μπορεί

να εκτείνεται από 0 έως 10KHz, στην πράξη όμως τα συστήματα που χρησιμοποιούνται έχουν καλή απόκριση σε αρκετά στενότερα όρια.

Συστήματα μέτρησης αυτού του τύπου συναντά κανείς σε πολλές μηχανές, εγκατεστημένα ήδη από τον κατασκευαστή τους. Υπάρχει μάλιστα μια διάταξη που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρακολούθηση της μηχανικής κατάστασης της ατράκτου. Πρόκειται για δύο μετρητές μετατόπισης τοποθετημένους σε κατευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους, σε κάποιο έδρανο της μηχανής. Η μέτρηση των μετατοπίσεων στις δύο κατευθύνσεις επιτρέπει τον προσδιορισμό της τροχιάς της ατράκτου κατά την περιστροφή. Η μορφή της τροχιάς αυτής αποτελεί ένα καλό δείκτη της μηχανικής κατάστασης της ατράκτου και της παρουσίας μηχανικών βλαβών.

Η ταχύτητα των κραδασμών μετριέται είτε με αισθητήρες ταχύτητας (velocity pick-up), είτε με μετρητές κραδασμών Laser Doppler Vibrometers, τους οποίους θα αναλύσουμε σε επόμενη παράγραφο. Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων ταχύτητας βασίζεται σε ένα τυλίγμα μονταρισμένο γύρω από ένα μαγνήτη, έτσι ώστε να κινείται ως προς αυτόν. Όταν ο αισθητήρας τεθεί σε κίνηση από μια δονούμενη επιφάνεια στην οποία είναι προσαρμοσμένος, δημιουργείται σχετική κίνηση τυλίγματος - μαγνήτη, λόγω αδράνειας. Η κίνηση αυτή δημιουργεί τάση στα άκρα του τυλίγματος ανάλογη της ταχύτητας μετατόπισης. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου έχουν μεγαλύτερη δυναμική περιοχή από τους αισθητήρες μετατόπισης, αλλά έχουν συνήθως μεγάλο μέγεθος, ευαισθησία σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία και η μηχανική φθορά από κινούμενα μέρη μπορεί να τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά τους.

Οι αισθητήρες που έχουν ευρύτερη εφαρμογή είναι οι αισθητήρες επιτάχυνσης (accelerometer). Η λειτουργία τους βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Μια μάζα συνδεδεμένη με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο ασκεί δύναμη ανάλογη της επιτάχυνσης που υφίσταται όταν προσαρμοστεί στη δονούμενη επιφάνεια. Η δύναμη αυτή προκαλεί ανάπτυξη ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να μετρηθεί με κατάλληλη ηλεκτρονική συνδεσμολογία. Τα επιταχυνσιόμετρα έχουν πολύ μεγάλη δυναμική περιοχή, καλή απόκριση σε ευρεία περιοχή συχνοτήτων και καλή συμπεριφορά σε μεταβολές θερμοκρασίας. [1]

1.3 Laser Doppler Vibrometers (LDV).

Οι μετρητές κραδασμών Laser Doppler Vibrometers (LDV) διευρύνουν σημαντικά τις δυνατότητες μετρήσεων σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αισθητήρες κραδασμών. Επιτρέπουν απομακρυσμένες, μη παρεμβατικές, υψηλής χωρικής ανάλυσης μετρήσεις, με μειωμένο χρόνο δοκιμών και υψηλές επιδόσεις (εύρος υψηλών συχνοτήτων πάνω από 20 MHz, εύρος ταχύτητας ± 30 m/s, ανάλυση περίπου 8nm για τη μετατόπιση και 0.5 $\mu\text{m/s}$ για την ταχύτητα).

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80, παρουσιάστηκαν τα πρώτα πρότυπα LDV, αλλά η περιορισμένη ευαισθησία τους και η χαμηλή αναλογία του σήματος προς

θόρυβο (SNR) επέτρεψαν τη λήψη μετρήσεων μόνο σε πολύ διάχυτες επιφάνειες. Μόλις στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η ανάπτυξη του υλικού και του λογισμικού αύξησαν τις επιδόσεις και το εύρος εφαρμογής των LDV και επομένως πολλοί ερευνητές άρχισαν πλέον να τα χρησιμοποιούν. Σε διάφορες περιπτώσεις, έχει αποδειχθεί ότι προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά επιταχυνσιόμετρα, επιτρέποντας τη λήψη αποτελεσμάτων που δεν ήταν προβλέψιμα μόλις 10 έτη πριν. Χρησιμοποιώντας ένα LDV απλά ως ένα σημειακό μορφοτροπέα κραδασμών, είναι δυνατό να εκτελεσθούν μετρήσεις ακριβείς, ευέλικτες και μη-παρεμβατικές. Επιπλέον, τα LDV αποτελούν μια απομακρυσμένη τεχνική μέτρησης, υπό την έννοια του ότι αν τοποθετηθούν μακριά από το υπό μελέτη αντικείμενο, ακόμη και σε μια απόσταση μεγαλύτερη των 30m, μπορούν να πραγματοποιήσουν μετρήσεις με ικανοποιητική ακρίβεια (1-2.5% RMS της ανάγνωσης). Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα δεν είναι κοινό για όλους τους αισθητήρες άνευ-επαφής (όπως η προσέγγιση με οπτικές ίνες) και φαίνεται να είναι πολύ χρήσιμο στην επέκταση των ορίων της ανάλυσης κραδασμών σε διάφορες εφαρμογές, όπως στις δοκιμές μεγάλων κτιριακών δομών.

Σε συνέχεια του μεγάλου αριθμού εφαρμογών όπου έχουν υιοθετηθεί τα LDV απλά για να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά επιταχυνσιόμετρα, ενδιαφέροντα αποτελέσματα έχουν προκύψει επίσης στον τομέα της προηγμένης έρευνας. Αυτό το είδος προόδου προσφέρει αποτελεσματικές λύσεις σε πολλά προβλήματα, σε διάφορους τομείς εφαρμογών, όπως στη μελέτη ενός μηχανισμού υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας, στην ανίχνευση βλαβών, στον χαρακτηρισμό υλικών και επίσης σε μερικούς βιοϊατρικούς κλάδους. [2]

1.4 Πλεονεκτήματα των LDV έναντι των επιταχυνσιομέτρων.

Τα επιταχυνσιόμετρα αποτελούν την πιο διαδεδομένη μέθοδο μέτρησης των κραδασμών. Ωστόσο η μη παρεμβατική μέθοδος των LDV αποτελεί πλέον μια ελκυστική εναλλακτική επιλογή, παρουσιάζοντας πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων. Ένα βασικό της πλεονέκτημα αποτελεί η απλούστευση του σταθμού δοκιμής των μηχανικών συστημάτων. Ο υψηλής στάθμης παραγόμενος ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των εν λόγω συστημάτων, εξαιτίας του ανεμισμού των κινούμενων μηχανικών μελών τους, επιδεινώνει το λόγο σήματος προς θόρυβο και θέτει ζητήματα απομόνωσης των αισθητήρων. Καθ' αυτόν τον τρόπο καθίσταται προβληματική η σωστή τοποθέτηση των επιταχυνσιομέτρων. Από την άλλη μεριά, η μη παρεμβατική φύση ενός συστήματος λέιζερ και η απομακρυσμένη και άνευ επαφής δυνατότητα μέτρησης των κραδασμών που παρέχει, μειώνει τους παραπάνω μηχανικούς περιορισμούς. Ο βασικός υφιστάμενος περιορισμός είναι η απομόνωση του LDV από τους κραδασμούς του εδάφους και ο οποίος επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλων φίλτρων συχνοτήτων.

Η μέτρηση των κραδασμών πραγματοποιείται συχνά σε διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου σε γραμμές παραγωγής. Υπάρχει μια ποικιλία κατασκευαστικών ελαττωμάτων τα οποία είναι δυνατό να ανιχνευθούν μέσω του αυξημένου θορύβου και των κραδασμών κατά τη διάρκεια της δοκιμής ενός μηχανικού συστήματος, η οποία ακολουθεί ένα προδιαγεγραμμένο από τον κατασκευαστή κύκλο χειρισμών. Σε διαδικασίες επιλογής αποδεκτών και μη αποδεκτών συστημάτων με τη βοήθεια και την ανάλυση των αντίστοιχων υπογραφών βλαβών που προϋποθέτουν τον υπολογισμό των μέσων ενεργών τιμών RMS των σημάτων του κραδασμού, οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν ισοδύναμα αποτελέσματα. Εάν όμως η διαγνωστική διαδικασία προχωρήσει στην κατηγοριοποίηση των διαφόρων ελαττωμάτων των συστημάτων, μέσω της ανάλυσης ταχέως μετασχηματισμού Fourier υπολογίζοντας τα φάσματα ισχύος του κραδασμού, οι ενδείξεις ταχύτητας που καταγράφονται από τα συστήματα LDV δίδουν πιο ικανοποιητικές συσχετίσεις σε σχέση με τις ενδείξεις επιτάχυνσης των συμβατικών επιταχυνσιομέτρων. Αυτό οφείλεται στους περιορισμούς που τίθενται στην εγκατάσταση των επιταχυνσιομέτρων και στον παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Οι δύο αυτοί παράγοντες ενισχύουν το θόρυβο, ο οποίος αλλοιώνει το φάσμα ισχύος και καθιστά πιο δυσχερή την κατηγοριοποίηση των βλαβών μέσω της ανάλυσης των συχνοτήτων. Επίσης η αντικατάσταση των επιταχυνσιομέτρων με LDV επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση χρόνου στη διαδικασία της δοκιμής σε γραμμές παραγωγής, καθώς αποφεύγεται η τοποθέτηση και απομάκρυνση των αισθητήρων σε κάθε σύστημα.

Τα LDV βρίσκουν ευρεία εφαρμογή και στις περιπτώσεις εκείνες όπου είναι ανεπιθύμητα στην ανάλυση κραδασμών σφάλματα εξαιτίας του μαζικού φορτίου των επιταχυνσιομέτρων (π.χ. σε ηχεία). Τα σφ αυτά φαίνονται να σχετίζονται με τον τρόπο εκτίμησης των παραμέτρων ειδικά όταν εξετάζονται μικρές ή ελαφριές δομές ή ιδιαίτερα μη γραμμικά υλικά (π.χ. το καουτσούκ). Επίσης τα LDV ενδείκνυνται και για εφαρμογές που αφορούν πολύ θερμές επιφάνειες (π.χ. εξατμίσεις αυτοκινήτων) και περιστρεφόμενες επιφάνειες (π.χ. περιστρεφόμενες ατράκτους). [2,3,4]

1.5 Βιβλιογραφική διερεύνηση.

Υπάρχουν πρόσφατες προσπάθειες που επιδιώκουν την καθιέρωση των LDV σε διάφορους προηγμένους τεχνολογικούς τομείς: από μηχανολογικής άποψης σε βιομηχανίες αυτοκινήτων, στροβιλομηχανών και αεροναυπηγικής, σε κλινικές και βιοϊατρικές εφαρμογές, σε μικροσυστήματα κι έξυπνα υλικά, σε έργα τέχνης και σε αρχαιολογικές εφαρμογές, όπως και σε εργασίες αποκατάστασης κτιρίων και σε άλλες εργασίες πολιτικών μηχανικών. Κάποιες από τις εφαρμογές σε διατάξεις στροβιλομηχανών αφορούν στη μέτρηση κραδασμών και κατ' επέκταση στη διάγνωση βλαβών σε θαλάμους καύσης, σε μεγάλες πτερωτές φυγόκεντρων συμπιεστών, σε προπέλες πλοίων, σε πτερύγια συμπιεστών και στροβίλων όπως και σε στρεφόμενες ατράκτους. Στη συνέχεια θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση ορισμένων εφαρμογών που

αφορούν στην ανίχνευση δομικών βλαβών, σε βιοϊατρικές εφαρμογές, σε διαδικασίες βαθμονόμησης, στην ανίχνευση βλαβών σε κατασκευές πολιτικών μηχανικών και στις εξειδικευμένες περιπτώσεις της μέτρησης των κραδασμών σε θαλάμους καύσης και σε μεγάλες πτερωτές φυγόκεντρων συμπιεστών. [2,5,6,7,8,9,10,11]

1.5.1 Ανίχνευση δομικών βλαβών.

Η ικανότητα του ελέγχου μιας δομής και της ανίχνευσης μιας βλάβης σε κάποιο πρώιμο στάδιο αποτελεί κοινή προσδοκία κυρίως στις μηχανολογικές και στις αεροναυπηγικές εφαρμογές. Οι τρέχουσες μέθοδοι διάγνωσης βλαβών είναι είτε οπτικές είτε τοπικές εξειδικευμένες μέθοδοι όπως ακουστικές, υπερηχητικές, μαγνητικές, θερμικές, ή μέθοδοι που περιλαμβάνουν ραδιογραφήματα και δινορεύματα. Ο βασικότερος λόγος που ενθαρρύνει τη χρήση των LDV είναι η αδυναμία των συμβατικών μεθόδων στο να παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε εφαρμογές που αφορούν εξειδικευμένα υλικά, όπως είναι τα σύνθετα. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ένα πλήθος επιφανειών, ώστε να είναι ελαφρά αλλά συγχρόνως σκληρά και δύσκαμπτα. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στις μηχανολογικές εφαρμογές και κυρίως στις αεροναυπηγικές.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των SLDV (Scanning Laser Doppler Vibrometers) αφορούν στη δυνατότητα ανάλυσης μεγάλων δομών, όπως για παράδειγμα ένα ολόκληρο αεροσκάφος, σε ένα πλέγμα σημείων υψηλής χωρικής ανάλυσης και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις αεροναυπηγικές εφαρμογές όπου η διάγνωση των βλαβών πρέπει να πραγματοποιείται σύντομα και κατά τη διάρκεια των δοκιμών συντήρησης. Σε αυτού του είδους τις εφαρμογές, ο περιορισμός που μπορεί να θέσει ένα SLDV είναι η απόσταση στην οποία θα πρέπει να στηθεί και η οποία ίσως χρειάζεται να είναι ιδιαίτερα μεγάλη αν οι δομές που πρόκειται να αναλυθούν είναι μεγάλου μεγέθους.

Μια ακόμη εφαρμογή που αφορά στη ανίχνευση δομικών βλαβών αφορά στη χρήση των Ultrasonic LDV, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα πρόκλησης κλονισμών υψηλής συχνότητας στις διάφορες δομές. Αυτή η μη παρεμβατική τεχνική διέγερσης είναι ικανή να παράξει υπερηχητικά κύματα διαμέσου των δομών, τα οποία ανιχνεύονται στη συνέχεια από τα LDV. Ανωμαλίες κατά τη διάδοση του κύματος δηλώνουν την ύπαρξη κάποιας αστοχίας ή κάποιου ελαττώματος στην υπό εξέταση δομή. [2, 5]

1.5.2 Βιοϊατρικές εφαρμογές.

Η άνευ επαφής φύση των μετρήσεων των LDV έχει συμβάλλει στη διεύρυνση της χρήσης τους σε διάφορους ιατρικούς κλάδους. Έχουν χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα στο μηχανικό χαρακτηρισμό των τενόντων όπου δυναμικές παράμετροι,

όπως είναι η αναλογία απόσβεσης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και κατά τη διάρκεια εκτέλεσης πειραμάτων in-vivo.

Έχουν πραγματοποιηθεί επίσης μετρήσεις που αφορούν στη μεμβράνη του τυμπάνου, όπου ένα ομοεστιακό παρεμβαλλόμετρο ετεροδυνών κατασκευάστηκε ειδικά γι' αυτό το σκοπό. Τα LDV έχουν χρησιμοποιηθεί και στη διάγνωση δομικών προβλημάτων των δοντιών, όπου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε τεχνητά ελαττωματικά δόντια, τα οποία διεγέρθηκαν μέσω της εφαρμογής παλμών λέιζερ.

Έχουν χρησιμοποιηθεί και σε έρευνες που αφορούν σε εμφυτεύσιμες καρδιακές συσκευές, όπως είναι οι καρδιακές βαλβίδες, οι οποίες χρειάζονται ακριβή διαγνωστική ανάλυση ώστε να προβλεφθούν οι κίνδυνοι και τα ρίσκα της αστοχίας τους. Ο έλεγχος του καρδιακού παλμού και γενικότερα η καρδιακή δραστηριότητα αποτελεί ένα ακόμη πεδίο της εφαρμογής των LDV. Τέλος, έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των καρδιακών παλμών στη μονάδα του χρόνου, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά της κίνησης της εξωτερικής επιφάνειας του ανθρώπινου στέρνου σε κάποια καρδιοαγγειακά σημεία ή στη θέση της καρωτίδας. [2]

1.5.3 Βαθμονόμηση.

Η Laser Doppler Interferometry εφαρμόζεται κατά τη διαδικασία της πρώτης βαθμονόμησης των επιταχυνσιομέτρων και έχει υιοθετηθεί ως ένα διεθνές πρότυπο. [2]

1.5.4 Ανίχνευση βλαβών σε εφαρμογές πολιτικών μηχανικών.

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για τη χρήση των οπτικών συστημάτων λέιζερ σε εφαρμογές πολιτικών μηχανικών. Ωστόσο, η χρήση τους παρουσιάζει πολλές δυσκολίες που σχετίζονται κυρίως με τη μη οπτική συνεργασία των επιφανειών των υπό δοκιμή δομών, όπως και στην αναγκαιότητα της διεξαγωγής των δοκιμών από μεγάλες αποστάσεις ώστε να ληφθούν οι κατάλληλες πληροφορίες που θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για τις υπόψη δομές.

Αν και τα LDV θεωρούνται ακόμη πρωτότυπα συστήματα στις εφαρμογές των πολιτικών μηχανικών, έχουν ήδη βρει εφαρμογή σε δοκιμές σε ιστορικά θέατρα, σε γέφυρες, σε αεριζόμενους τοίχους και σε πύργους κάστρων. [2]

1.5.5 Μέτρηση κραδασμών σε θαλάμους καύσης.

Η χρήση των LDV επιτρέπει τη μέτρηση των δομικών κραδασμών ενός βιομηχανικού θαλάμου καύσης ακόμη και με την παρουσία της φλόγας, εφόσον βέβαια λαμβάνεται ιδιαίτερη φροντίδα ώστε να ελαχιστοποιείται η οπτική διαδρομή της δέσμης

του λέιζερ εντός των περιοχών της φλόγας όπου εμφανίζουν υψηλές θερμοκρασιακές κλίσεις. Αυτή η μέθοδος μας επιτρέπει να αποκτήσουμε πειραματικά δεδομένα σε συνθήκες λειτουργίας, τα οποία χρειάζονται σε διαδικασίες μοντελοποίησης και ιδιαίτερα όταν αφορούν σε σύνθετες δομές και σε περιβάλλον θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. [6]

1.5.6 Μέτρηση κραδασμών σε μεγάλες πτερωτές.

Η επιτυχία της εφαρμογής των LDV σε μετρήσεις κραδασμών σε μεγάλες πτερωτές φυγόκεντρων συμπιεστών έγκειται στην ικανότητά τους να καταγράφουν πολύ χαμηλά σήματα κραδασμών (της τάξης των νανόμετρων) με υψηλή χωρική ανάλυση, στα πλαίσια ενός βιομηχανικού περιβάλλοντος και σε εξαιρετικά περιορισμένο χρόνο δοκιμών. [7]

1.6 Όρια της τρέχουσας τεχνολογίας των LDV.

1.6.1 Ανάλυση των LDV.

Από τις δηλωμένες προδιαγραφές των διαθέσιμων συστημάτων της αγοράς, προκύπτει ότι η χρήση των LDV ενδείκνυται για τις συνήθεις μηχανολογικές εφαρμογές. Ωστόσο υπάρχουν κάποιοι τομείς όπου αυτές οι τιμές μπορεί να είναι κρίσιμες, όπως για παράδειγμα στον τομέα των μικροσυστημάτων. Οι αναλογικοί αποκωδικοποιητές έχουν ανάλυση από 0,3μm/sec ενώ οι ψηφιακοί από 0,01μm/sec, αλλά όπως συμβαίνει σε όλα τα ψηφιακά συστήματα οι επιδόσεις τους εξαρτώνται από το εύρος της συχνότητας.

1.6.2 Αξιολόγηση της αβεβαιότητας.

Οι πηγές της αβεβαιότητας στις μετρήσεις που βασίζονται στην Laser Doppler Interferometry μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες, σε αυτές που σχετίζονται με οπτικές παραμέτρους και σε αυτές που σχετίζονται με τους συμβατικούς, αναλογικούς επεξεργαστές σημάτων. Η πρώτη κατηγορία σχετίζεται με το μήκος κύματος του λέιζερ και η αβεβαιότητα της είναι μικρότερη του 0,0001% στην πηγή του λέιζερ και σε συνδυασμό με την εγγενή αβεβαιότητα του ανιχνευτή φωτός της συσκευής, δεν επηρεάζει την ποιότητα του σήματος Doppler. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι το μήκος κύματος του λέιζερ εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από την πίεση του μέσου από το οποίο διέρχεται. Σε αυτό το πλαίσιο, υπάρχουν κάποια LDV που υιοθετούνται στη βαθμονόμηση αισθητήρων και τα οποία μετράνε αυτές τις περιβαλλοντικές παραμέτρους και διορθώνουν τα προσκτημένα δεδομένα λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους

παράγοντες. Βέβαια από τη στιγμή που η θερμοκρασία και η πίεση του περιβάλλοντος μετρώνται από αισθητήρες που βρίσκονται στην κεφαλή του λέιζερ και η διαφοροποίηση τους μπορεί να συμβαίνει κάποια στιγμή εντός της οπτικής διαδρομής της δέσμης, είναι δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια η ταλάντωση της τιμής του μήκους κύματος και η επιρροή της στο σήμα εξόδου του LDV.

Από την άλλη μεριά, η επεξεργασία του αναλογικού σήματος επηρεάζει σφαιρικά την αβεβαιότητα, καθώς ο αποκωδικοποιητής υπόκειται σε γήρανση και σε θερμική καταπόνηση. Κατά συνέπεια, εξελίχθηκαν οι ψηφιακοί επεξεργαστές όπου στην περίπτωση αυτή η αποκωδικοποίηση και τα φίλτρα αφορούν το λογισμικό και μπορούν να βασιστούν σε ένα μικροεπεξεργαστή ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

1.6.3 Η απόσταση στησίματος των LDV.

Η μεγαλύτερη απόσταση από την οποία μπορεί ένα LDV σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του να καταγράψει μια σωστή μέτρηση φτάνει τα 300m, αλλά εξαρτάται από τις ιδιότητες διασκορπισμού της δέσμης της υπό μελέτη επιφάνειας. Εάν η επιφάνεια έχει επικαλυφθεί με αντανακλαστικό χαρτί, το οποίο μεγιστοποιεί το επίπεδο του σήματος τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόσταση μέτρησης που μπορεί να επιτευχθεί. Εάν όμως η επιφάνεια είναι λιγότερο κατάλληλη δε μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις πέρα από μια απόσταση κάποιων λίγων μέτρων. Αυτός είναι ένας πολύ σημαντικός περιορισμός για τις σύγχρονες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην αεροναυπηγική όπου τα LDV χρησιμοποιούνται για μετρήσεις σε πολύ μεγάλες δομές, όπως σε ατράκτους που συνήθως είναι μαύρες, το χειρότερο δηλαδή χρώμα για τη διάχυση του φωτός.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι βέλτιστες αποστάσεις είναι εκείνες που αντιστοιχούν σε κάποιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος της δέσμης του λέιζερ (π.χ. $204 \pm 1\text{mm}$) και οι οποίες αναγράφονται στα εγχειρίδια χρήσης των συσκευών.

1.6.4 Χωρική ανάλυση των SLDV.

Η χωρική ανάλυση που επιτυγχάνεται από τα LDV σε διαδικασίες σάρωσης σχετίζεται με το μικρότερο μέγεθος του ίχνους της δέσμης του λέιζερ, το οποίο κυμαίνεται από 30μm για αποστάσεις περίπου 100μm μέχρι 2,5mm για αποστάσεις της τάξης των 10m. Στην πράξη, όταν ένα LDV χρησιμοποιείται σε διαδικασίες σάρωσης σε ένα τυπικό μηχανολογικό στόχο, η χωρική του ανάλυση καθορίζεται από την ανάλυση του συστήματος σάρωσης.

1.6.5 Περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η ευαισθησία στους κραδασμούς της βάσης αποτελεί ένα βασικό περιορισμό στη χρήση των LDV σε εφαρμογές που αφορούν σκληρές βιομηχανικές περιπτώσεις και σε περιπτώσεις ποιοτικού ελέγχου γραμμών παραγωγής.

Επιπρόσθετα, το σήμα των LDV μπορεί να επιδεινωθεί εξαιτίας της ύπαρξης σκόνης στο περιβάλλον που διεξάγονται οι μετρήσεις και επιπλέον από την ύπαρξη του δείκτη της μεταβολής της διάθλασης εξαιτίας της μεταβλητότητας της πίεσης του μέσου από το οποίο διέρχεται η δέσμη του λέιζερ.

1.6.6 Αναλογία σήματος προς θόρυβο.

Βασικοί περιορισμοί στην ενοργάνωση των LDV τίθενται από την επίδραση του στίγματος και της χαμηλής αναλογίας σήματος προς θόρυβο κατά τη λήψη μετρήσεων σε επιφάνειες χαμηλής ικανότητας διάχυσης.

Στην περίπτωση μας, το στίγμα αποτελεί την εικόνα που παράγεται όταν η δέσμη του λέιζερ επιδρά με μια τραχεία επιφάνεια. Τα κύματα που αποτελούν τη δέσμη διαχέονται από την επιφάνεια και προκαλείται μια διανομή της έντασης του φωτός σε σκοτεινές και φωτεινές ζώνες. Η υπέρθεση του παρεμβαλλόμενου σχεδίου που εμπεριέχει το επιθυμητό σήμα φωτός, που συμπεριλαμβάνει και τη συχνότητα Doppler, εισάγει αβεβαιότητα κατά τη διαδικασία της αποσύνθεσης κατά την οποία εξάγεται η πληροφορία της ταχύτητας. [2]

1.7 Η παρούσα διπλωματική.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μέτρηση των κραδασμών σε στροβιλομηχανές με χρήση συστήματος λέιζερ και πιο συγκεκριμένα με χρήση της συσκευής Industrial Laser Doppler Vibrometer Type 8338 (ή VH-1000-D). Αναζητήθηκαν αρχικά στη διεθνή βιβλιογραφία πληροφορίες σχετικές με τη χρήση ανάλογων συστημάτων όπως και τα στοιχεία που προέκυψαν από την εφαρμογή τους στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια πρώτη γνωριμία με το σύστημα λέιζερ όπου και παρουσιάζονται τα εργονομικά χαρακτηριστικά του, η αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζεται η λήψη των μετρήσεων καθώς και κάποια βασικά στοιχεία της θεωρίας των ταλαντώσεων. Δίδονται επίσης οδηγίες για την επιλογή των κατάλληλων για την κάθε περίπτωση παραμέτρων και για την προετοιμασία και τη συνδεσμολογία της συσκευής, ώστε να είναι έτοιμη προς χρήση.

Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί η διαδικασία της πιστοποίησης του VH-1000-D, κατά την οποία πραγματοποιείται μια σειρά δοκιμών ώστε να επαληθευτεί η ακριβής

λειτουργία του οργάνου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μέτρησης. Ως μέτρο σύγκρισης για τον έλεγχο της ακρίβειας λαμβάνεται ο βαθμονομητής επιταχυνσιομέτρων Calibration Exciter Type 4294.

Οι πρώτες δοκιμές αφορούν στη μελέτη της συμπεριφοράς του VH-1000-D στις περιπτώσεις που η δέσμη του λέιζερ προσπίπτει στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες. Προσαρμόζουμε επίσης πάνω στο διεγέρτη επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας ώστε να μελετηθεί η απόκριση του συστήματος σε σχέση με την τραχύτητα της επιφάνειας. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ένα σύνολο δοκιμών μεταβάλλοντας την απόσταση του VH-1000-D από το διεγέρτη σε ευθεία γραμμή, ώστε να μελετηθεί η ευαισθησία των μετρήσεων σε σχέση με την απόσταση. Στις αρχικές δοκιμές μεταβάλλουμε κάθε φορά την εστίαση ώστε να έχουμε πάντα τη βέλτιστη δυνατή για την κάθε απόσταση, ενώ στις επόμενες διατηρείται σταθερή η εστίαση όπως αυτή ρυθμίζεται για κάποια συγκεκριμένη απόσταση αναφοράς. Τέλος, ελέγχεται η απόκριση του συστήματος όταν μεταξύ του VH-1000-D και του διεγέρτη παρεμβάλλονται καθρέπτες, οι οποίοι εκτρέπουν τη δέσμη του λέιζερ και την κατευθύνουν στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του VH-1000-D για τη μέτρηση των κραδασμών σε διατάξεις αεριοστροβίλων του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π. Η πρώτη σειρά μετρήσεων πραγματοποιείται στη διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών, όπου παράλληλα με το VH-1000-D χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των κραδασμών και συμβατικά επιταχυνσιόμετρα στις ίδιες θέσεις της μηχανής, ώστε να διαπιστωθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και η αξιοπιστία του συστήματος λέιζερ. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια ακόμη σειρά δοκιμών στη διάταξη του μικρού στροβιλοκινητήρα AMT Olympus στο δοκιμαστήριο του εργαστηρίου. Στην περίπτωση αυτή, το VH-1000-D αποτελεί τη μοναδική μέθοδο μέτρησης των κραδασμών της μηχανής.

2

Εισαγωγή στη μέθοδο μετρήσεων

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του συστήματος λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε στη μετέπειτα διεξαγωγή των δοκιμών. Παρουσιάζονται τα εργονομικά χαρακτηριστικά του, η αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζεται η λήψη των μετρήσεων καθώς και κάποια βασικά στοιχεία της θεωρίας των ταλαντώσεων. Τέλος, δίδονται οδηγίες για την επιλογή των κατάλληλων για την κάθε περίπτωση παραμέτρων και για την προετοιμασία και τη συνδεσμολογία της συσκευής, ώστε να είναι έτοιμη προς χρήση.

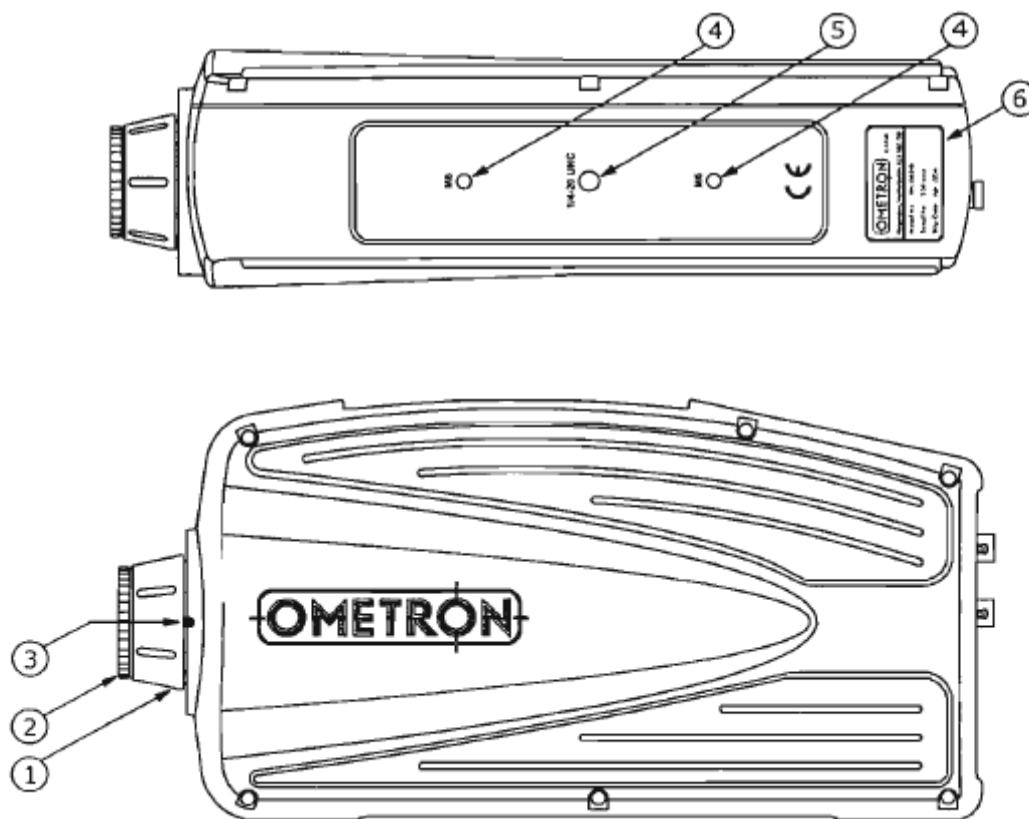
2.1 Γενική περιγραφή του Industrial Laser Doppler Vibrometer Type 8338.

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των δοκιμών είναι η Industrial Laser Doppler Vibrometer Type 8338 (ή VH-1000-D) και παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1. Πρόκειται για ένα μορφοτροπέα κραδασμών άνευ επαφής, υψηλής ακρίβειας και πολλαπλής χρήσης, κατάλληλο για εφαρμογές όπου είναι αδύνατο ή και ανεπιθύμητο να εφαρμόσουμε ένα μορφοτροπέα πάνω στο δονούμενο αντικείμενο. Η ευκολία χρήσης και η ανθεκτική κατασκευή του, το καθιστούν κατάλληλο τόσο για χρήση σε εργαστηριακό όσο και σε βιομηχανικό περιβάλλον.



Σχήμα 2.1: Industrial Laser Doppler Vibrometer Type 8338.

Η άνοψη και η πλάγια όψη του VH-1000-D παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2. Η κάτωψη και η πίσω όψη παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.2: Άνοψη και πλάγια όψη του VH-1000-D.

1. Δακτύλιος εστίασης.

Χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της εστίασης της δέσμης του λέιζερ.

2. Κλείστρο δέσμης.

Το κλείστρο χρησιμοποιείται για τη μη διέλευση της δέσμης του λέιζερ.

3. Κοχλίας σταθεροποίησης της εστίασης.

Ο κοχλίας τύπου Allen χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση του δακτυλίου εστίασης σε σταθερή θέση, αφού πρώτα ρυθμιστεί η εστίαση της δέσμης.

4. Εσοχές στήριξης M6.

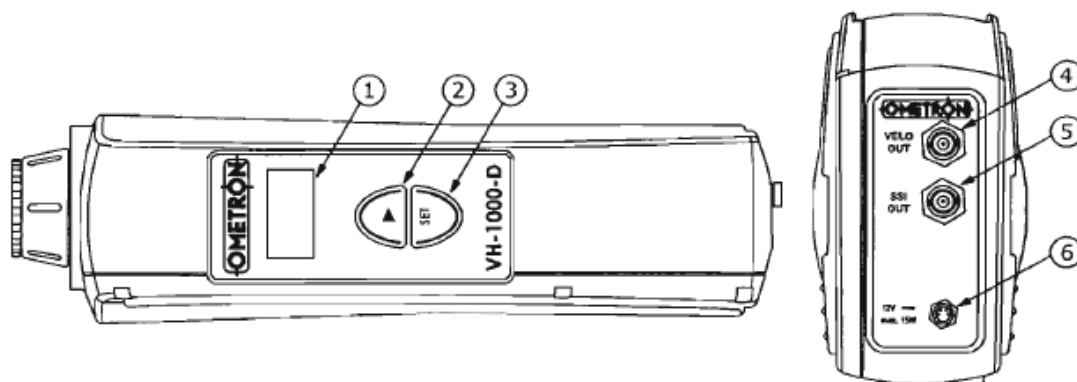
Με τη βοήθεια των δύο εσοχών M6, το VH-1000-D μπορεί να στηριχθεί σε ψυχόμενες μεταλλικές επιφάνειες.

5. Εσοχή στήριξης 1/4"-20UNC.

Με τη βοήθεια αυτής της εσοχής, το VH-1000-D μπορεί να στηριχθεί σε ένα τρίποδο φωτογραφικών μηχανών.

6. Ετικέτα προσδιορισμού.

Πάνω σε αυτήν την ετικέτα αναγράφεται μεταξύ άλλων ο αύξοντας αριθμός της συσκευής.



Σχήμα 2.3: Κάτοψη και πίσω όψη του VH-1000-D.

1. Οθόνη υγρών κρυστάλλων με φωτισμό υποβάθρου.

Στην οθόνη εμφανίζονται οι ρυθμίσεις που έχουν επιλεγεί για το μοροτροπέα κραδασμών. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις ρυθμίσεις αναφέρονται στην παράγραφο 2.3.

2. Κομβίο επιλογής.

Πιέζοντας διαδοχικά αυτό το κομβίο μετακινείται στην οθόνη ο δρομέας από τη μία παράμετρο στην επόμενη με κυκλική σειρά. Ο δρομέας χρησιμοποιείται για την επιλογή της παραμέτρου που πρέπει να αλλάξει.

3. Κομβίο SET.

Πιέζοντας αυτό το κομβίο αλλάζουμε τη ρύθμιση της επιλεγμένης παραμέτρου.

4. Έξοδος σήματος VELO OUT (BNC jack).

Αποτελεί την έξοδο του αναλογικού σήματος της ταχύτητας. Η τάση σε αυτήν την έξοδο είναι ανάλογη προς τη στιγμιαία ταχύτητα κραδασμών του αντικειμένου.

5. Έξοδος σήματος SSI OUT (BNC jack).

Η συνεχής τάση σε αυτήν την έξοδο είναι ανάλογη προς την ποσότητα του φωτός που διασκορπίζεται πίσω (Signal Strength Information). Για να επιτευχθεί δυναμική συμπίεση η τάση ακολουθεί ένα λογαριθμικό νόμο. Αυτό το σήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει εξωτερικά τις οπτικές συνθήκες μέτρησης.

6. Υποδοχή για σύνδεση με συνεχή τάση 12V.

Υποδοχή για τη σύνδεση με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος VH-PS ή με το πακέτο μπαταριών VH-BAT. [2]

Τα τεχνικά σχέδια του VH-1000-D παρατίθενται στο παράρτημα Π1.

2.2 Η αρχή λειτουργίας.

Το VH-1000-D μετρά την ταχύτητα των κραδασμών σύμφωνα με την αρχή του παρεμβαλλομέτρου ετεροδυνών (heterodyne interferometer), κατά την οποία παράγεται ένα υψηλής συχνότητας μεταφερόμενο σήμα στον ανιχνευτή φωτός (photo detector) με

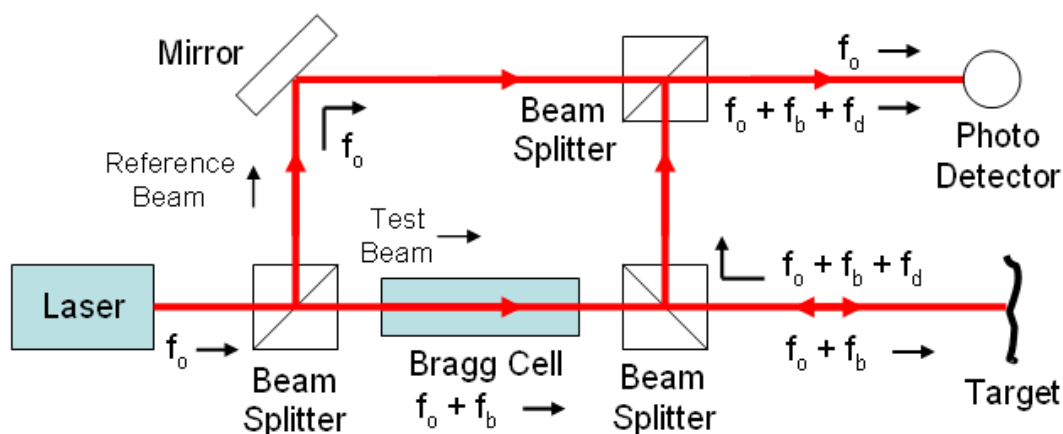
τη βοήθεια ενός κελιού Bragg (Bragg cell). Η δέσμη του λέιζερ εστιάζεται στο δονούμενο αντικείμενο, όπως παρατηρούμε και στο σχήμα 2.4, και στη συνέχεια διασκορπίζεται πίσω. Η ταχύτητα και το εύρος του δονούμενου αντικειμένου δημιουργούν μια συχνότητα ή διαφορά φάσης εξαιτίας του φαινομένου Doppler. Η δέσμη λοιπόν υπόκειται σε μια μικρή μεταβολή της συχνότητας της, η οποία περιγράφεται ως συχνότητα Doppler f_d . Η συχνότητα Doppler είναι μια συνάρτηση της ταχύτητας v του στοιχείου κατά την κατεύθυνση επιστροφής της δέσμης από το στόχο και υπολογίζεται από την εξίσωση 2.1.

$$f_d = 2 \cdot \frac{v}{\lambda} \quad (2.1)$$

Όπου λ το μήκος κύματος της δέσμης. Το Bragg cell προκαλεί επίσης μια οπτική μεταβολή στη συχνότητα της δέσμης αναφοράς. Έπειτα από την υπέρθεση της μέτρησης και της δέσμης αναφοράς δημιουργείται στον photo detector ένα ηλεκτρικό σήμα με στιγμιαία συχνότητα:

$$f_c(t) = f_b + f_d(t) = f_b + 2 \cdot \frac{v(t)}{\lambda} \quad (2.2)$$

Αυτό αποτελεί ένα μεταφερόμενο σήμα συχνότητας με κεντρική συχνότητα την f_b , η οποία ρυθμίζεται από την ενδεδειγμένη συχνότητα Doppler f_d . Μέσα από την αποσύνθεση των συχνοτήτων μπορεί να αποκωδικοποιηθεί το σήμα της ταχύτητας. Η αποσύνθεση της συχνότητας Doppler βασίζεται σε μια καθαρά ψηφιακή διαδικασία. Σε αντίθεση με τα συμβατικά αναλογικά όργανα μέτρησης κραδασμών, η ακρίβεια της μέτρησης είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη της γήρανσης και των περιβαλλοντικών επιρροών.



Σχήμα 2.4: Σχηματική περιγραφή της διαδρομής του σήματος. [14]

Στην περίπτωση που το λέιζερ δε μπορεί να εστιάσει στο στόχο σε ευθεία γραμμή λόγω της θέσης αυτού, μπορούμε να κατευθύνουμε τη δέσμη προς το στόχο είτε εστιάζοντας προς αυτόν έχοντας στήσει το VH-1000-D υπό γνωστή γωνία, είτε εκτρέποντας τη δέσμη του λέιζερ με χρήση ειδικών καθρεπτών. Στην περίπτωση αυτή

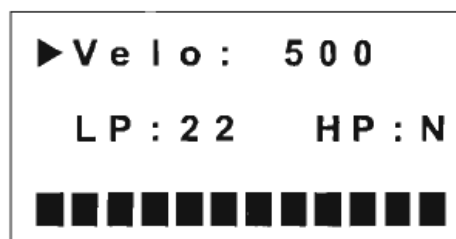
πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση τόσο του λείζερ όσο και των καθρεπτών, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα λόγω απόκλισης από τις ενδεδειγμένες για την κάθε περίπτωση μοίρες εκτροπής της δέσμης.

Η μέτρηση που λαμβάνουμε στις παραπάνω περιπτώσεις δεν αντιπροσωπεύει το πραγματικό μέγεθος του κραδασμού καθώς θα πρέπει να γίνει διόρθωση με το αντίστοιχο συνημίτονο της γωνίας εκτροπής, όπως προκύπτει από απλή γεωμετρία. Η γωνία εκτροπής θ εκτιμάται ως η απόκλιση από τη νοητή ευθεία που θα ένωνε το VH-1000-D με το στόχο αν η μέτρηση πραγματοποιούταν σε ευθεία γραμμή. Στην περίπτωση παρεμβολής καθρεπτών η γωνία εκτροπής υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη διαδρομή της δέσμης του λείζερ από τον τελευταίο καθρέπτη προς στο στόχο. Η διορθωμένη μέση ενεργή τιμή της ταχύτητας του κραδασμού προκύπτει από την εξίσωση 2.3.

$$RMS_Velocity_{REAL} = \frac{RMS_Velocity_{MEASUREMET}}{\cos \theta} \quad (2.3)$$

2.3 Επιλογή ρυθμίσεων.

Η άνευ επαφής μέτρηση των κραδασμών μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ εύκολα με τη βοήθεια του VH-1000-D σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές στο εύρος των ακουστικών συχνοτήτων. Αφού εστιάσουμε τη δέσμη του λείζερ στο δονούμενο αντικείμενο, συνεχίζουμε με την επιλογή του κατάλληλου εύρους της ταχύτητας της μέτρησης και του κατάλληλου φίλτρου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων, όπως και με τη ρύθμιση του φίλτρου αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων. Το VH-1000-D επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων υψηλής ακρίβειας στο εύρος συχνοτήτων από 0.5Hz έως 22kHz. Στο σχήμα 2.5 δίδεται ένα παράδειγμα για την εμφάνιση των ρυθμίσεων στην οθόνη.



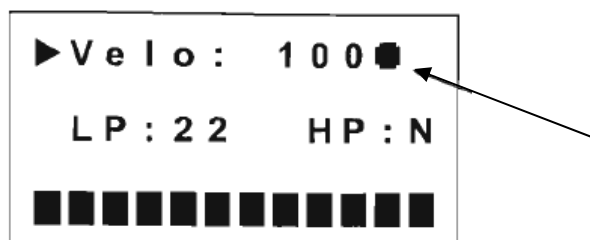
Σχήμα 2.5: Παράδειγμα εμφάνισης των επιλεγμένων ρυθμίσεων στην οθόνη.

2.3.1 Επιλογή του εύρους της ταχύτητας των μετρήσεων.

Το VH-1000-D προσφέρει τρεις επιλογές για τη ρύθμιση του εύρους της ταχύτητας των μετρήσεων, των οποίων οι αντίστοιχες τιμές σε πλήρη κλίμακα (mm/sec) εμφανίζονται στη γραμμή Velo της οθόνης της συσκευής (20 mm/sec, 100 mm/sec και 500 mm/sec). Αν διαιρέσουμε τις παραπάνω τιμές δια του 4, τιμή στην οποία αντιστοιχεί

η διακύμανση $\pm 4V$ της τάσης εξόδου, λαμβάνουμε τους παράγοντες σχετικής κλίμακας για το αναλογικό σήμα εξόδου σε mm/sec/V (5 mm/sec/V, 25 mm/sec/V και 125 mm/sec/V).

Για να βελτιστοποιήσουμε την αναλογία σήματος προς θόρυβο, χρησιμοποιούμε ως γενικό κανόνα την επιλογή του χαμηλότερου δυνατού εύρους ταχύτητας, του οποίου δε θα γίνει υπέρβαση για τις δεδομένες συνθήκες διεξαγωγής των μετρήσεων. Όταν πλησιάζουμε στο να υπερβούμε το επιλεγμένο εύρος (94% της πλήρους κλίμακας), εμφανίζεται ένα κυκλικό σύμβολο δίπλα στην τιμή του εύρους στην οθόνη της συσκευής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να επιλέξουμε το αμέσως μεγαλύτερο εύρος ταχύτητας.



Σχήμα 2.6: Εμφάνιση στην οθόνη του δείκτη υπέρβασης του επιλεγμένου εύρους.

2.3.2 Επιλογή φίλτρων αποκοπής συχνοτήτων.

Το VH-1000-D διαθέτει ένα ψηφιακό φίλτρο αποκοπής υψηλών συχνοτήτων κι ένα αναλογικό φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων.

➤ Ψηφιακό φίλτρο αποκοπής υψηλών συχνοτήτων:

Σε αντίθεση με τα συνήθη αναλογικά φίλτρα, τα τρία διαθέσιμα όρια συχνοτήτων των 1kHz, 5kHz και 22kHz ορίζουν το άνω όριο συχνοτήτων για μετρήσεις συγκεκριμένου εύρους (πλάτους $\pm 0.1\text{dB}$), αλλά όχι και το σημείο -3dB . Η μεταστροφή από τη ζώνη αποδοχής στη ζώνη αποκοπής συχνοτήτων παρουσιάζει μια απότομη μείωση συχνότητας της τάξης των 120dB/dec , με συνέπεια την αποτελεσματική καταστολή του θορύβου και των υψηλότερων συχνοτήτων. Το όριο συχνότητας του φίλτρου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων που έχει επιλεγεί εμφανίζεται στην οθόνη στο LP.

➤ Αναλογικό φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων:

Για την καταστολή των κραδασμών χαμηλών συχνοτήτων του υποβάθρου, το VH-1000-D είναι εφοδιασμένο με ένα επιλέξιμο υπερβατικό φίλτρο τύπου Butterworth 3^{ης} τάξης, με κατώφλι συχνοτήτων τα 100Hz (-3dB). Το φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων φαίνεται είτε ως ενεργοποιημένο (Y), είτε ως απενεργοποιημένο (N) στην οθόνη στο HP. Το φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων είναι ιδανικό για την πρόσκτηση σημάτων (signal acquisition), εάν εργαζόμαστε με υψηλή στάθμη θορύβου του υποβάθρου. [12]

2.4 Επιλογή βέλτιστης απόστασης.

Η πηγή φωτός του VH-1000-D είναι μια δέσμη λέιζερ από νέον και ήλιο. Πρόκειται για μια δέσμη πολλαπλού τύπου, στην οποία μπορεί να υπάρχει το μέγιστο και των δύο τύπων. Η υπέρθεση των δύο τύπων κάνει την ένταση του τελικού οπτικού σήματος να ποικίλει περιοδικά ανάλογα με την απόσταση μεταξύ του VH-1000-D και του στόχου. Η ένταση του σήματος αυξάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή. Έχουμε δηλαδή τη μέγιστη ορατότητα αν το οπτικό μονοπάτι αποτελεί κάποιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος (cavity length) του λέιζερ (138mm±1mm). Αν το μήκος του οπτικού μονοπατιού είναι ίσο με το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ του laser και του στόχου (η δέσμη κατευθύνεται προς το στόχο κι επιστρέφει), η μέγιστη ορατότητα εμφανίζεται μια φορά για κάθε μήκος κύματος.

Στην πράξη, δεν απαιτείται η αναζήτηση της βέλτιστης ορατότητας, καθώς το VH-1000-D είναι αρκετά ευαίσθητο, ώστε να μπορεί να πραγματοποιήσει κάποια μέτρηση ακόμη και κοντά στο όριο της ελάχιστης ορατότητας. Το ελάχιστο της ορατότητας υποδεικνύεται κατά τη φάση της προθέρμανσης του laser (απαιτούνται περίπου 20min), όπου παρατηρείται περιοδική διακύμανση του επιπέδου του σήματος. Ωστόσο, θα ήταν προτιμότερο το στήσιμο της συσκευής να πραγματοποιείται σε κάποια απόσταση που να προσεγγίζει τη βέλτιστη ορατότητα. Οι βέλτιστες αποστάσεις δίδονται από την εξίσωση:

$$L = 100mm + (n \cdot I) \tag{2.4}$$

όπου $n = 1,2,3,\dots$ και $I=138mm\pm 1mm$

Μερικές από αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

100	790	1480	2170	2860
238	928	1618	2308	2998
376	1066	1756	2446	3136
514	1204	1894	2584	3274
652	1342	2032	2722	...

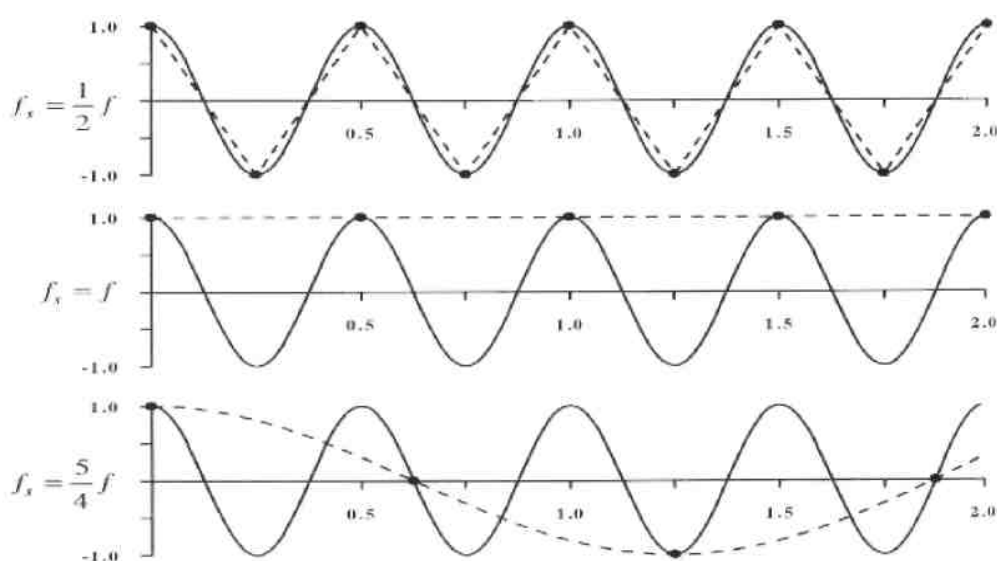
Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές αποστάσεις σε mm για την επίτευξη της βέλτιστης ορατότητας.

2.5 Επεξεργασία χρονικών σημάτων.

Τα σήματα είναι συνεχείς χρονικές εξισώσεις. Εντούτοις για την επεξεργασία τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων απαιτείται η λήψη και επεξεργασία ενός χρονικά πεπερασμένου πλήθους τιμών. Αν και ο χρόνος ανάμεσα σε δυο συνεχόμενες δειγματοληψίες μπορεί να είναι τυχαίος, επιλέγεται παρ' όλα αυτά να είναι σταθερός. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται περίοδος δειγματοληψίας (T), ενώ η αντίστοιχη συχνότητα ονομάζεται συχνότητα δειγματοληψίας (f_s).

Η συχνότητα δειγματοληψίας θα πρέπει, όπως ορίζει το θεμελιώδες θεώρημα δειγματοληψίας, να είναι μεγαλύτερη του διπλάσιου της μέγιστης συχνότητας που εμφανίζεται στο συνεχές φάσμα ($f_s \geq 2f$). Ο περιορισμός αυτός στη λήψη ενός φάσματος προέρχεται από την εμφάνιση του φαινομένου της αναδίπλωσης φάσματος (aliasing [1]). Το φαινόμενο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία εσφαλμένης πληροφορίας, εμφανίζοντας την ύπαρξη κυματομορφών που δεν υπάρχουν στο μετρούμενο σήμα, όπως παρατηρείται και στο σχήμα 2.7. Η αποφυγή του φαινομένου της αναδίπλωσης εξασφαλίζεται με χρήση φίλτρων αποκοπής υψηλών συχνοτήτων (low pass filters). Για μια δεδομένη συχνότητα δειγματοληψίας f_s , η συχνότητα αποκοπής των φίλτρων πρέπει να είναι το πολύ $f_s/2$. Επειδή οι χαρακτηριστικές των φίλτρων δεν είναι ποτέ ιδανικές, δηλαδή η καμπύλη αποκοπής του φίλτρου δεν είναι κάθετη αλλά έχει κάποια κλίση, συνήθως στην πράξη χρησιμοποιείται μια μέγιστη συχνότητα αποκοπής $f_c = 0.4f_s$.

Το πλεονέκτημα της μετατροπής των συνεχών φασμάτων σε διακριτά, έγκειται στην ευκολία επεξεργασίας των τελευταίων σε σχέση με τα συνεχή. Ο πλέον κοινός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση διακριτών σημάτων είναι ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (FFT). Σύμφωνα με τον μετασχηματισμό, το πλήθος των δειγμάτων N είναι κατάλληλη δύναμη του 2 (αλγόριθμοι FFT ρίζας του 2), με συνήθεις τιμές τα 2048 ή 4096 δείγματα.



Σχήμα 2.7: Αναδίπλωση φάσματος.

2.6 Διεξαγωγή των μετρήσεων.

Για να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις ακριβείας με το VH-1000-D απαιτείται η εκτέλεση της διαδικασίας που περιγράφεται στη συνέχεια.

2.6.1 Προετοιμασία.

1. Τοποθετούμε το κλείστρο της δέσμης του λέιζερ στη θέση κλειστό.
2. Εφαρμόζουμε το VH-1000-D σε μια σταθερή βάση στήριξης, π.χ. σε ένα τρίποδο. Σε περίπτωση θορύβου γειωμένων βρόχων πρέπει να εγκαταστήσουμε το VH-1000-D με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ηλεκτρικά μονωμένο.
3. Στήνουμε το VH-1000-D ώστε το κλείστρο να δείχνει προς την κατεύθυνση του υπό μελέτη αντικείμενου σε ευθεία γραμμή. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό, εστιάζουμε στο στόχο υπό γνωστή γωνία ή χρησιμοποιούμε καθρέπτες για την εκτροπή της δέσμης προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Για μέτρηση σε ευθεία γραμμή κι εφόσον είναι δυνατόν, τοποθετούμε το VH-1000-D σε μια βέλτιστη απόσταση από το αντικείμενο.
4. Με τη βοήθεια ενός αλφαδιού διασφαλίζουμε τη σταθερότητα του οριζοντίου επιπέδου πρόσπτωσης της δέσμης.

2.6.2 Καλωδίωση κι έναρξη λειτουργίας.

1. Συνδέουμε το καλώδιο της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος με την υποδοχή 12 V, που βρίσκεται στο πίσω μέρος του VH-1000-D. Η σύνδεση πρέπει να μπορεί να επιτευχθεί εύκολα.
2. Συνδέουμε την παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος σε μια πρίζα. Στην κορυφή του VH-1000-D ανάβει η οθόνη. Η ακτίνα λέιζερ δεν εκπέμπεται ακόμα δεδομένου ότι το κλείστρο είναι κλειστό.
3. Από τώρα και στο εξής, το λέιζερ χρειάζεται μια περίοδο προθέρμανσης περίπου 20 λεπτών, έως ότου φτάσει στη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας.
4. Συνδέουμε τις αναλογικές εξόδους VELO OUT και SSI OUT, οι οποίες βρίσκονται στο πίσω μέρος του VH-1000-D, με τη βοήθεια καλωδίων BNC jack σε ένα κουτί συνδέσεων.
5. Συνδέουμε το κουτί συνδέσεων με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω μιας κάρτας αναλογοψηφιακής μετατροπής (στην περίπτωσή μας είναι η NI-6036, 16bit, 12ch, 200KHz). Ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας πραγματοποιεί το μετασχηματισμό των αναλογικών τάσεων σε ψηφιακούς αριθμούς, οι οποίοι μπορούν να μεταδοθούν απευθείας στον Η/Υ. Στην περίπτωσή μας ο υπολογιστής φέρει το πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων (acquisition program) του εργαστηρίου, το οποίο καταγράφει τα σήματα, υπολογίζει τις μέσες ενεργές τιμές RMS και πραγματοποιεί ανάλυση ταχέως μετασχηματισμού Fourier (FFT-Fast Fourier Transform) υπολογίζοντας τα φάσματα ισχύος. Στα σχήματα 2.8 και 2.9 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία που αφορά τον Η/Υ και την όλη διάταξη αντίστοιχα.

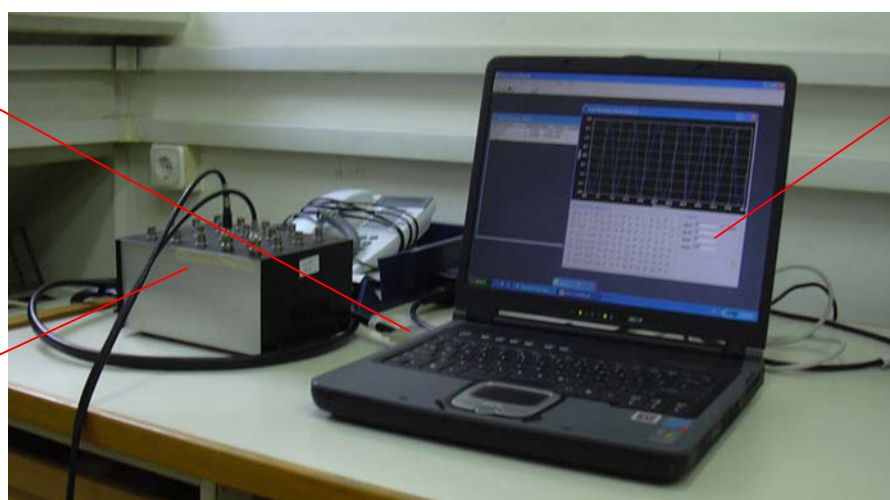
2.6.3 Λήψη μετρήσεων.

1. Ανοίγουμε το κλείστρο γυρίζοντας το δακτύλιο ρύθμισης αριστερόστροφα, κατά το κοίταγμα προς το υπό μελέτη αντικείμενο. Ο δακτύλιος βρίσκεται μπροστά από το φακό της συσκευής και η ακτίνα λέιζερ εκπέμπεται τώρα από αυτή.
2. Εστιάζουμε την ακτίνα του λέιζερ στην επιφάνεια του αντικειμένου χρησιμοποιώντας το δακτύλιο εστίασης. Η αναλογία σήματος προς θόρυβο είναι στο μέγιστο εάν το σήμα εμφανίζεται πλήρες στην οθόνη. Μπορούμε βέβαια να λάβουμε τις μετρήσεις ακόμα κι αν το σήμα δεν είναι πλήρες. Στην περίπτωση αυτή όμως, το σήμα εξόδου περιέχει αυξημένο θόρυβο.
3. Επιλέγουμε το κατάλληλο εύρος ταχύτητας μετρήσεων και ρυθμίζουμε τα φίλτρα για την αποκοπή των χαμηλών και των υψηλών συχνοτήτων.
4. Πραγματοποιούμε τις μετρήσεις μας.

Καθίσταται πλέον σαφές, ότι αντικείμενο μελέτης αποτελεί η δυναμική συμπεριφορά μιας μηχανής και ιδιαίτερα τα ταλαντωτικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Για τη σωστή εκτέλεση των εργασιών είναι απαραίτητη:

1. η γνώση της θεωρίας των ταλαντώσεων
2. η εκτέλεση μετρήσεων ακριβείας των ταλαντωτικών μεγεθών
3. η επεξεργασία των αποτελεσμάτων (συνήθως σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή).

Συνεπώς το σύνολο των εργασιών βασίζεται στο τρίπτυχο θεωρία-μετρήσεις-ανάλυση, κάθε τμήμα του οποίου έχει ξεχωριστή βαρύτητα και σημασία για την επιτυχία των εργασιών.



Σχήμα 2.8: Βασική συνδεσμολογία.



Σχήμα 2.9: Συνδεσμολογία του VH-1000-D με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

2.7 Προτεινόμενες εφαρμογές του VH-1000-D.

- Βιομηχανικές εφαρμογές: έλεγχος των κραδασμών σε αμαξώματα αυτοκινήτων και στα διάφορα εξαρτήματά τους, σε μηχανές (βλ. σχήμα 2.10), σε θερμές εξατμίσεις και σε συστήματα πέδησης.
- Ερευνητικές εφαρμογές: ανάλυση των κραδασμών σε μοντέλα υπό έρευνα μέσα σε σήραγγες αέρα, σχεδιασμός μορφοτροπέων, έλεγχος πεδίου κραδασμών, γενικότερη μέτρηση των κραδασμών χωρίς επαφή.
- Πυρηνικές εφαρμογές: δοκιμές κραδασμών σε μολυσμένο περιβάλλον, μετρώμενων σε μεγάλες αποστάσεις.
- Τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές: ανάλυση των κραδασμών στις παραβολικές κεραίες των πύργων, λόγω του φορτίου του ανέμου.
- Εφαρμογές πολιτικών μηχανικών: δοκιμές κραδασμών σε κτίρια, γέφυρες, εξέδρες, (πλυντήρια – βλ. σχήμα 2.11, τηλεοράσεις, σκούπες), ηλεκτρικά εργαλεία, τμήματα υπολογιστών (CD-ROM και σκληροί δίσκοι).
- Περιβαλλοντικές εφαρμογές: ανάλυση της απορρόφησης του ήχου από υλικά.[12]



Σχήμα 2.10: Παράδειγμα μέτρησης κραδασμών σε πλυντήριο.



Σχήμα 2.11: Παράδειγμα μέτρησης κραδασμών σε μηχανή αυτοκινήτου.

3

Πιστοποίηση του VH-1000-D

Στα πλαίσια της πιστοποίησης του VH-1000-D πραγματοποιήσαμε μια σειρά δοκιμών ώστε να επαληθεύσουμε την ακριβή λειτουργία του οργάνου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μέτρησης. Ως μέτρο σύγκρισης για τον έλεγχο της ακρίβειας λήφθηκε ο βαθμονομητής επιταχυνσιόμετρων Calibration Exciter Type 4294.

Στην πρώτη σειρά δοκιμών η δέσμη του λέιζερ προσπίπτει στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες. Κρατήσαμε τη θέση του VH-1000-D σταθερή και μεταβάλλαμε τη γωνία της θέσης του διεγέρτη. Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο οι μετρήσεις που λαμβάνουμε σε αυτήν την περίπτωση δεν αντιπροσωπεύουν το πραγματικό μέγεθος του κραδασμού καθώς θα πρέπει να γίνει διόρθωση με το αντίστοιχο συνημίτονο της γωνίας εκτροπής. Σκοπός μας λοιπόν είναι να ελέγξουμε αν πράγματι ισχύει η εξάρτηση των μετρήσεων από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης. Επαναλάβαμε τις παραπάνω δοκιμές για τέσσερα αντικείμενα με επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας, τα οποία προσαρμόσαμε στο διεγέρτη ώστε να μελετήσουμε πως επηρεάζει η τραχύτητα την ακρίβεια των μετρήσεων.

Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε ένα σύνολο δοκιμών μεταβάλλοντας την απόσταση του VH-1000-D από το διεγέρτη σε ευθεία γραμμή, ώστε να μελετήσουμε την ευαισθησία των μετρήσεων σε σχέση με την απόσταση. Στις πρώτες δοκιμές μεταβάλλαμε κάθε φορά την εστίαση ώστε να έχουμε πάντα τη βέλτιστη δυνατή για την κάθε απόσταση. Στις επόμενες δοκιμές κρατήσαμε σταθερή την εστίαση όπως αυτή ρυθμίστηκε για κάποια συγκεκριμένη απόσταση αναφοράς.

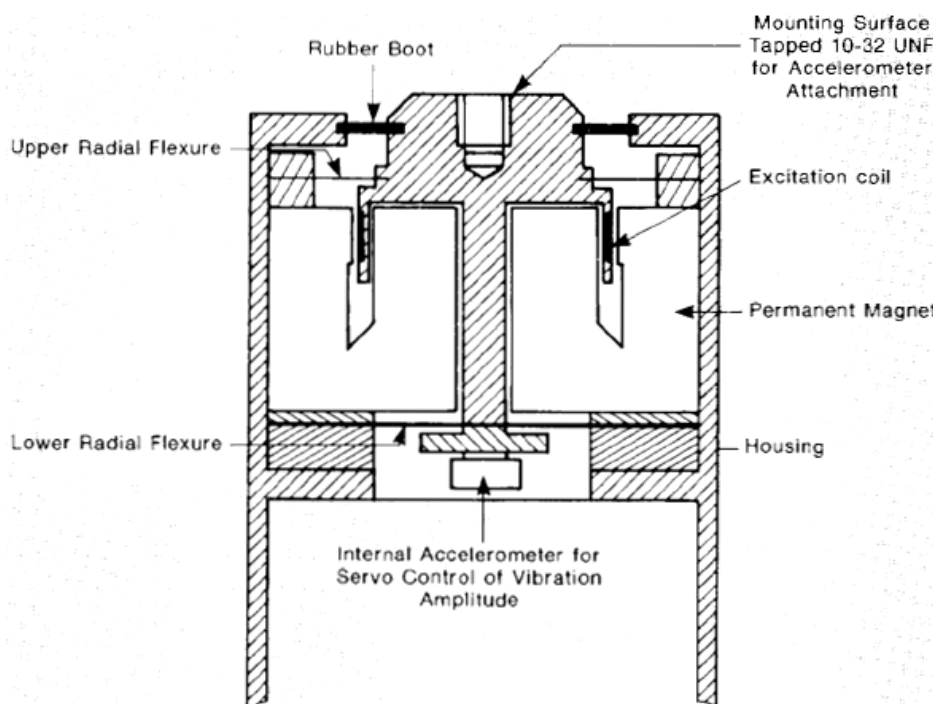
Τέλος, ελέγξαμε την ικανότητα λήψης μετρήσεων ακριβείας όταν μεταξύ του VH-1000-D και του διεγέρτη παρεμβάλλονται καθρέπτες, οι οποίοι εκτρέπουν τη δέσμη του λέιζερ και την κατευθύνουν στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες πρόσπτωσης. Σκοπός μας είναι και σε αυτήν την περίπτωση να ελέγξουμε αν πράγματι ισχύει η εξάρτηση των μετρήσεων από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης, όπως προβλέπεται στο δεύτερο κεφάλαιο, ή αν επηρεάζεται από την παρεμβολή των καθρεπτών.

3.1 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του Calibration Exciter Type 4294.

Το Calibration Exciter Type 4294 είναι μια μικρή, πρακτική, ανεξάρτητη πηγή αναφοράς κραδασμών. Προορίζεται για τη γρήγορη βαθμονόμηση και τον έλεγχο των μετρήσεων των κραδασμών ελέγχοντας και καταγράφοντας συστήματα που χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, καθώς επίσης και άλλους τύπους μορφοτροπέων κραδασμών. Στα σχήματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζεται ο διεγέρτης και η εσωτερική δομή του αντίστοιχα. [13]



Σχήμα 3.1: Calibration Exciter Type 4294.



Σχήμα 3.2: Εσωτερική δομή του Calibration Exciter Type 4294.

Το σήμα αναφοράς του διεγέρτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση των μέσων ενεργών τιμών της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και μετατόπισης περίπου στα 10m/sec^2 , 10mm/sec και στα $10\mu\text{m}$ αντίστοιχα. Ο διακριβωτής ενσωματώνει

ηλεκτρομαγνητικό διεγέρτη που οδηγείται από έναν ταλαντωτή κρυστάλλου στη συχνότητα των 159,15Hz (1000rad/sec).

Στο Παράρτημα II δίδονται οι τεχνικές προδιαγραφές του Calibration Exciter Type 4294.

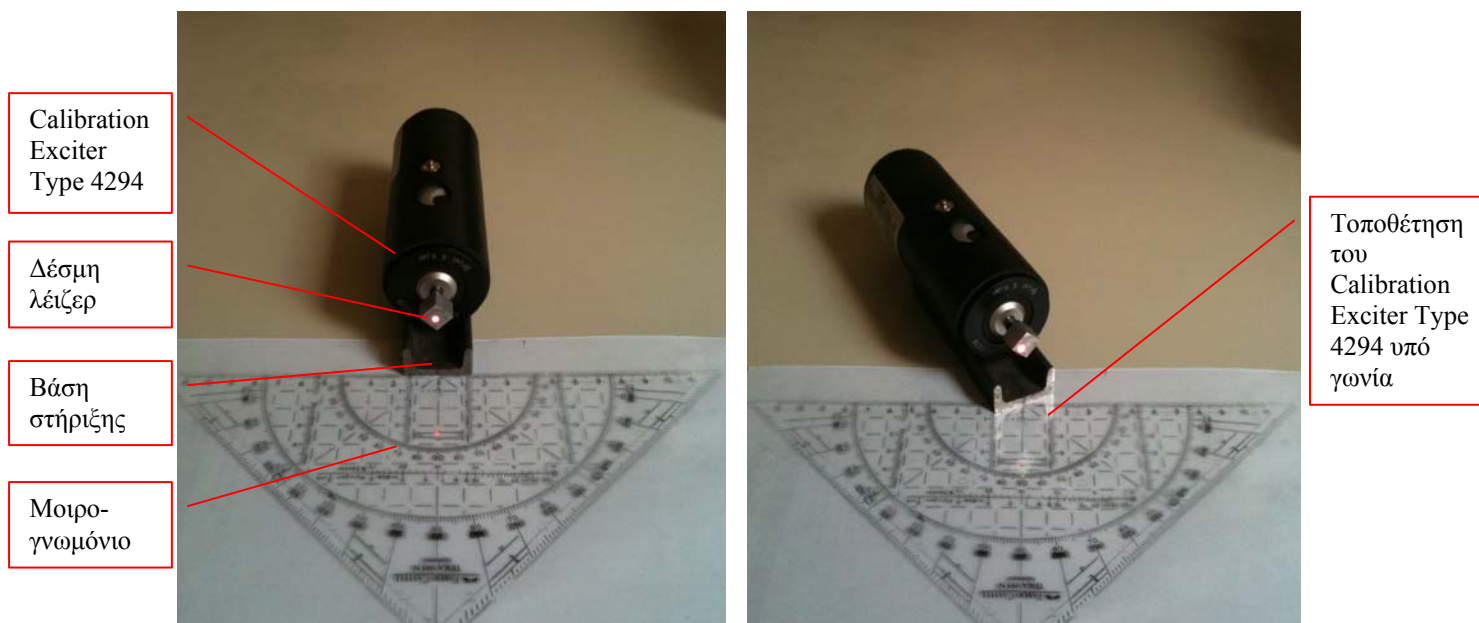
3.2 Ακρίβεια των μετρήσεων συναρτήσεως της γωνίας και της τραχύτητας.

Στην περίπτωση που η δέσμη του λέιζερ δεν προσπίπτει στο διεγέρτη σε ευθεία γραμμή αλλά υπό διάφορες γωνίες, πραγματοποιήσαμε τις παρακάτω δοκιμές προκειμένου να μελετήσουμε την εξάρτηση των μετρήσεων από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης και από την τραχύτητα της επιφάνειας του αντικειμένου. Τοποθετήσαμε αρχικά το VH-1000-D σε ευθεία απόσταση 790mm από το διεγέρτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, καθώς η απόσταση αυτή αποτελεί μια από τις βέλτιστες όπως αυτές προτείνονται από τον κατασκευαστή. Προσαρμόσαμε το διεγέρτη σε μια βάση στήριξης και τον τοποθετήσαμε στη συνέχεια πάνω σε ένα μοιρογνωμόνιο ώστε να μπορούμε να μεταβάλλουμε τη γωνία της θέσης του, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.

Calibration
Exciter Type
4294



Σχήμα 3.3: Τοποθέτηση του Calibration Exciter Type 4294 και του VH-1000-D.

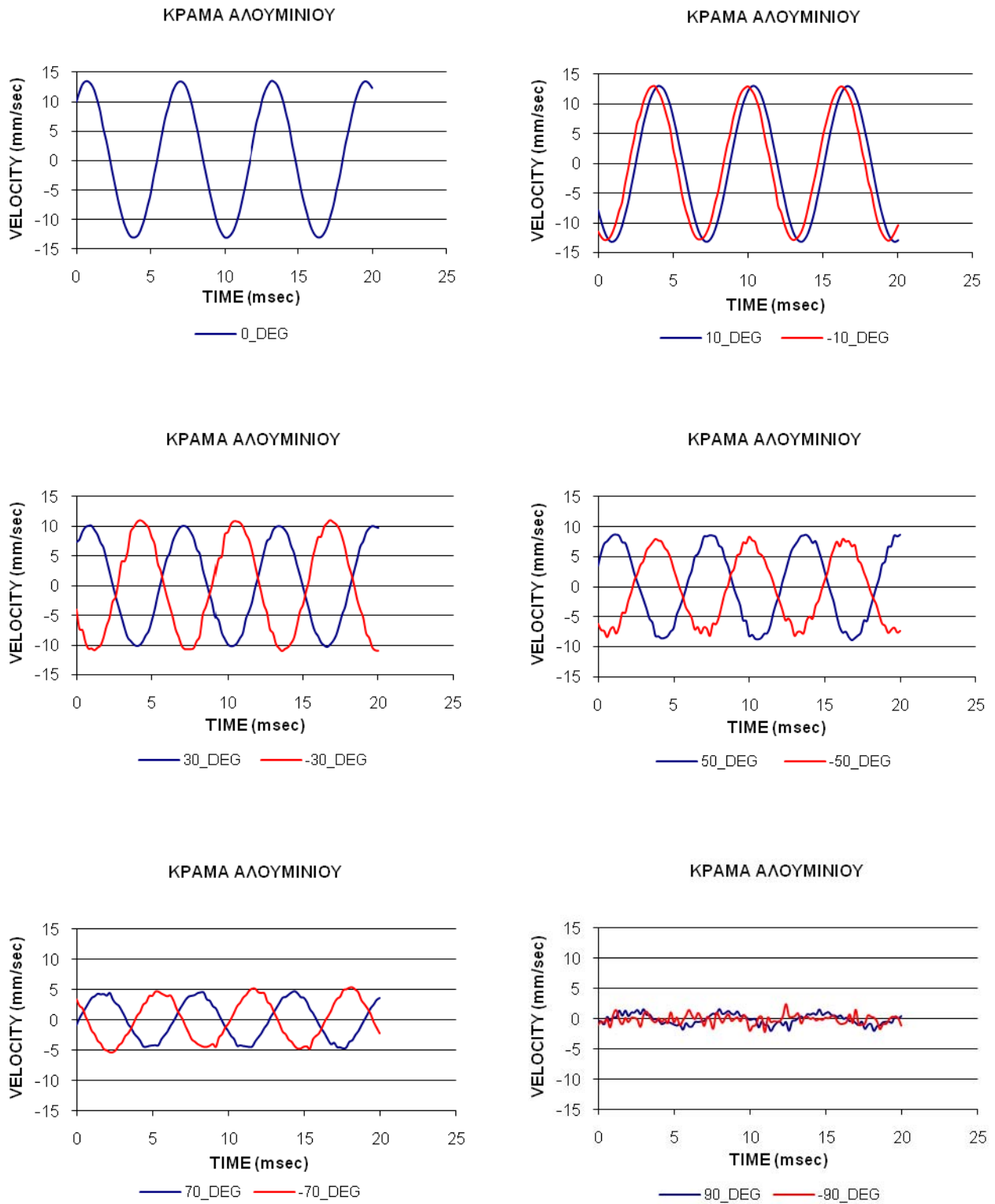


Σχήμα 3.4: Τοποθέτηση του διεγέρτη πάνω στο μοιρογωνμόνιο (α) σε ευθεία γραμμή από το VH-1000-D, (β) υπό γωνία.

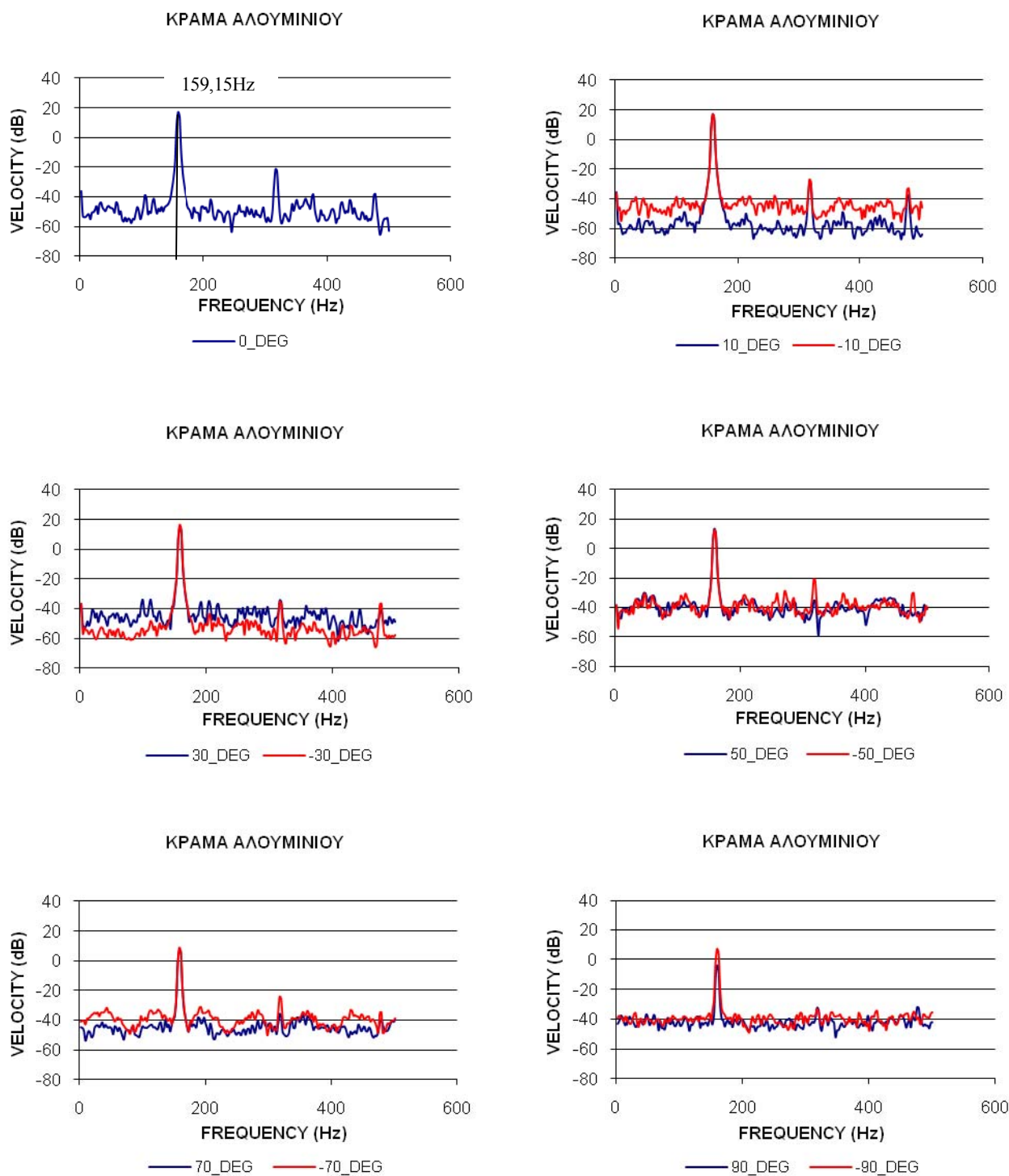
Κρατήσαμε τη θέση του VH-1000-D σταθερή και μεταβάλλαμε τη γωνία της θέσης του διεγέρτη κατά το οριζόντιο επίπεδο σε εύρος γωνιών από -90° έως $+90^\circ$, με βήμα 10° . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για τέσσερα υλικά με επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας, τα οποία προσαρμόσαμε πάνω στο διεγέρτη. Καθ' αυτόν τον τρόπο, διαπιστώσαμε αν η ποιότητα της επιφάνειας του αντικειμένου επηρεάζει τα αποτελέσματα και σε ποιο βαθμό. Τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε ήταν μια λεία επιφάνεια κυκλικής διατομής κράματος αλουμινίου, μια λεία τετραγωνική επιφάνεια αλουμινίου, μια τραχεία τετραγωνική επιφάνεια υαλόχαρτου τύπου P220 και μια λιγότερο τραχεία τετραγωνική επιφάνεια υαλόχαρτου τύπου P800.

Για το σύνολο των παραπάνω δοκιμών δόθηκαν στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου οι τιμές της συχνότητας δειγματοληψίας $f_s=5000\text{Hz}$, του συνολικού αριθμού σημείων $n_{pt}=2048$ και του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των φασμάτων $N_{FFT}=2048$.

Τα σχήματα 3.5 και 3.6 αναφέρονται στην επιφάνεια κράματος αλουμινίου. Πιο αναλυτικά, στο σχήμα 3.5 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα της ταχύτητας του κραδασμού. Η μορφή τους είναι ημιτονοειδής και αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της απλής αρμονικής κίνησης που παράγεται από το διεγέρτη. Παρατηρούμε ότι η ημιτονοειδής μορφή του σήματος επιδεινώνεται όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης του λέιζερ. Μετρήσεις ακριβείας μπορούμε να πραγματοποιήσουμε στο εύρος γωνιών των $\pm 70^\circ$. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού. Από την επισκόπηση των φασμάτων ισχύος προκύπτει ότι σε όλο το εύρος των μοιρών έχει αποτυπωθεί σωστά η συχνότητα του παραγόμενου κραδασμού από το διεγέρτη στα $159,15\text{Hz}$.

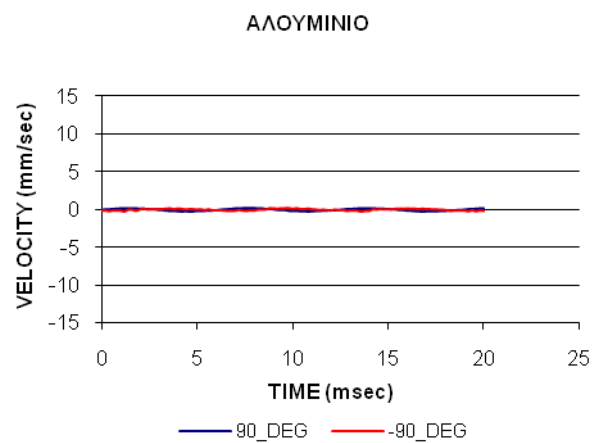
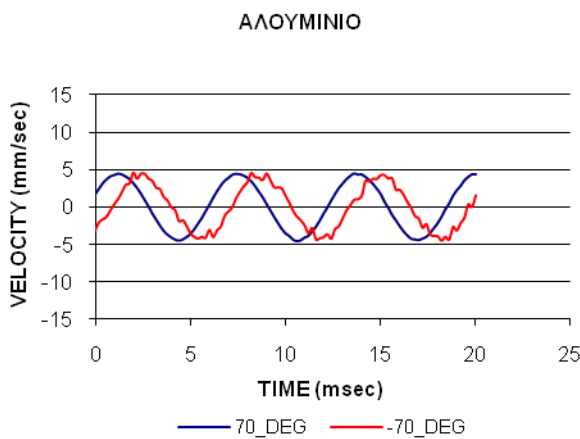
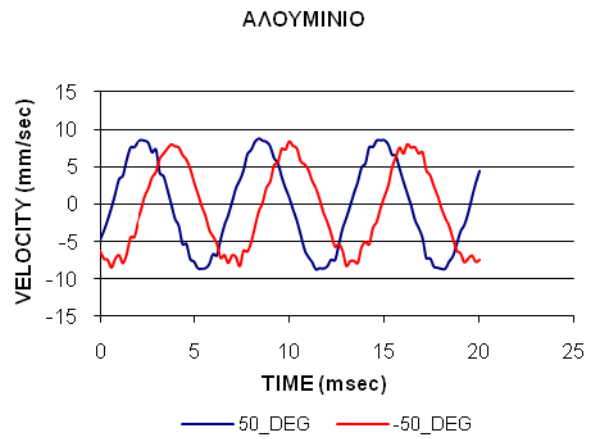
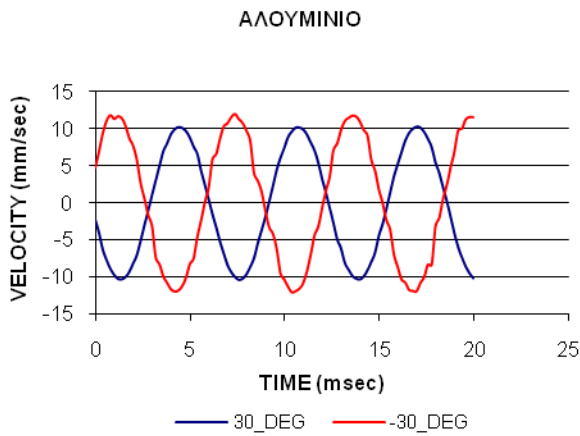
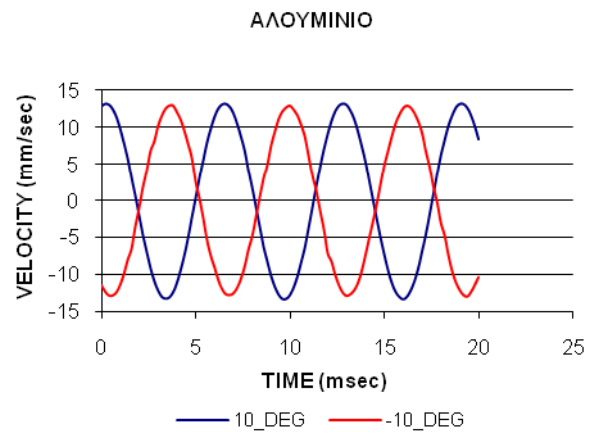
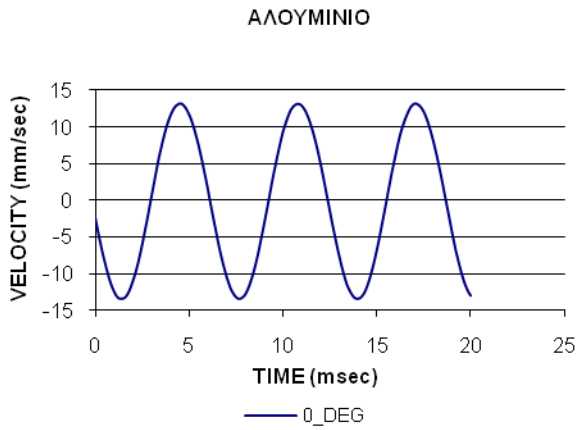


Σχήμα 3.5: Χρονικά σήματα ταχύτητας κραδασμού για το κράμα αλουμινίου.

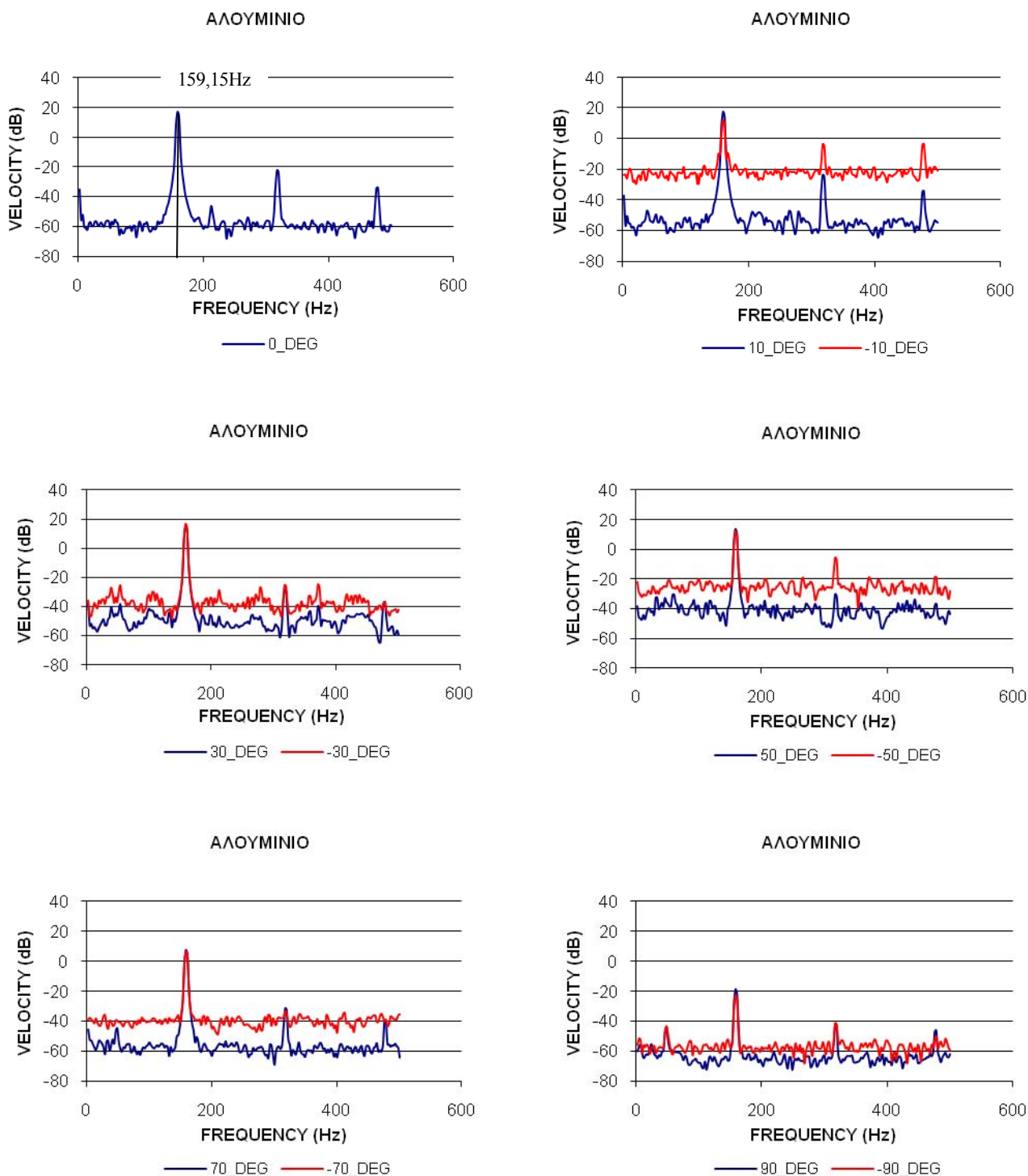


Σχήμα 3.6: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για το κράμα αλουμινίου.

Τα σχήματα 3.7 και 3.8 αναφέρονται στην επιφάνεια αλουμινίου. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.7 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα της ταχύτητας του κραδασμού και στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επισκόπησή τους είναι αντίστοιχα με εκείνα για την περίπτωση του κράματος αλουμινίου.

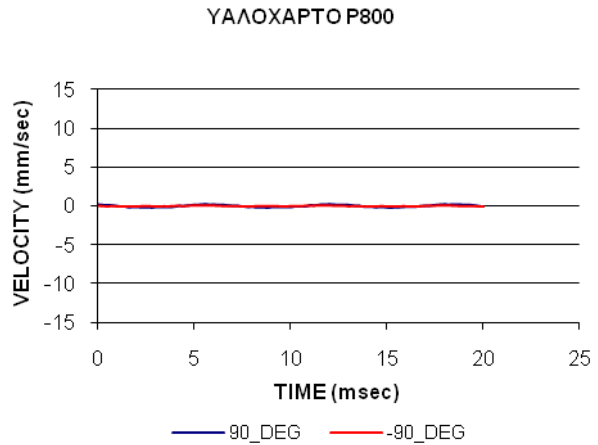
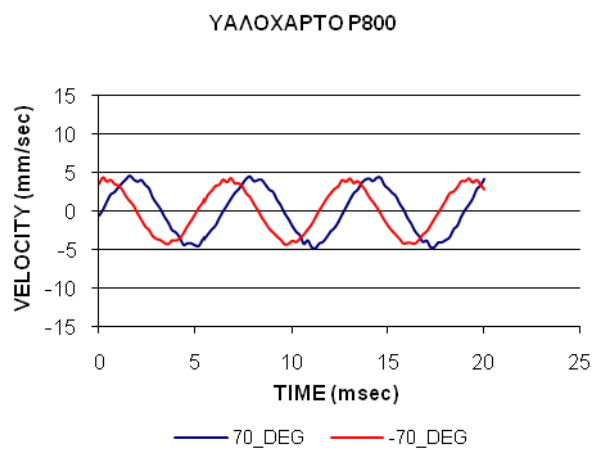
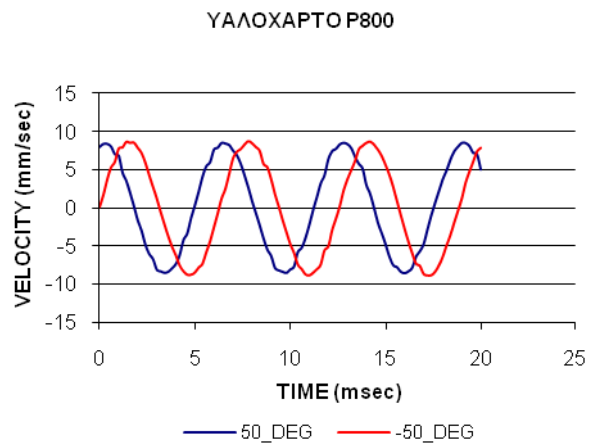
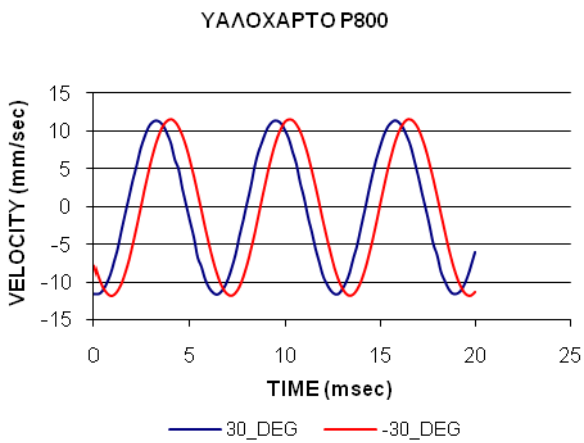
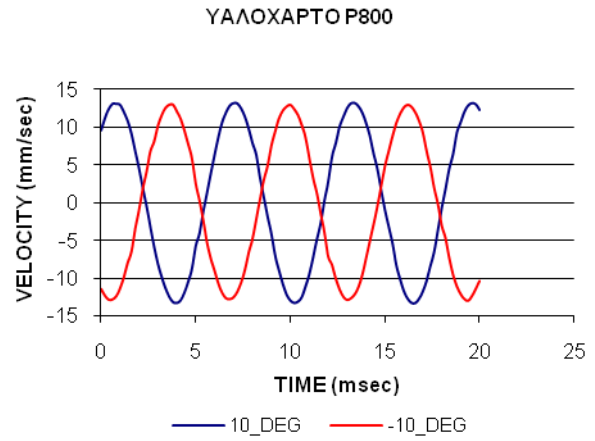
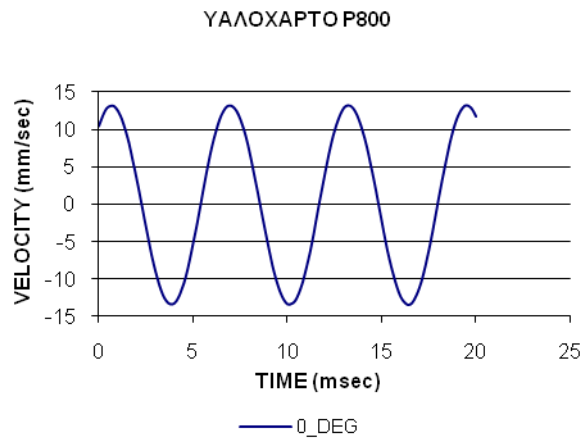


Σχήμα 3.7: Χρονικά σήματα ταχύτητας κραδασμού για το αλουμίνιο.

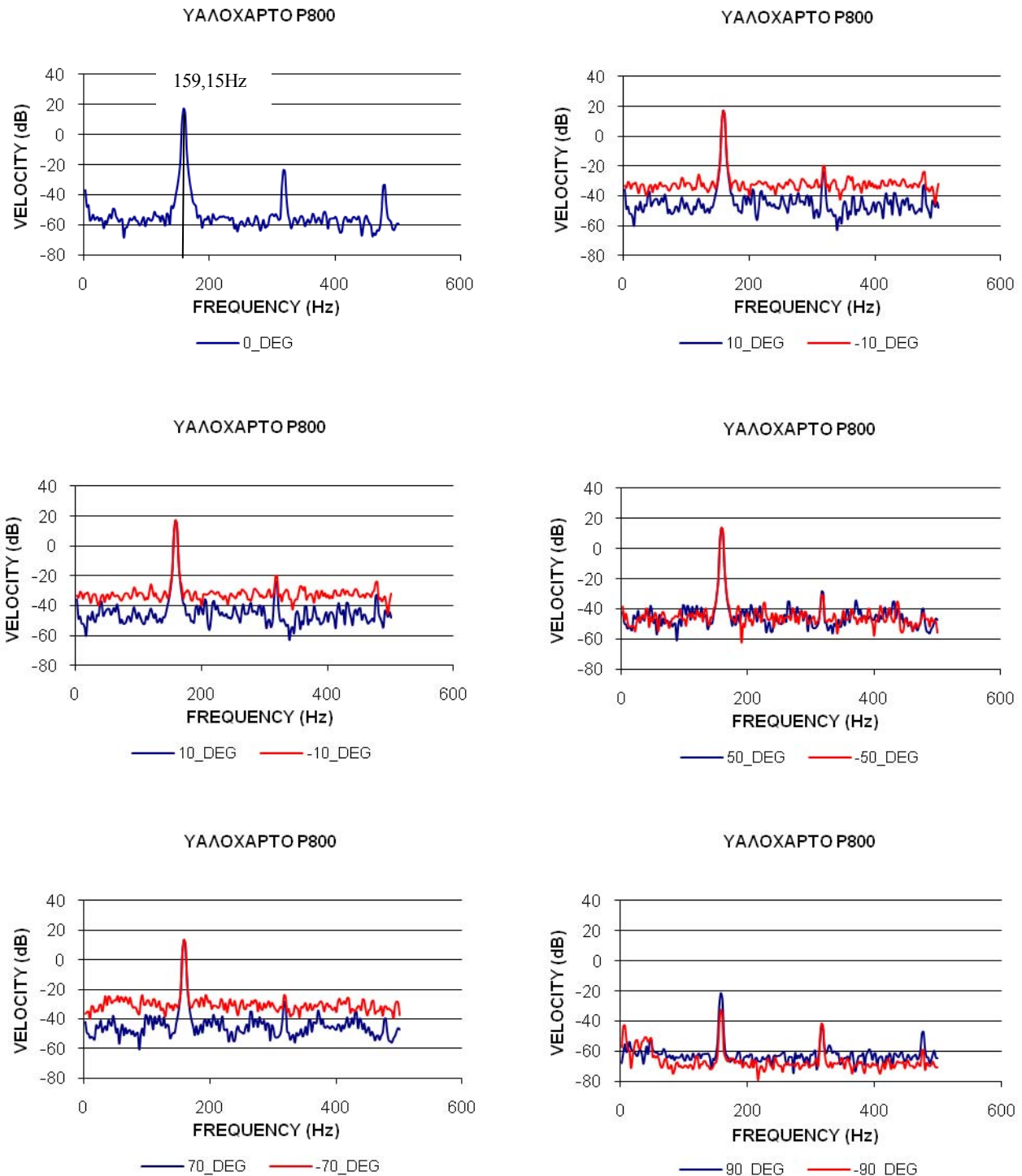


Σχήμα 3.8: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για το αλουμίνιο.

Τα σχήματα 3.9 έως 3.10 αναφέρονται στην επιφάνεια υαλόχαρτου τύπου P800. Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα της ταχύτητας του κραδασμού και στο σχήμα 3.10 παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επισκόπησή τους είναι αντίστοιχα με εκείνα για την περίπτωση του κράματος αλουμινίου.



Σχήμα 3.9: Χρονικά σήματα ταχύτητας κραδασμού για το υαλόχαρτο P800.

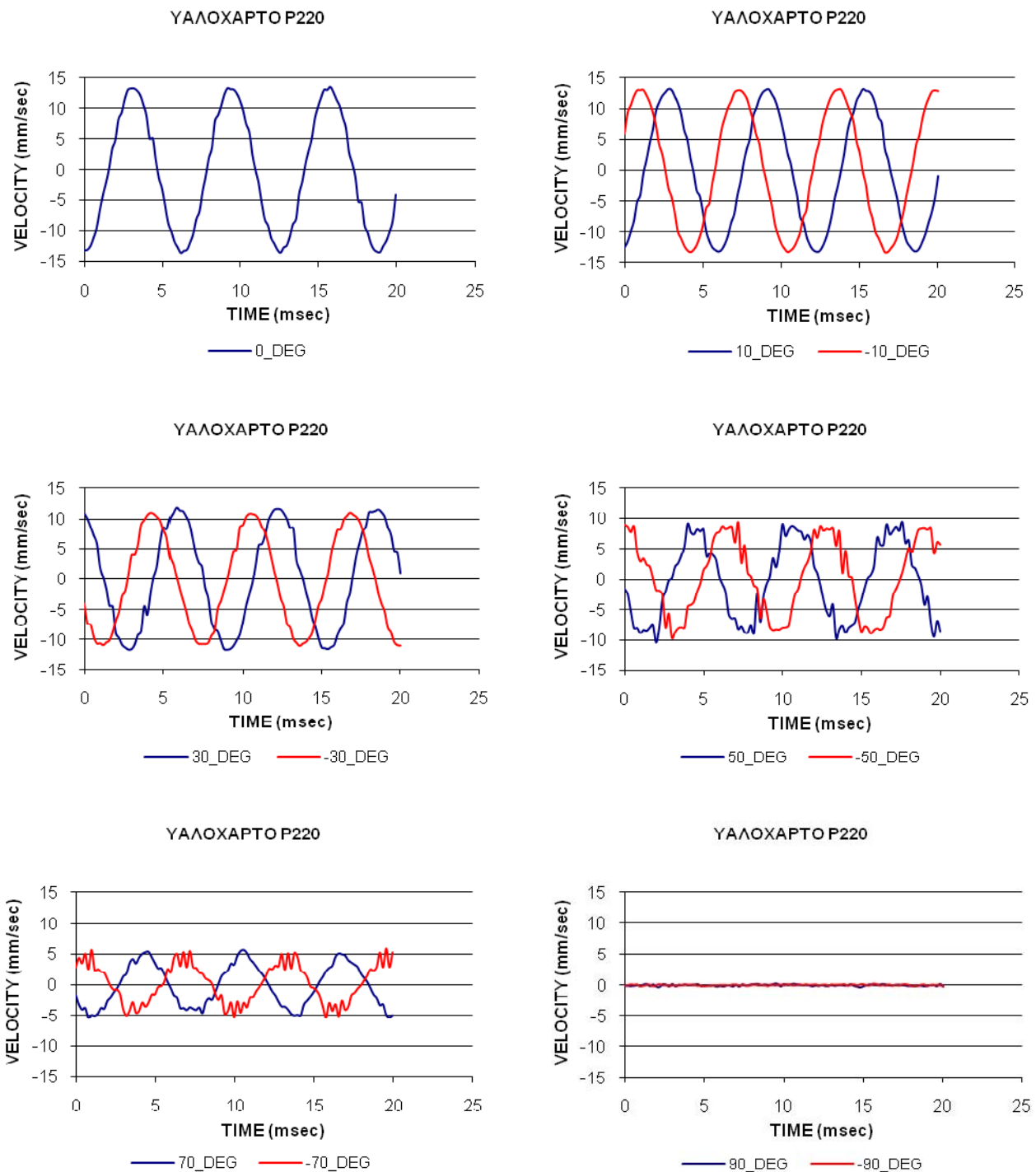


Σχήμα 3.10: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για το υαλόχαρτο P800.

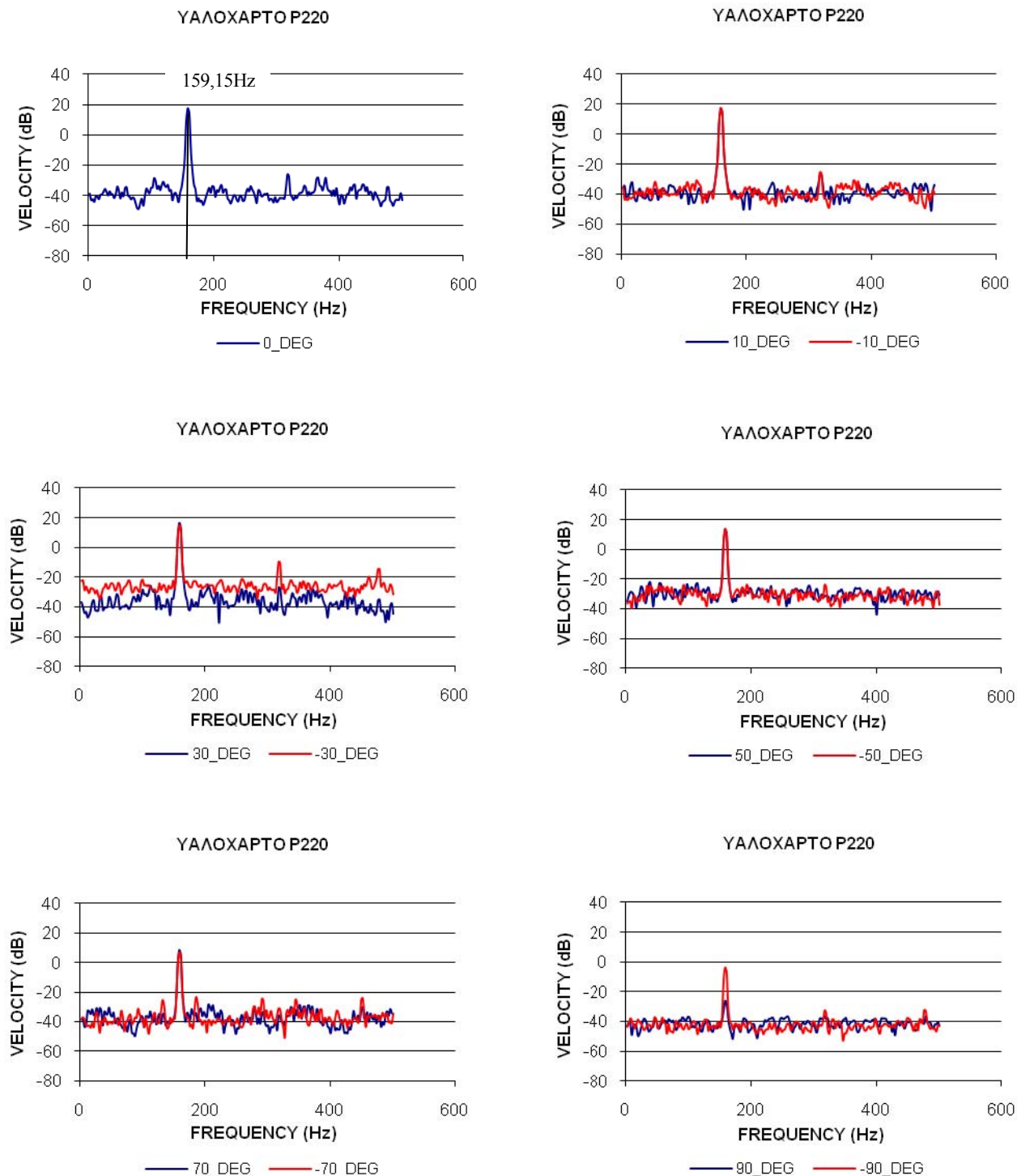
Τα σχήματα 3.11 και 3.12 αφορούν στην επιφάνεια υαλόχαρτου τύπου P220. Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα της ταχύτητας του κραδασμού. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι αντίστοιχα με εκείνα για την περίπτωση του κράματος αλουμινίου με τη διαφορά ότι το εύρος γωνιών στο οποίο μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις ακριβείας περιορίζεται στο διάστημα των $\pm 50^\circ$, καθώς

ΥΑκρίβεια των μετρήσεων συναρτήσει της γωνίας και της τραχύτητας. 3.11

το υαλόχαρτο P220 έχει πιο τραχεία επιφάνεια σε σχέση με το κράμα αλουμινίου. Προκαλείται λοιπόν μεγαλύτερη σκέδαση της δέσμης του λέιζερ έπειτα από την πρόσπτωσή της στην επιφάνεια του υαλόχαρτου και κατ' επέκταση παρατηρείται επιδείνωση του σήματος ισχύος κυρίως για γωνίες εκτροπής μεγαλύτερες των $\pm 50^\circ$. Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού στα οποία έχει αποτυπωθεί σωστά σε ολόκληρο το εύρος των μοιρών η συχνότητα των 159,15Hz.



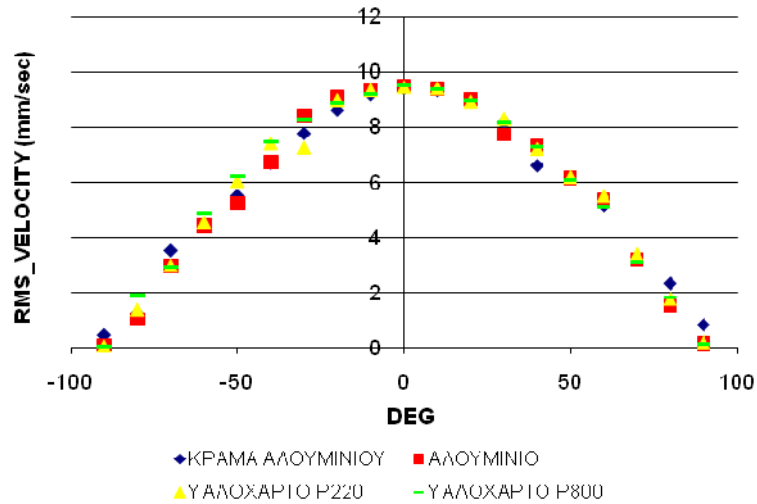
Σχήμα 3.11: Χρονικά σήματα ταχύτητας κραδασμού για το υαλόχαρτο P220.



Σχήμα 3.12: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για το υαλόχαρτο P220.

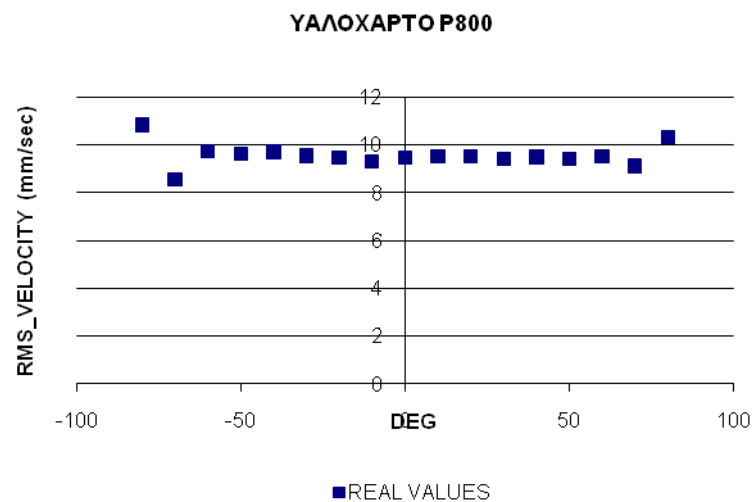
Παραθέτουμε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα, σχήμα 3.13, με τις μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού για όλες τις γωνίες και για όλες τις επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας. Παρατηρούμε την επαλήθευση της εξάρτησης των μετρήσεων από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης, η οποία είναι ανεξάρτητη και από την τραχύτητα. Η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζει μόνο το εύρος των γωνιών

κατά το οποίο μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ακριβείς μετρήσεις. Όσο πιο λεία είναι η επιφάνεια τόσο μεγαλύτερο είναι το παραπάνω εύρος, όπως προέκυψε από την ανάλυση των σημάτων της ταχύτητας του κραδασμού.



Σχήμα 3.13: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού για τα τέσσερα υλικά.

Ενδεικτικά για το υαλόχαρτο τύπου P800 δίδεται και το σχήμα 3.14, που περιλαμβάνει τις πραγματικές μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού, οι οποίες προέκυψαν από τις αντίστοιχες μετρηθείσες από το VH-1000-D τιμές, με τη βοήθεια της εξίσωσης 2.3. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι αντίστοιχο με εκείνο που προέκυψε από την επισκόπηση των σημάτων της ταχύτητας του κραδασμού του σχήματος 3.11, ότι μετρήσεις ακριβείας για τη συγκεκριμένη επιφάνεια μπορούμε να πραγματοποιήσουμε στο εύρος των $\pm 70^\circ$.



Σχήμα 3.14: Πραγματικές μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού.

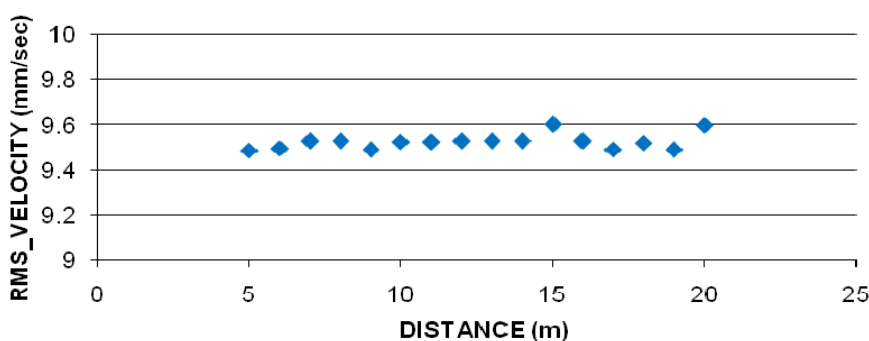
3.3 Ακρίβεια των μετρήσεων συναρτήσει της απόστασης.

Για να μελετήσουμε την ευαισθησία των μετρήσεων σε σχέση με την απόσταση του VH-1000-D από το διεγέρτη σε ευθεία γραμμή, πραγματοποιήσαμε ένα σύνολο δοκιμών μεταβάλλοντας την υπόψιν απόσταση. Στις πρώτες δοκιμές μεταβάλαμε κάθε φορά την εστίαση ώστε να έχουμε πάντα τη βέλτιστη δυνατή για την κάθε απόσταση. Στις επόμενες δοκιμές κρατήσαμε σταθερή την εστίαση όπως αυτή ρυθμίστηκε για κάποια συγκεκριμένη απόσταση αναφοράς.

3.3.1 Με ρύθμιση της εστίασης για κάθε μέτρηση.

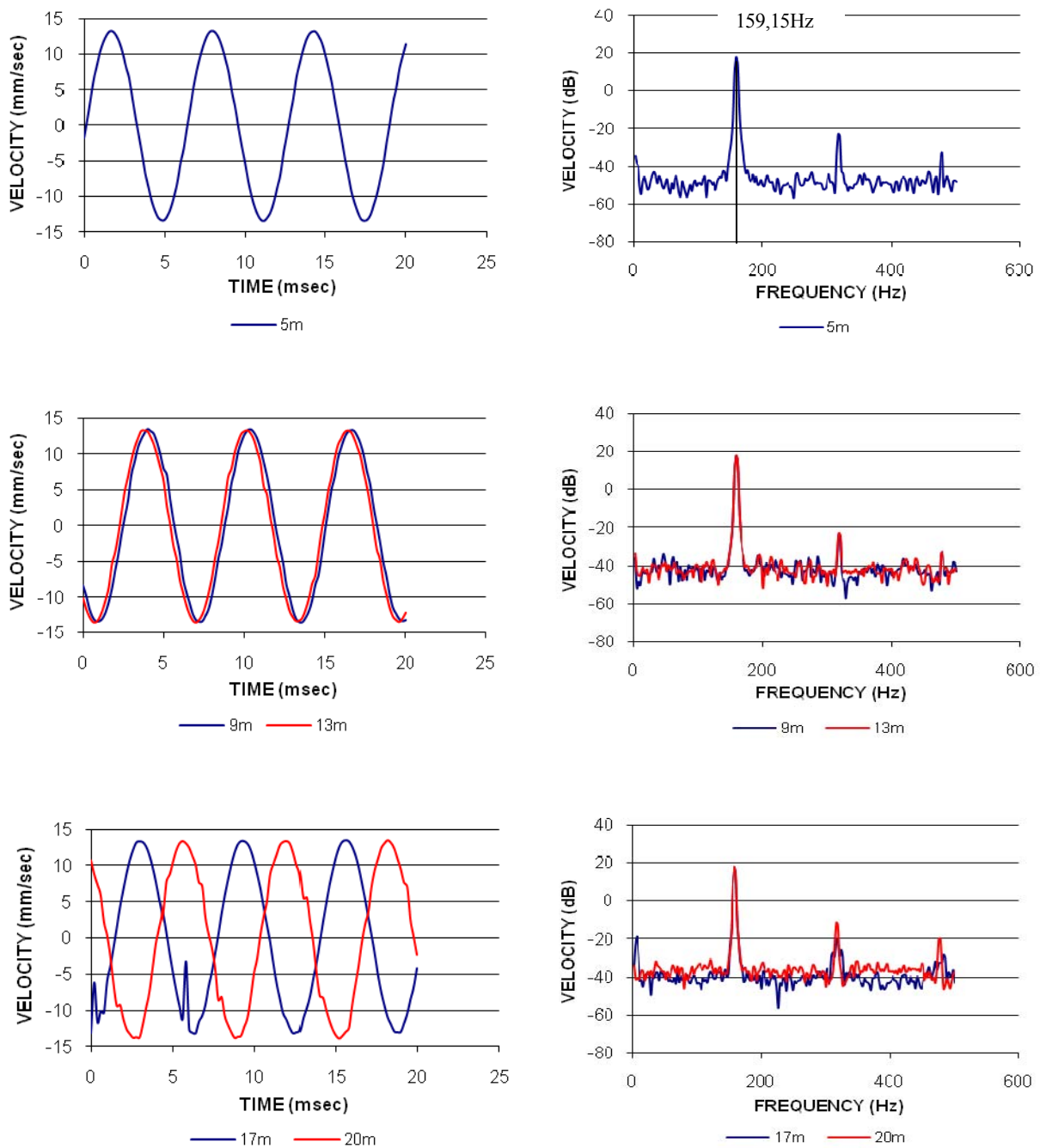
Το VH-1000-D τοποθετήθηκε σε απόσταση 5m από το Calibration Exciter Type 4294. Μεταβάλλαμε την απόσταση του διεγέρτη από το VH-1000-D από τα 5m έως τα 20m, με βήμα 1m και για τη λήψη της κάθε μέτρησης εξασφαλίσαμε τη βέλτιστη δυνατή εστίαση. Για το σύνολο των παραπάνω δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η επιφάνεια αλουμινίου και δόθηκαν στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου οι τιμές της συχνότητας δειγματοληψίας $f_s=5000\text{Hz}$, του συνολικού αριθμού σημείων $n_{pt}=2048$ και του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των φασμάτων $NFFT=2048$.

Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 3.15 και 3.16. Πιο αναλυτικά, στο σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού, οι οποίες παρουσιάζουν πολύ καλή ακρίβεια μέχρι και την απόσταση των 14m. Στη συνέχεια, μέχρι τα 20m παρουσιάζονται κάποιες μικρές αποκλίσεις και αυξημένος θόρυβος καθώς η δέσμη του λέιζερ ακόμη και με τη βέλτιστη δυνατή εστίαση υπερβαίνει την επιφάνεια (1mm^2) του στόχου. Μετά τα 20m δεν μπορούμε πλέον να πραγματοποιήσουμε αξιόπιστες μετρήσεις. Στο σχήμα 3.17 δίδονται παραδείγματα καλής και κακής ρύθμισης της εστίασης και πως φαίνεται αντίστοιχα η δέσμη του λέιζερ προσπίπτουσα στο στόχο.



Σχήμα 3.15: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού.

Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα και τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού. Η μορφή των χρονικών σημάτων είναι ημιτονοειδής και αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της απλής αρμονικής κίνησης που παράγεται από το διεγέρτη. Παρατηρούμε μια τοπική επιδείνωση του σήματος της ταχύτητας στη μέτρηση για τα 17m, η οποία είναι τυχαία κι οφείλεται πιθανώς στην αυξημένη στάθμη θορύβου του υποβάθρου. Στα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού παρατηρούμε ότι σε όλο το εύρος της υπό μελέτη απόστασης έχει αποτυπωθεί σωστά η συχνότητα του παραγόμενου κραδασμού από το διεγέρτη στα 159,15Hz.



Σχήμα 3.16: Χρονικά σήματα και φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού.



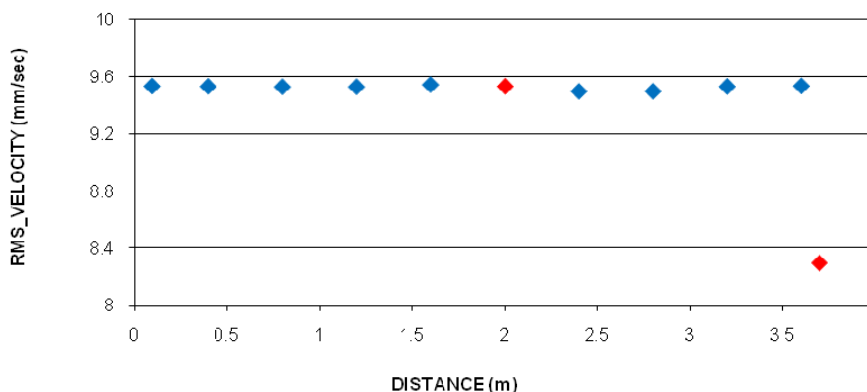
Σχήμα 3.17: (α) Πολύ καλή εστίαση, (β) Καλή εστίαση, (γ) Οριακά αποδεκτή εστίαση, (δ) Εστίαση που υπερβαίνει τα όρια του στόχου.

3.3.2 Με ρύθμιση της εστίασης μόνο στην απόσταση αναφοράς.

Στην περίπτωση αυτή το VH-1000-D τοποθετήθηκε σε απόσταση 2m από το Calibration Exciter Type 4294. Για τη λήψη της πρώτης μέτρησης στα 2m εξασφαλίσαμε τη βέλτιστη δυνατή εστίαση. Στη συνέχεια, διατηρώντας την αρχική ρύθμιση της εστίασης μεταβάλλαμε την απόσταση από το διεγέρτη με βήμα 0,10m έως ότου να μην είναι δυνατή η περαιτέρω λήψη μετρήσεων ακριβείας. Επαναλάβαμε την παραπάνω διαδικασία με ρύθμιση της εστίασης του VH-1000-D σε απόσταση 0,5m από το Calibration Exciter Type 4294.

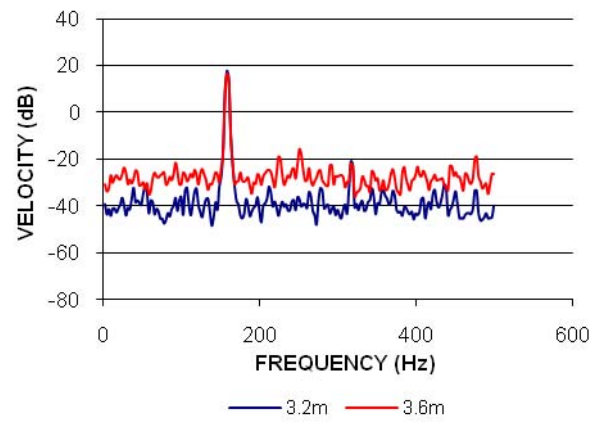
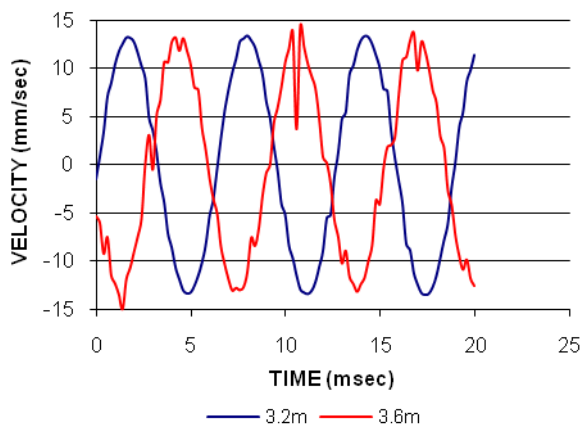
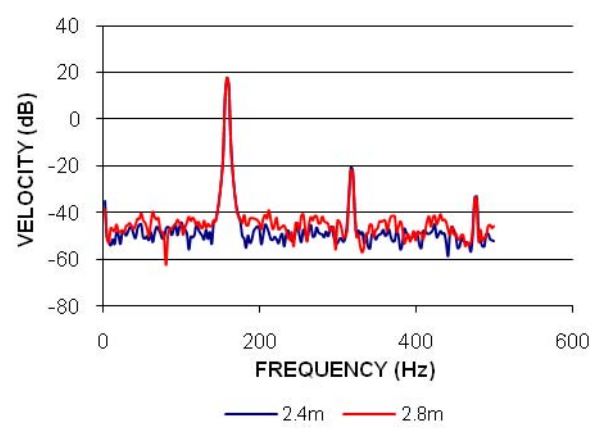
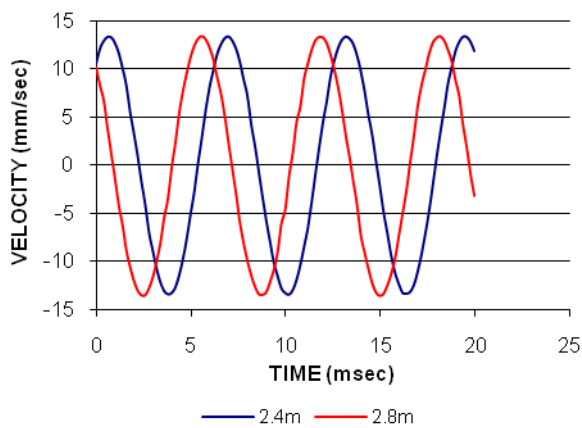
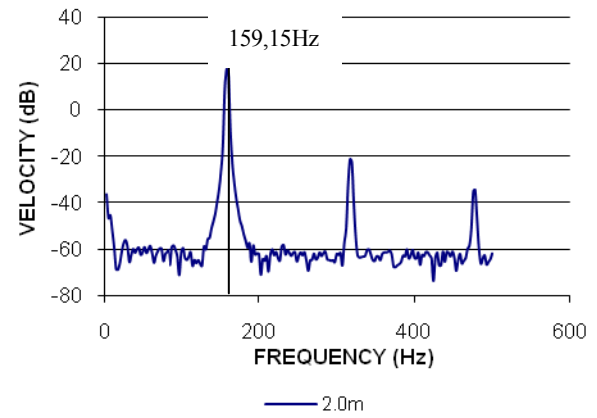
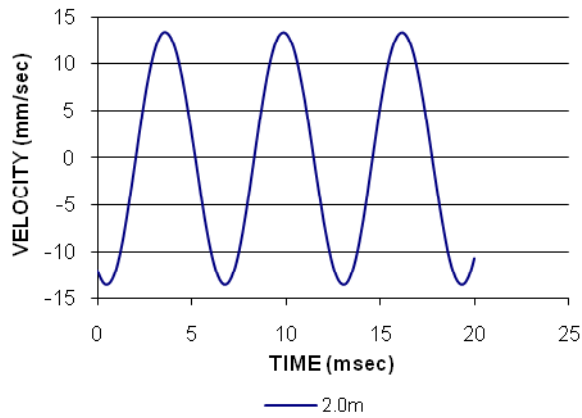
Για το σύνολο των παραπάνω δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η επιφάνεια αλουμινίου και δόθηκαν στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου οι τιμές της συχνότητας δειγματοληψίας $f_s=5000\text{Hz}$, του συνολικού αριθμού σημείων $n_{pt}=2048$ και του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των φασμάτων $N_{FFT}=2048$.

Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων με ρύθμιση της εστίασης στη θέση αναφοράς των 2m παρουσιάζονται στα σχήματα 3.18 έως 3.21. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 3.18 παρουσιάζονται οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού. Παρατηρούμε ότι μέχρι την απόσταση των 3,6m μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις ακριβείας. Μετά τα 3,6m παρατηρούμε την απότομη πτώση του σήματος της ταχύτητας καθώς η δέσμη του λέιζερ υπερβαίνει την επιφάνεια (1mm²) του στόχου και οι μετρήσεις μας χάνουν την ακρίβειά τους.

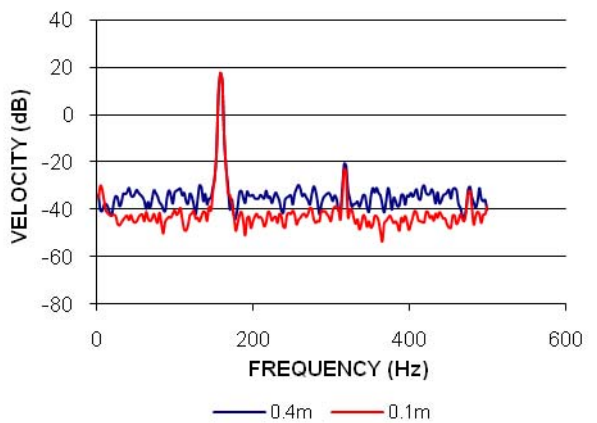
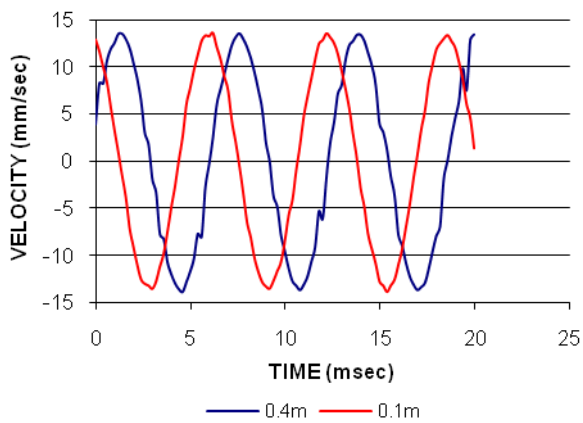
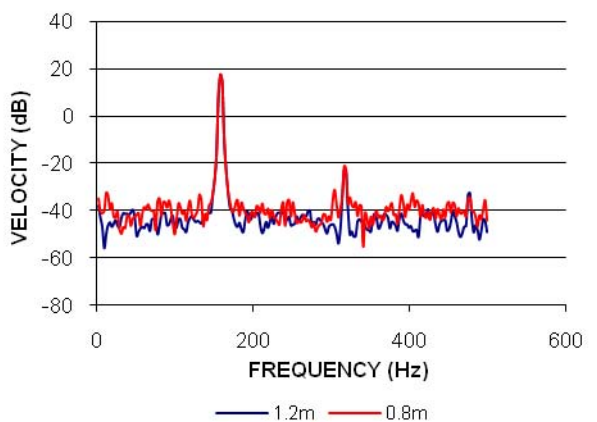
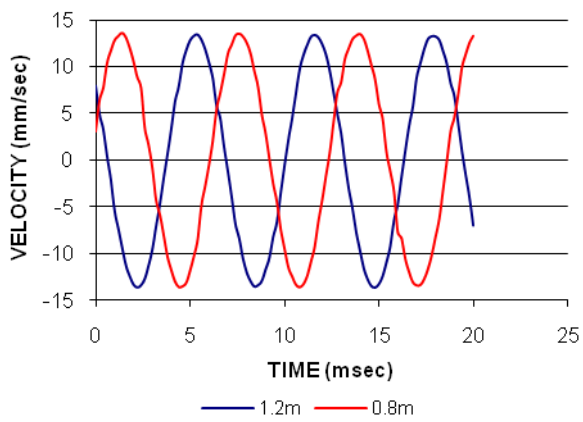
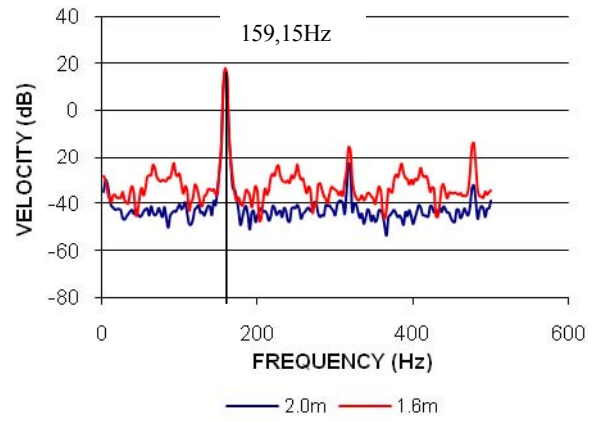
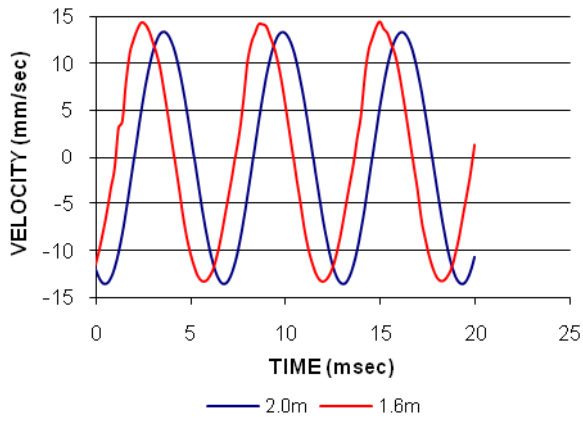


Σχήμα 3.18: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού με απόσταση αναφοράς 2m.

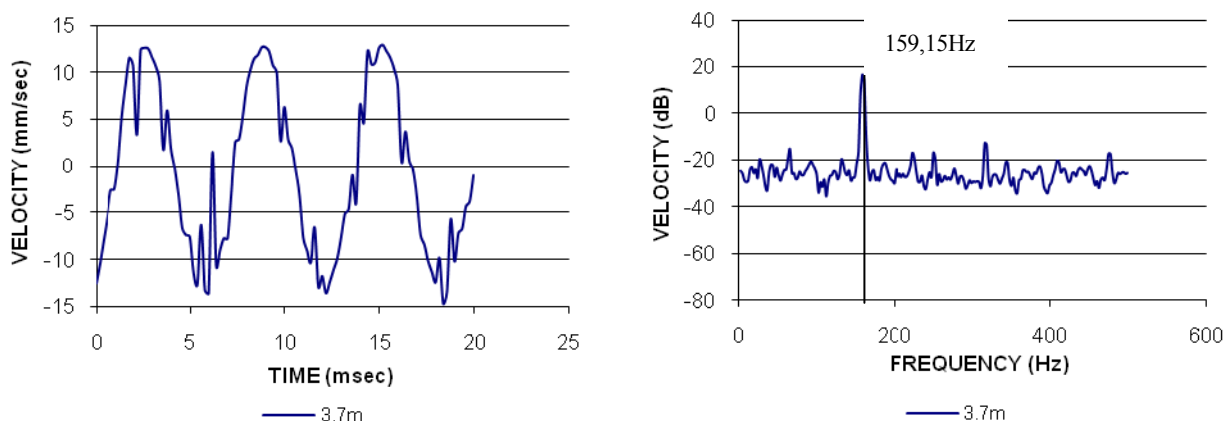
Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα και τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού καθώς απομακρυνόμαστε από την απόσταση αναφοράς των 2m. Η μορφή των χρονικών σημάτων είναι ημιτονοειδής και αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της απλής αρμονικής κίνησης που παράγεται από το διεγέρτη. Παρατηρούμε ωστόσο την έντονη επιδείνωση της μορφής του σήματος της ταχύτητας στην τελευταία μέτρηση ακριβείας, αυτή των 3,6m. Στα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού παρατηρούμε ότι σε όλο το εύρος της υπό μελέτη απόστασης έχει αποτυπωθεί σωστά η συχνότητα του παραγόμενου κραδασμού από το διεγέρτη στα 159,15Hz. Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα και τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού για αποστάσεις μικρότερες της απόστασης αναφοράς των 2m. Σε αυτές η ακρίβεια των μετρήσεων δεν επηρεάζεται καθώς το VH-1000-D παραμένει ακριβές ακόμη και στην απόσταση του 0.1m από το διεγέρτη. Στα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού παρατηρούμε κι εδώ ότι σε όλο το εύρος της υπό μελέτη απόστασης έχει αποτυπωθεί η συχνότητα των 159,15Hz. Στο σχήμα 3.21 παραθέτουμε τα χρονικά σήματα και τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού της πρώτης ανακριβούς μέτρησης στα 3,7m. Παρατηρούμε την κακή ημιτονοειδή μορφή του σήματος της ταχύτητας αν και στο αντίστοιχο φάσμα έχει αποτυπωθεί σωστά η συχνότητα των 159,15Hz.



Σχήμα 3.19: Χρονικά σήματα και φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για αποστάσεις μεγαλύτερες της απόστασης αναφοράς των 2m.

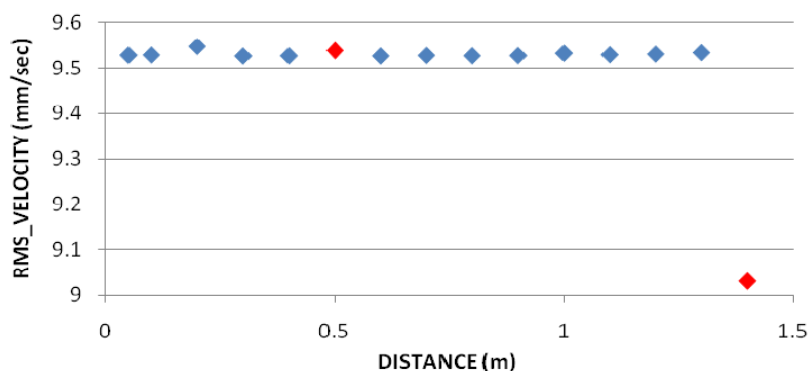


Σχήμα 3.20: Χρονικά σήματα και φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για αποστάσεις μικρότερες της απόστασης αναφοράς των 2m.



Σχήμα 3.21: Χρονικά σήματα και φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για την απόσταση των 3,7m.

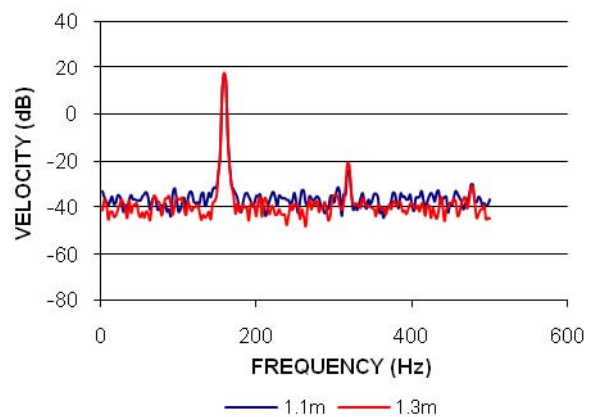
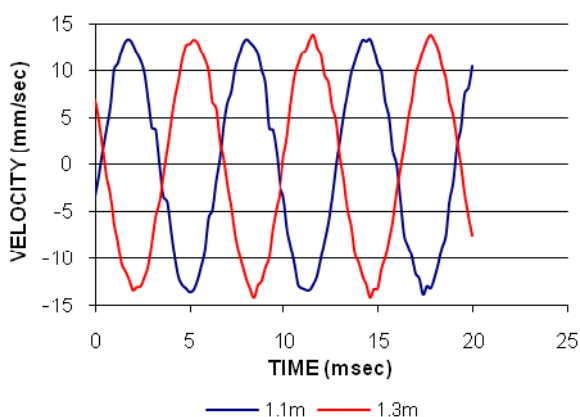
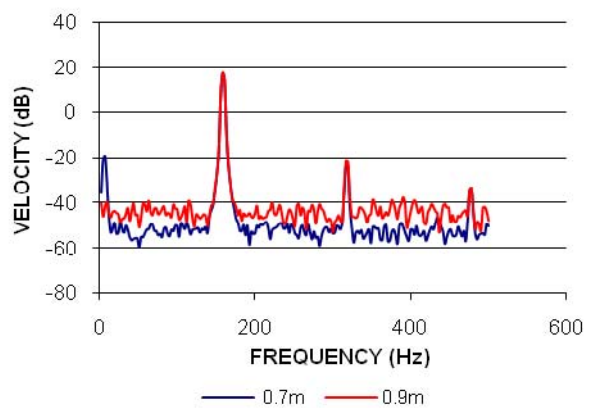
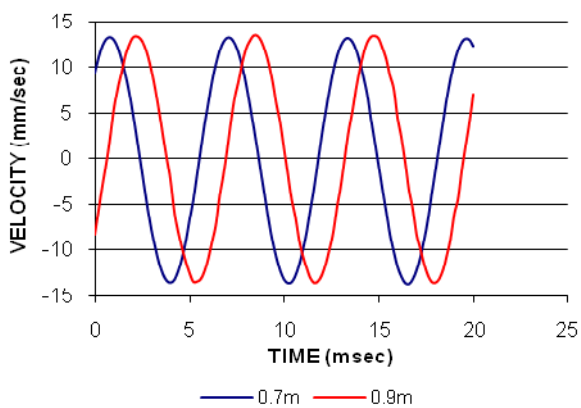
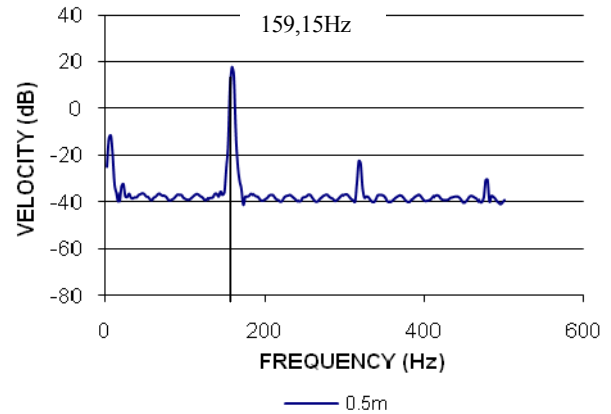
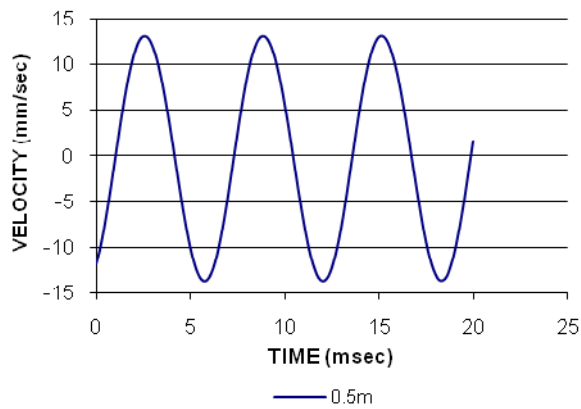
Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων με ρύθμιση της εστίασης στη θέση αναφοράς των 0,5m παρουσιάζονται στα σχήματα 3.22 έως 3.24. Πιο αναλυτικά, στο σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού. Παρατηρούμε ότι μέχρι την απόσταση των 1,3m μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις ακριβείας. Μετά τα 1,3m παρατηρούμε την απότομη πτώση του σήματος της ταχύτητας καθώς η δέσμη του λέιζερ υπερβαίνει την επιφάνεια (1mm^2) του στόχου και οι μετρήσεις μας χάνουν την ακρίβειά τους.



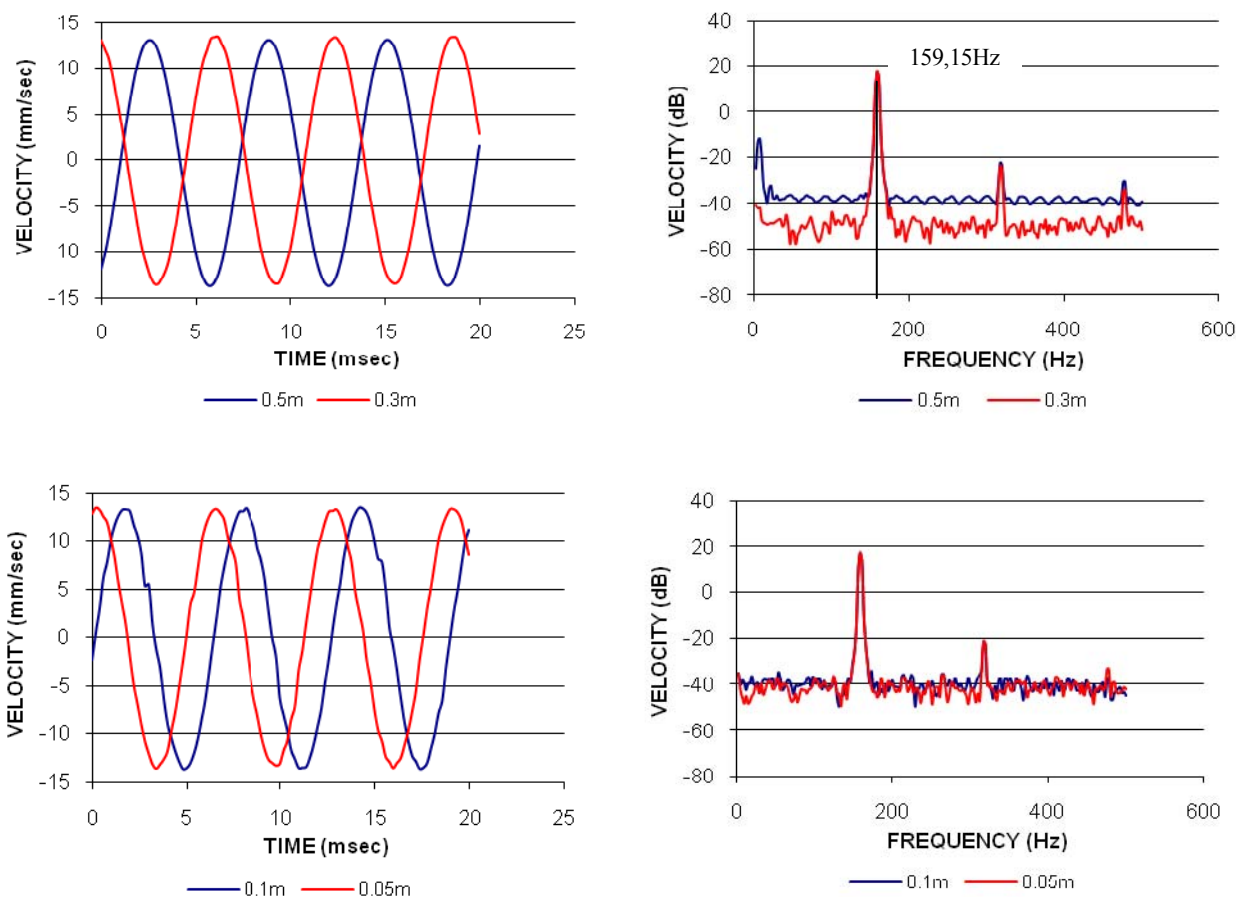
Σχήμα 3.22: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού με απόσταση αναφοράς 0,5m.

Στο σχήμα 3.23 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα και τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού καθώς απομακρυνόμαστε από την απόσταση αναφοράς του 0,5m. Η μορφή των χρονικών σημάτων είναι ημιτονοειδής και αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της απλής αρμονικής κίνησης που παράγεται από το διεγέρτη. Παρατηρούμε ωστόσο την επιδείνωση της μορφής του σήματος της ταχύτητας στην τελευταία μέτρηση ακριβείας, αυτή των 1,3m. Στα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού παρατηρούμε ότι σε όλο το εύρος της υπό μελέτη απόστασης έχει αποτυπωθεί σωστά η συχνότητα του παραγόμενου κραδασμού από το διεγέρτη στα 159,15Hz. Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα και τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του

κραδασμού για αποστάσεις μικρότερες της απόστασης αναφοράς του 0,5m. Σε αυτές η ακρίβεια των μετρήσεων δεν επηρεάζεται καθώς το VH-1000-D παραμένει ακριβές ακόμη και στην απόσταση του 0.05m από το διεγέρτη. Στα φάσματα της ταχύτητας του κραδασμού παρατηρούμε κι εδώ ότι σε όλο το εύρος της υπό μελέτη απόστασης έχει αποτυπωθεί η συχνότητα των 159,15Hz.



Σχήμα 3.23: Χρονικά σήματα και φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για αποστάσεις μεγαλύτερες της απόστασης αναφοράς των 0,5m.



Σχήμα 3.24: Χρονικά σήματα και φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού για αποστάσεις μικρότερες της απόστασης αναφοράς των 0,5m.

3.4 Ακρίβεια των μετρήσεων συναρτήσει της παρεμβολής καθρεπτών.

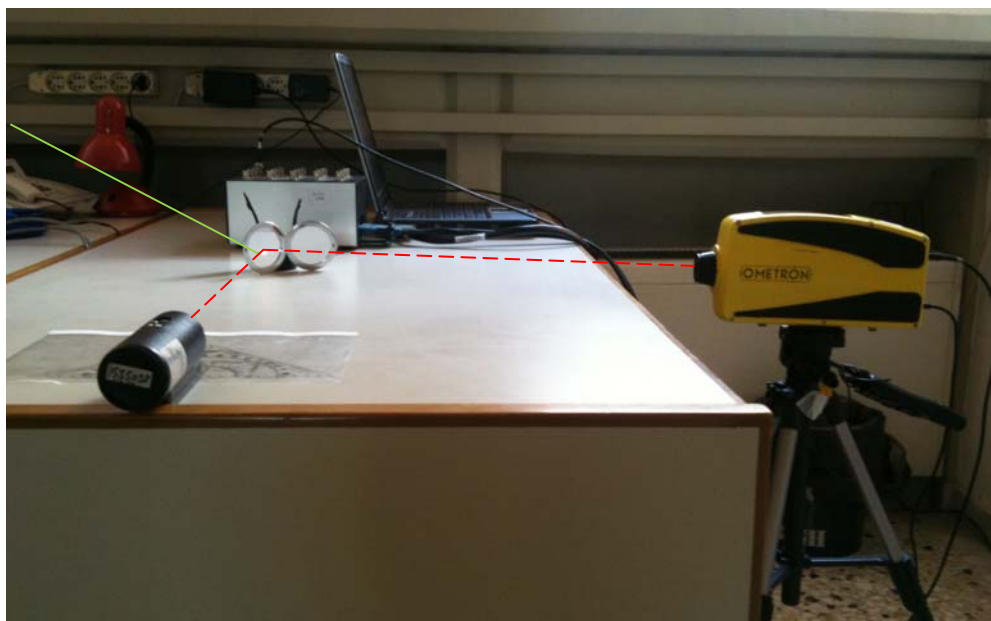
Για να μελετήσουμε την ικανότητα λήψης μετρήσεων ακριβείας όταν μεταξύ του VH-1000-D και του διεγέρτη παρεμβάλλονται καθρέπτες, οι οποίοι εκτρέπουν τη δέσμη του λέιζερ και την κατευθύνουν στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες πρόσπτωσης, πραγματοποιήσαμε δύο σειρές δοκιμών. Στην πρώτη έχουμε την παρεμβολή ενός καθρέπτη, ενώ στη δεύτερη έχουμε την παρεμβολή τριών καθρεπτών. Σκοπός μας είναι να ελέγξουμε αν πράγματι ισχύει η εξάρτηση των μετρήσεων από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης ή αν επηρεάζεται από την παρεμβολή των καθρεπτών.

3.4.1 Με παρεμβολή ενός καθρέπτη.

Για τη διεξαγωγή των δοκιμών μας χρησιμοποιήσαμε τη διάταξη του σχήματος 3.25. Τοποθετήσαμε το VH-1000-D σε απόσταση 514mm από τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του καθρέπτη. Ο καθρέπτης τοποθετήθηκε ώστε να σχηματίζει γωνία 45° με

το κάθετο προς τη δέσμη του λέιζερ επίπεδο. Καθ' αυτόν τον τρόπο, η δέσμη εκτρέπεται με τη βοήθεια του καθρέπτη και σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης κατά γωνία 90° και σε απόσταση 514mm από τον καθρέπτη συναντά το διεγέρτη.

Δέσμη λέιζερ
προσπίπτουσα
στον καθρέπτη

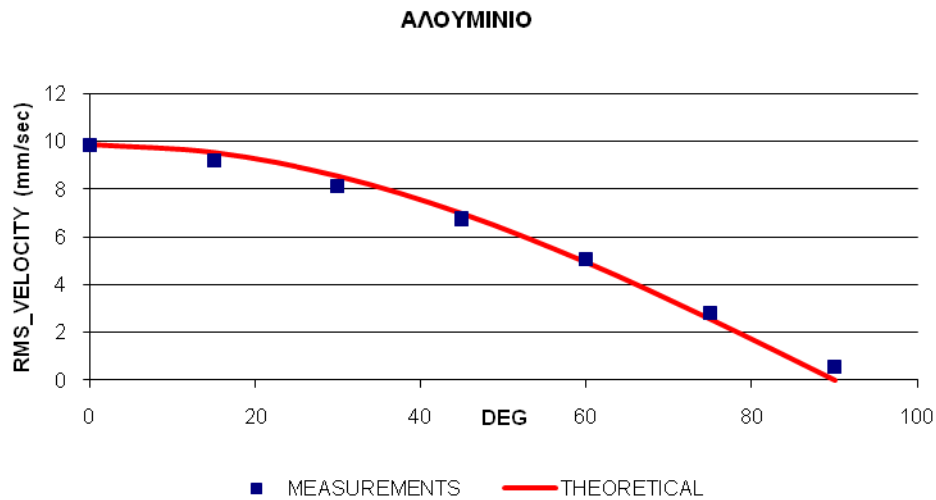


Σχήμα 3.25: Διάταξη με παρεμβολή καθρέπτη.

Ο διεγέρτης έχει τοποθετηθεί πάνω σε μια βάση στήριξης, η οποία με τη σειρά της έχει στηριχθεί σε ένα μοιρογνομόνιο. Με τη βοήθεια του μοιρογνομονίου μεταβάλλαμε τη γωνία της θέσης του διεγέρτη κατά το οριζόντιο επίπεδο σε εύρος γωνιών από 0° έως $+90^\circ$, με βήμα 15° , ώστε να διαπιστώσουμε αν η παρουσία του καθρέπτη επηρεάζει την εξάρτηση των μετρήσεων από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης του λέιζερ. Η απόσταση των 514mm που επιλέχθηκε αποτελεί μια από τις βέλτιστες όπως αυτές προτείνονται από τον κατασκευαστή. Ο καθρέπτης που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί έναν κοινό καθρέπτη του εμπορίου χωρίς κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

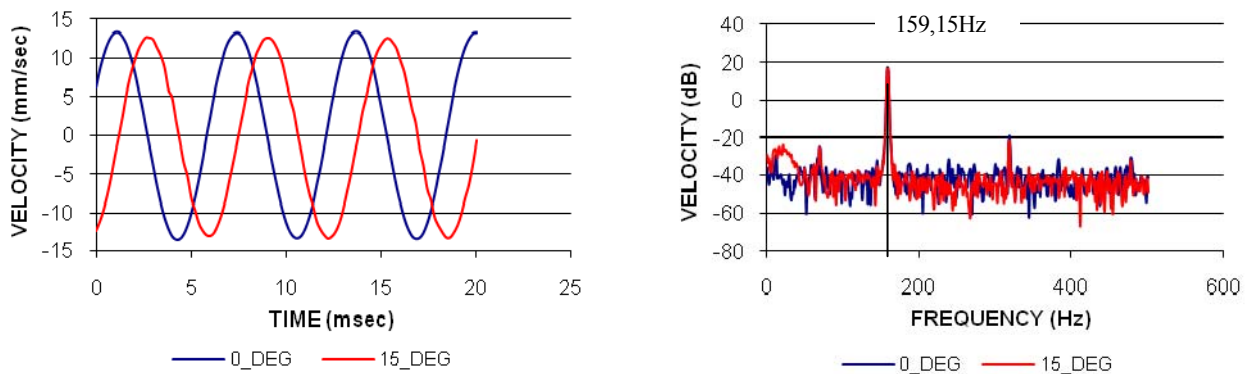
Για το σύνολο των παραπάνω δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η επιφάνεια αλουμινίου και δόθηκαν στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου οι τιμές της συχνότητας δειγματοληψίας $f_s=5000\text{Hz}$, του συνολικού αριθμού σημείων $n_{pt}=4096$ και του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των φασμάτων $N_{FFT}=4096$.

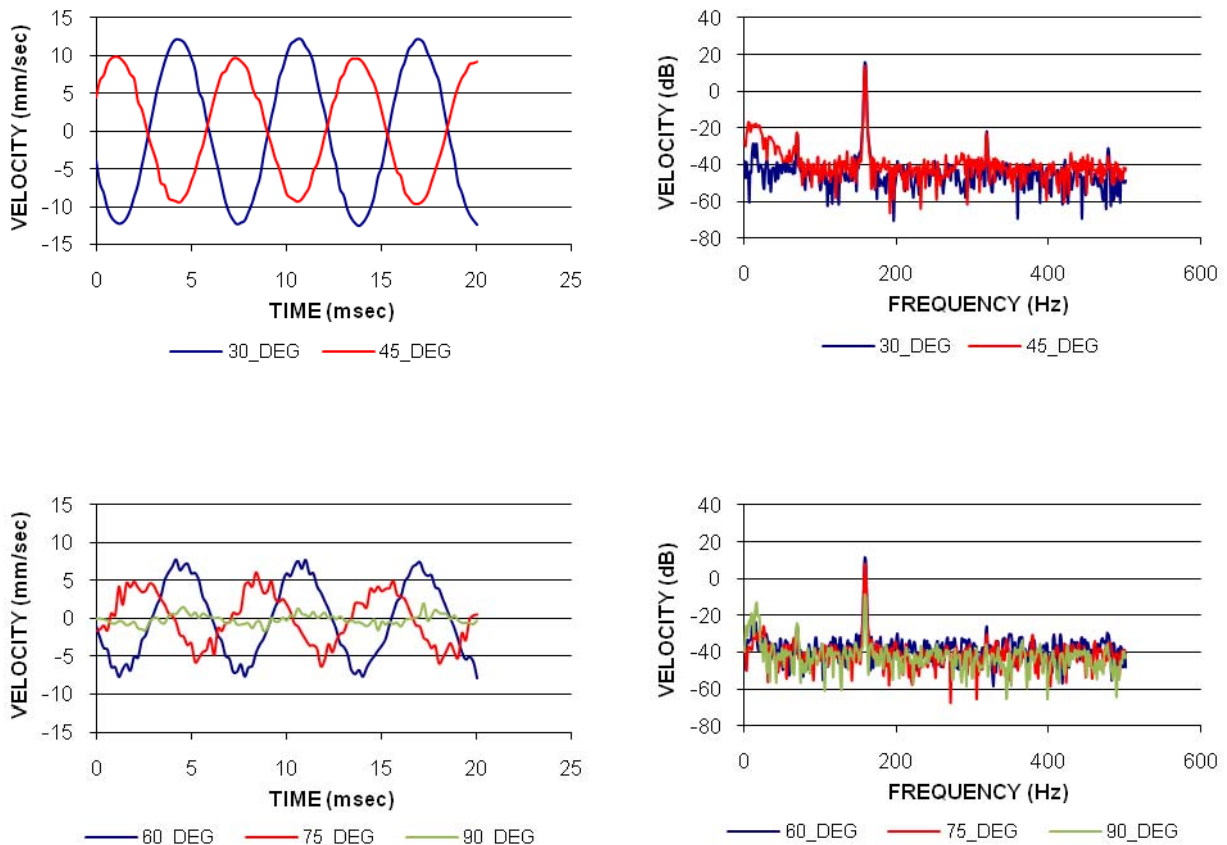
Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 3.26 και 3.27. Πιο αναλυτικά, στο σχήμα 3.26 παρουσιάζονται οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού για το επιλεγμένο εύρος γωνιών καθώς και η αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη. Παρατηρούμε την εξάρτηση των μετρήσεων από το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης, η οποία είναι ανεξάρτητη από την παρεμβολή του καθρέπτη. Παρατηρούμε επίσης ότι οι πειραματικές μας τιμές προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τις αντίστοιχες θεωρητικές.



Σχήμα 3.26: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού και προσέγγιση της αντίστοιχης θεωρητικής καμπύλης.

Στο σχήμα 3.27 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα και τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού. Η μορφή των χρονικών σημάτων είναι ημιτονοειδής και αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της απλής αρμονικής κίνησης που παράγεται από το διεγέρτη. Ωστόσο, η ημιτονοειδής μορφή του σήματος επιδεινώνεται όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης του λέιζερ και μετρήσεις ακριβείας μπορούμε να πραγματοποιήσουμε στο εύρος γωνιών των $\pm 60^\circ$. Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι η παρεμβολή του καθρέπτη επηρεάζει το εύρος γωνιών στο οποίο μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις ακριβείας καθώς για την επιφάνεια αλουμινίου έχει προκύψει στην παράγραφο 3.2 ότι χωρίς την παρεμβολή του καθρέπτη το αντίστοιχο εύρος γωνιών είναι αυτό των $\pm 70^\circ$. Στα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού παρατηρούμε ότι σε όλο το εύρος των μοιρών έχει αποτυπωθεί σωστά η συχνότητα του παραγόμενου κραδασμού από το διεγέρτη στα 159,15Hz.

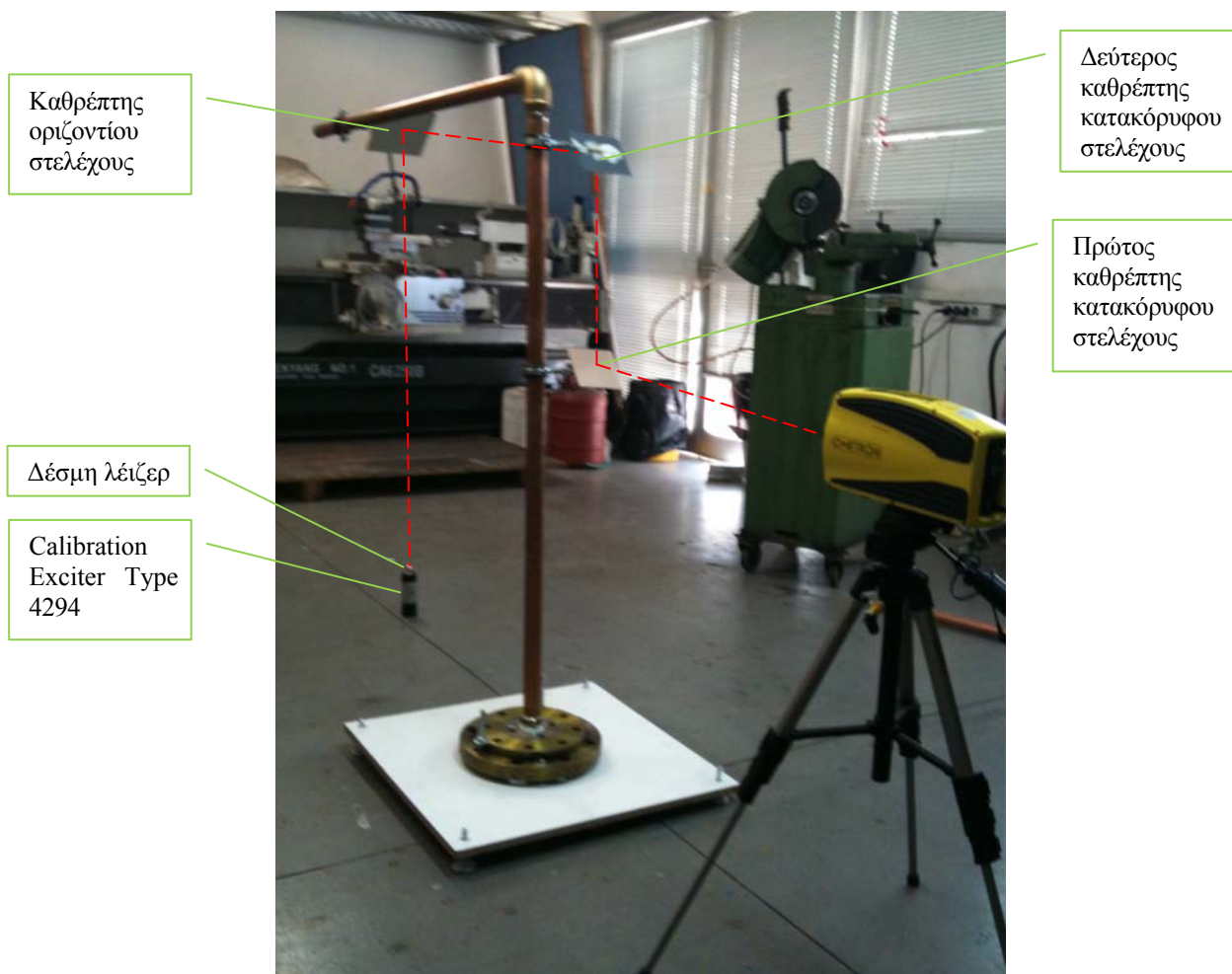




Σχήμα 3.27: Χρονικά σήματα και φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού.

3.4.2 Με παρεμβολή τριών καθρεπτών.

Στη συνέχεια, για να ελέγξουμε την ακρίβεια στη λήψη μετρήσεων όταν μεταξύ VH-1000-D και του διεγέρτη παρεμβάλλονται τρεις καθρέπτες κατασκευάσαμε στο εργαστήριο τη διάταξη του σχήματος 3.28. Για την κατασκευή της χρησιμοποιήθηκαν δύο χαλκοσωλήνες μήκους 1m έκαστος, ένας χαλκοσωλήνας μήκους 1,2m, τρεις καθρέπτες του εμπορίου 10×10cm², τα εξαρτήματα στήριξης των καθρεπτών, τα εξαρτήματα σύνδεσης των σωλήνων και η βάση στήριξης της κατασκευής. Η σχεδίαση της κατασκευής επιτρέπει τη μετακίνηση των καθρεπτών κατά μήκους των σωλήνων και την περιστροφή τους σε εύρος γωνιών 0°-360°, ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή τους στις εκάστοτε συνθήκες μέτρησης. Παρέχει επίσης δυνατότητα αποσυναρμολόγησης για να είναι δυνατή η εύκολη αποθήκευση και μεταφορά της.



Σχήμα 3.28: Διάταξη με τρεις καθρέπτες.

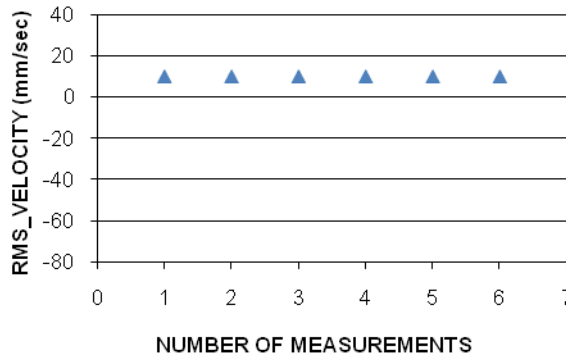
Τοποθετήσαμε το VH-1000-D σε απόσταση 1480mm από τη διάταξη και προσαρμόσαμε τον χαμηλότερο σε ύψος καθρέπτη του κατακόρυφου σωλήνα ώστε η δέσμη του λέιζερ να προσπίπτει σε αυτόν και να εκτρέπεται κατά γωνία 90° . Στηρίξαμε δηλαδή τον καθρέπτη στο κατάλληλο ύψος της σωλήνωσης ώστε η δέσμη του λέιζερ να συναντά το κέντρο αυτού και τον στρέψαμε ώστε να σχηματίζει γωνία 45° με το κάθετο προς τη δέσμη του λέιζερ επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό η δέσμη εκτρέπεται με τη βοήθεια του καθρέπτη σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης κατά γωνία 90° και κατευθύνεται προς το κέντρο του δεύτερου καθρέπτη του κατακόρυφου σωλήνα. Ο δεύτερος καθρέπτης έχει επίσης στραφεί ώστε να σχηματίζει γωνία 45° με το κάθετο προς τη δέσμη του λέιζερ επίπεδο και κατευθύνει τη δέσμη προς τον τρίτο καθρέπτη της διάταξης. Ο τρίτος καθρέπτης είναι στηριγμένος στην οριζόντια σωλήνωση και αντίστοιχα με τους άλλους δύο εκτρέπει τη δέσμη κατά γωνία 90° κατευθύνοντας την κατακόρυφα προς το Calibration Exciter Type 4294, το οποίο έχει τοποθετηθεί κάθετα προς το έδαφος. Η απόσταση των 1480mm που επιλέχθηκε αποτελεί μια από τις βέλτιστες όπως αυτές προτείνονται από τον κατασκευαστή.

Για το σύνολο των παραπάνω δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η επιφάνεια αλουμινίου και δόθηκαν στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου οι τιμές της

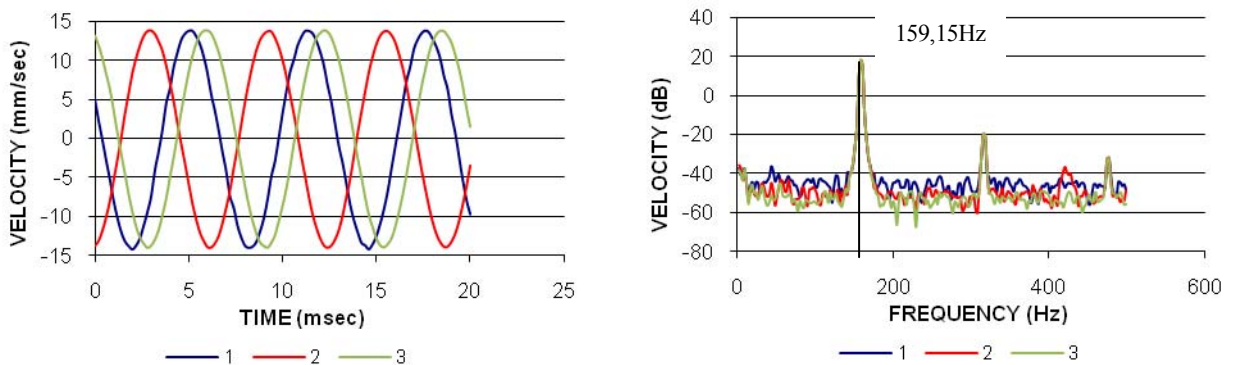
συχνότητας δειγματοληψίας $f_s=5000\text{Hz}$, του συνολικού αριθμού σημείων στο φάσμα $n_{pt}=2048$ και του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των φασμάτων $NFFT=2048$.

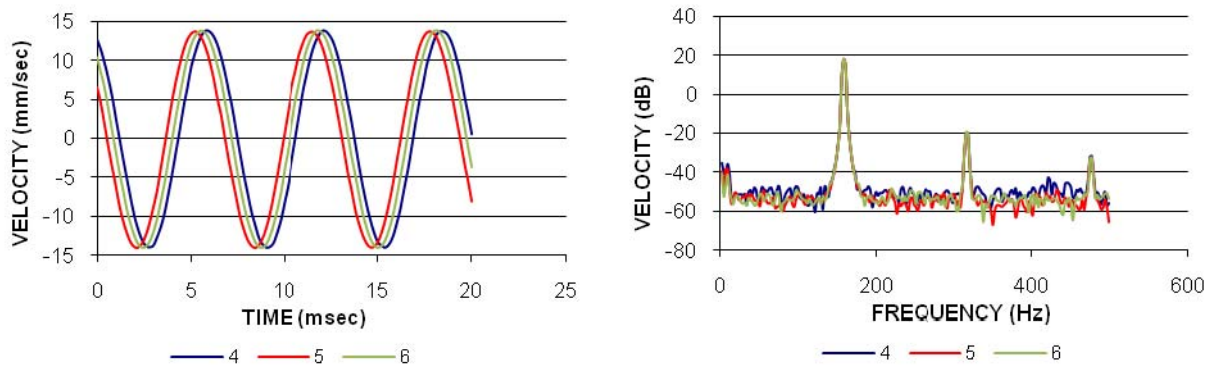
Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 3.29 και 3.30. Πιο αναλυτικά, στο σχήμα 3.29 παρουσιάζονται οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού για ένα δείγμα έξι μετρήσεων, οι οποίες αποτυπώνουν σωστά τον παραγόμενο από το διεγέρτη κραδασμό, χωρίς να αποκλίνουν ιδιαίτερα μεταξύ τους.

Στο σχήμα 3.30 παρουσιάζονται τα χρονικά σήματα και τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού. Η μορφή των σημάτων είναι ημιτονοειδής και αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της απλής αρμονικής κίνησης που παράγεται από το διεγέρτη. Στα φάσματα της ταχύτητας του κραδασμού παρατηρούμε ότι για το σύνολο του δείγματος έχει αποτυπωθεί σωστά η συχνότητα του παραγόμενου κραδασμού από το διεγέρτη στα $159,15\text{Hz}$.



Σχήμα 3.29: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού.





Σχήμα 3.30: Χρονικά σήματα και φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού.

3.5 Συμπεράσματα.

Στην περίπτωση που η δέσμη του λέιζερ δεν εστιάζει στο στόχο σε ευθεία γραμμή αλλά υπό γνωστή γωνία όπως και στην περίπτωση που εκτρέπεται με τη βοήθεια καθρεπτών, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση τόσο του λέιζερ όσο και των καθρεπτών ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα λόγω απόκλισης από τις ενδεδειγμένες για την κάθε περίπτωση μοίρες εκτροπής της δέσμης. Στη συνέχεια, το πραγματικό μέγεθος του κραδασμού προκύπτει έπειτα από τη διόρθωση της λαμβανόμενης μέτρησης με το αντίστοιχο συνημίτονο της γωνίας εκτροπής.

Ωστόσο, ακριβείς μετρήσεις μπορούμε να λάβουμε σε συγκεκριμένο εύρος γωνιών, το οποίο εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του υπό μελέτη αντικειμένου. Όπως προέκυψε από την επισκόπηση των χρονικών σημάτων της ταχύτητας του κραδασμού, όσο πιο λεία είναι η επιφάνεια τόσο μεγαλύτερο είναι το παραπάνω εύρος. Η παρεμβολή των καθρεπτών επηρεάζει το υπόψιν εύρος γωνιών, το οποίο ενδέχεται να είναι λίγο μικρότερο καθώς έχουμε μεγαλύτερα επίπεδα σκέδασης της δέσμης και κατ' επέκταση επηρεάζεται η ισχύς του σήματος περιορίζοντας την ικανότητα λήψης μετρήσεων ακριβείας του οργάνου..

Στην περίπτωση που η δέσμη του λέιζερ εστιάζει στο στόχο σε ευθεία γραμμή και ζητούμενο είναι η λήψη μετρήσεων ακριβείας από μεγάλη απόσταση, λαμβάνουμε ακριβέστερα αποτελέσματα ρυθμίζοντας την εστίαση ώστε να έχουμε πάντα τη βέλτιστη δυνατή. Έχοντας ρυθμίσει την εστίαση για κάποια συγκεκριμένη απόσταση αναφοράς οι μετρήσεις παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια όσο απομακρυνόμαστε από αυτή δεδομένου όμως ότι η δέσμη του λέιζερ δεν υπερβαίνει την επιφάνεια του στόχου. Εάν όμως επιδιώκουμε τη βέλτιστη δυνατή εστίαση, το εύρος των αποστάσεων στο οποίο είναι δυνατό να λάβουμε μετρήσεις ακριβείας αυξάνει σημαντικά, αλλά και σε αυτήν την περίπτωση οι μετρήσεις χειροτερεύουν αν η δέσμη του λέιζερ υπερβεί την επιφάνεια του στόχου. Αντίθετα πλησιάζοντας προς το στόχο η ακρίβεια των μετρήσεων παραμένει

ανεπηρέαστη, είτε γίνεται ρύθμιση της εστίασης για κάθε απόσταση είτε αν αυτή έχει ρυθμιστεί για κάποια συγκεκριμένη απόσταση αναφοράς.

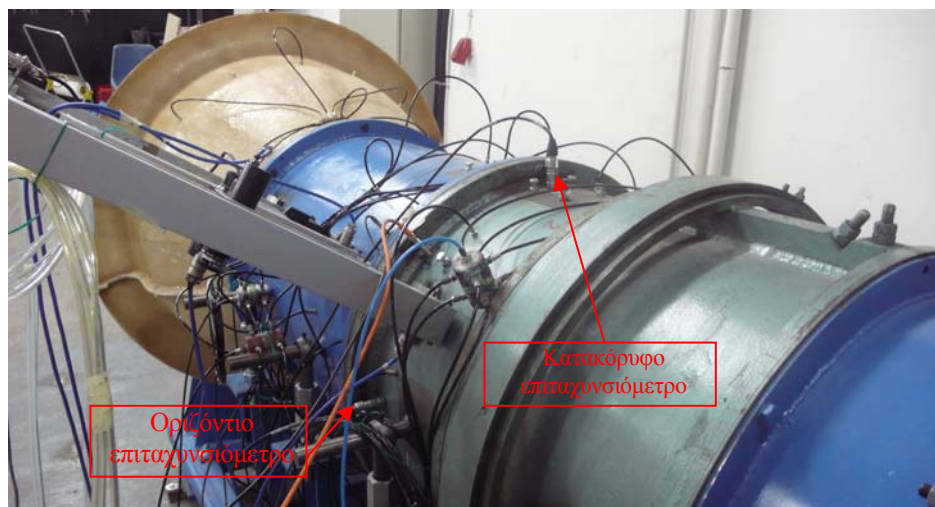
4

Μέτρηση κραδασμών σε στροβιλομηχανές

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του VH-1000-D για τη μέτρηση κραδασμών σε διατάξεις αεριοστροβίλων του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π. Η πρώτη σειρά μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στη διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών, όπου παράλληλα με το VH-1000-D χρησιμοποιήσαμε για τη μέτρηση των κραδασμών και συμβατικά επιταχυνσιόμετρα στις ίδιες θέσεις της μηχανής, ώστε να διαπιστωθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και η αξιοπιστία του συστήματος λέιζερ. Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε μια ακόμη σειρά δοκιμών στη διάταξη του μικρού στροβιλοκινητήρα AMT Olympus στο δοκιμαστήριο του εργαστηρίου. Εδώ το VH-1000-D αποτέλεσε τη μοναδική μέθοδο μέτρησης κραδασμών, λόγω της ικανοποιητικής του απόδοσης στις προηγούμενες δοκιμές.

4.1 Διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

Στη διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών πραγματοποιήσαμε μετρήσεις κραδασμών στην ένατη και στη δωδέκατη ώρα της μηχανής. Συγχρόνως με το VH-1000-D χρησιμοποιήσαμε και συμβατικά επιταχυνσιόμετρα ώστε να μελετήσουμε τόσο την απόκλιση των μετρήσεων μεταξύ των δύο μεθόδων, όσο και κατά πόσο αυτές δικαιολογούνται από την ακρίβεια των οργάνων. Τα σημεία τοποθέτησης των επιταχυνσιομέτρων παρουσιάζονται στα σχήματα 4.1 και 4.2, και στο Παράρτημα III δίδονται οι προδιαγραφές τους.



Σχήμα 4.1: Σημεία τοποθέτησης των επιταχυνσιομέτρων στη μηχανή.



Σχήμα 4.2: Τοποθέτηση επιταχυνσιόμετρου στην ένατη ώρα της διάταξης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

Οι δοκιμές μας πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής, χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητη παράμετρο τη ρύθμιση των στροφών των δύο ηλεκτροκινητήρων και κατ' επέκταση των στροφών των αντίστοιχων πτερωτών. Πραγματοποιήσαμε μια σειρά δοκιμών για τη μέτρηση του οριζόντιου κραδασμού ρυθμίζοντας το τρίποδο στήριξης του VH-1000-D, ώστε η δέσμη του λέιζερ να βρίσκεται στο ίδιο ύψος με το οριζόντιο επιταχυνσιόμετρο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.

Για τη μέτρηση του κατακόρυφου κραδασμού προχωρήσαμε στη διεξαγωγή τριών σειρών δοκιμών, κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια διαφορετική μέθοδο εκτροπής της δέσμης του λέιζερ από το οριζόντιο προς το κατακόρυφο επίπεδο. Στην πρώτη σειρά δοκιμών χρησιμοποιήσαμε για την εκτροπή της δέσμης τη διάταξη με τους τρεις καθρέπτες που περιγράφεται στην παράγραφο 3.4.2. Στη δεύτερη σειρά χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη αλλά η δέσμη του λέιζερ προσπίπτει μόνο στον καθρέπτη του οριζόντιου στελέχους, καθώς κατευθύνεται προς αυτόν ήδη υπό γωνία που της έχει προσδοθεί από την ανάκλιση της βάσης στήριξης του VH-1000-D στο τρίποδο. Στην τελευταία σειρά δοκιμών στηρίξαμε πάνω στη μηχανή έναν ηλεκτρομαγνήτη, στον οποίο προσαρμόσαμε ένα καθρέπτη με δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας του. Στην περίπτωση αυτή η δέσμη του λέιζερ κατευθύνεται επίσης υπό γωνία προς τον καθρέπτη, ο οποίος ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε στη συνέχεια η δέσμη να προσπίπτει κατακόρυφα στη μηχανή και δίπλα από τη θέση του κατακόρυφου επιταχυνσιόμετρου. Οι τρεις μέθοδοι που περιγράφησαν παρουσιάζονται στα σχήματα 4.4-4.6. Στον πίνακα 4.1 δίδονται κάποιες χαρακτηριστικές πληροφορίες για τη διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.



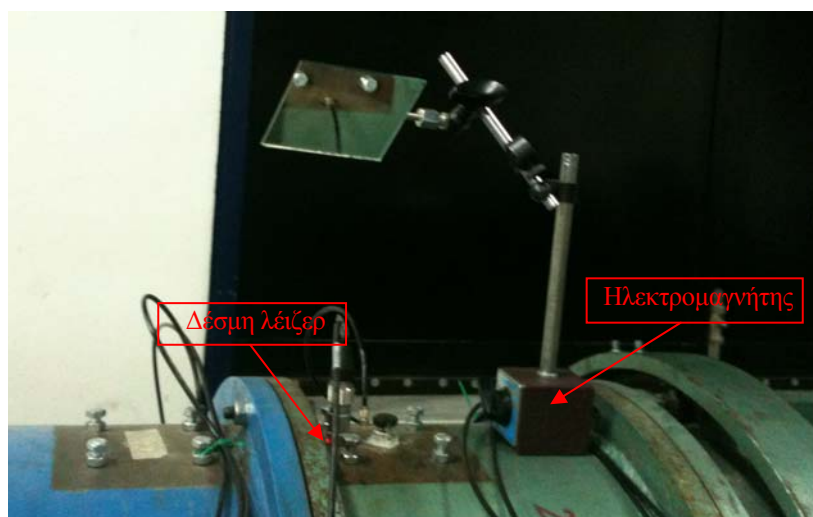
Σχήμα 4.3: Εστίαση της δέσμης του λέιζερ κατά το οριζόντιο επίπεδο δίπλα από το αντίστοιχο επιταχυνσιόμετρο.



Σχήμα 4.4: Μέτρηση κατακόρυφου κραδασμού με χρήση τριών καθρεπτών.



Σχήμα 4.5: Θέση ανάκλισης του VH-1000-D.



Σχήμα 4.6: Μέτρηση κατακόρυφου κραδασμού με χρήση ενός καθρέπτη και ηλεκτρομαγνήτη.

Μετάδοση Κίνησης: Ιμαντοκίνηση	Σχέση μετάδοσης: 1:1	Διάμετρος τροχαλιών: D=180mm
Ιμάντες	3 ιμάντες SPA 2240 power plus wedge ανά ζεύγος τροχαλιών	Το μήκος του κάθε ιμάντα είναι: L=2240mm
Ηλεκτροκινητήρες (από την είσοδο του αέρα και προς τα πίσω η αρίθμηση)	1 ^{ης} πτερωτής : AC 3φασικός διπολικός 45kW. Έλεγχος στροφών με inverter (έλεγχος συχνότητας)	2 ^{ης} πτερωτής : 42kW DC. Έλεγχος στροφών με θυρίστορ.
Στροφές	Έως 3000rpm	Έως 3000rpm
Αριθμός πτερυγίων	1 ^{ης} πτερωτής: 34	2 ^{ης} πτερωτής: 34
Μέτρηση κραδασμών	Οριζόντιος και κατακόρυφος κραδασμός με χρήση επιταχυνσιόμετρου	
Μέτρηση στροφών των πτερωτών	Με αισθητήρα προσέγγισης (proximity sensor) πάνω από κάθε πτερωτή (μετράμε τη συχνότητα περάσματος πτερυγίου και τη διαιρούμε με τον αριθμό των πτερυγίων)	

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά στοιχεία της διάταξης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

Για το σύνολο των παραπάνω δοκιμών, δόθηκαν στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου οι τιμές της συχνότητας δειγματοληψίας $f_s=10000\text{Hz}$, του συνολικού αριθμού σημείων $n_{\text{pt}}=8192$ και του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των φασμάτων $N_{\text{FFT}}=8192$. Για κάθε

κατάσταση λειτουργίας είχαμε ρυθμίσει την περιοδική λήψη των μετρήσεων ανά 10 sec. Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η διάταξη δοκιμών σε σύνδεση με περιβάλλον Η/Υ.

Το πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων παρέχει τα φάσματα των δύο μεθόδων σε dB, τα οποία ωστόσο δε μπορούν να συγκριθούν άμεσα μεταξύ τους καθώς το επιταχυνσιόμετρο καταγράφει ενδείξεις επιτάχυνσης, ενώ το VH-1000-D καταγράφει ενδείξεις ταχύτητας. Στο σημείο αυτό θα ανάγουμε για κάθε συχνότητα f τα φάσματα από dB σε mm/sec και για τις δύο μεθόδους και στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στη σύγκρισή τους. Μετατρέπουμε αρχικά το φάσμα του επιταχυνσιόμετρου από dB σε m/sec^2 , και στη συνέχεια σε mm/sec, με τη βοήθεια των εξισώσεων 4.1 και 4.2.

$$A_{accel(m/sec^2)} = \sqrt{10^{\frac{A_{accel(dB)}}{10}}} \quad (4.1)$$

$$V_{accel(mm/sec)} = \frac{A_{accel(m/sec^2)} \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.2)$$

Έπειτα, μετατρέπουμε το λαμβανόμενο από VH-1000-D φάσμα, από dB σε mm/sec, με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.3.

$$V_{laser(mm/sec)} = \sqrt{10^{\frac{V_{laser(dB)}}{10}}} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.7: Διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών σε σύνδεση με περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή.

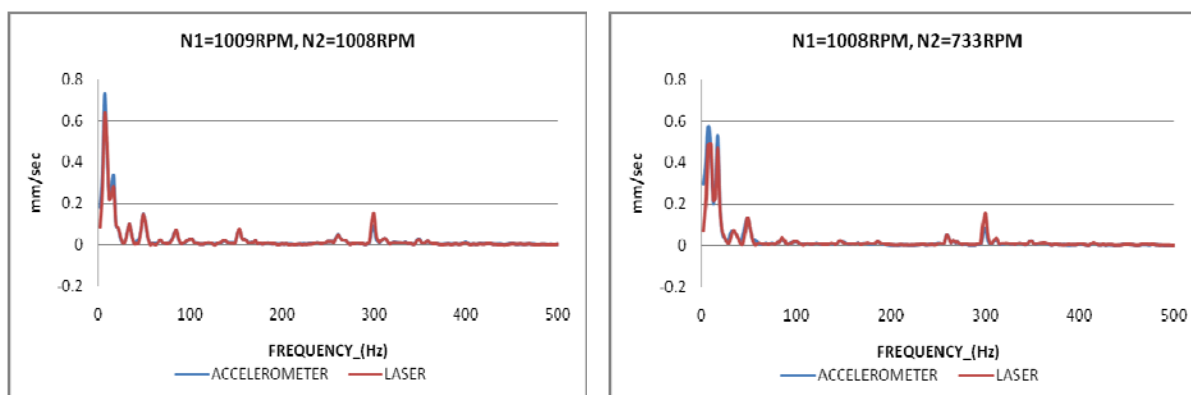
4.1.1 Μετρήσεις στην ένατη ώρα της μηχανής.

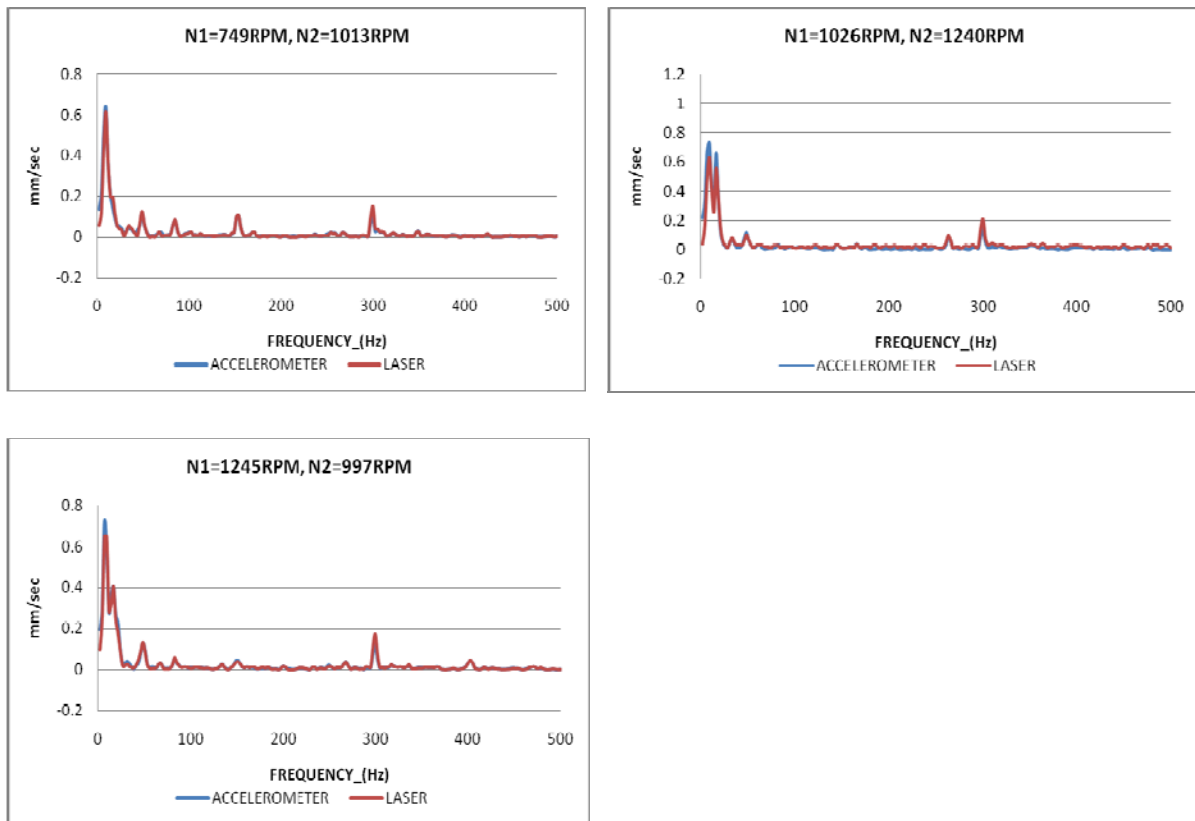
Τοποθετήσαμε το VH-1000-D σε απόσταση 2446mm από τη μηχανή και ρυθμίσαμε το τρίποδο στήριξης στο κατάλληλο ύψος, ώστε η δέσμη του λέιζερ να εστιάζει σε ευθεία γραμμή ακριβώς στην ένατη ώρα και δίπλα από τη θέση του οριζόντιου επιταχυνσιόμετρου, όπως είδαμε στο σχήμα 4.3. Πραγματοποιήσαμε τις μετρήσεις μας στη διάταξη των αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών για πέντε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας συγχρόνως και με τις δύο μεθόδους. Τα ζεύγη στροφών που αντιστοιχούν στα παραπάνω σημεία λειτουργίας δίδονται στον πίνακα 4.2 και η απόσταση των 2446mm που επιλέχθηκε αποτελεί μια από τις βέλτιστες, όπως αυτές προτείνονται από τον κατασκευαστή.

N1 (στροφές πρώτης πτερωτής σε RPM)	N2 (στροφές δεύτερης πτερωτής σε RPM)
1009	1008
1008	733
749	1013
1026	1240
1245	997

Πίνακας 4.2: Ζεύγη στροφών των πτερωτών.

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων. Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού για τα διάφορα σημεία λειτουργίας της μηχανής, συγχρόνως και με τις δύο μεθόδους. Διαπιστώνουμε τη σύγκλιση των μεθόδων καθώς οι διαφορές των φασμάτων ισχύος δικαιολογούνται από τη διακριτική ικανότητα των οργάνων.





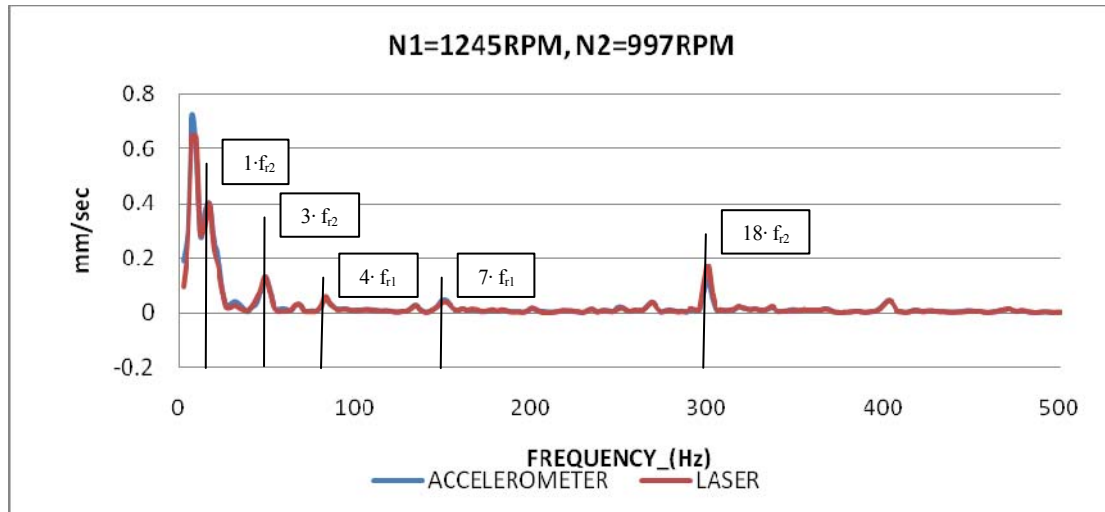
Σχήμα 4.8: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού.

Η επισκόπηση των φασμάτων ισχύος μας δείχνει αμέσως τις συχνότητες οι οποίες εμπεριέχουν διαγνωστική πληροφορία και στις οποίες έχουμε συνιστώσες σημαντικού μεγέθους. Οι συχνότητες αυτές αντιστοιχούν συνήθως είτε σε ακέραια πολλαπλάσια των συχνοτήτων περιστροφής των ατράκτων f_{r1} και f_{r2} , οι οποίες υπολογίζονται με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.4, είτε σε συχνότητες περάσματος πτερυγίων (BPF), δηλαδή σε ακέραια πολλαπλάσια του αριθμού των πτερυγίων των πτερωτών (όπου $n_z=34$) επί τη συχνότητα περιστροφής της ατράκτου.

$$f_r = \frac{N}{60} \tag{4.4}$$

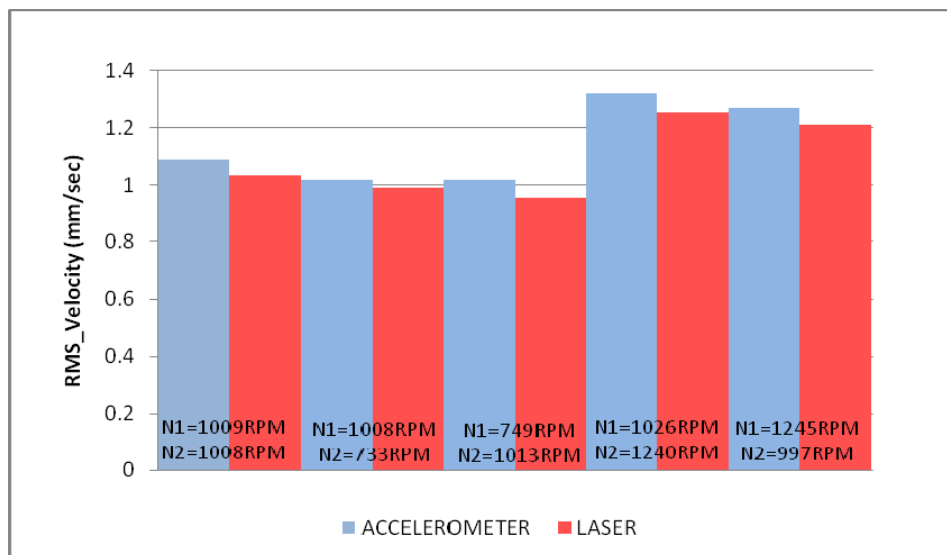
Όπου N η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου σε (RPM).

Για παράδειγμα, στο πέμπτο σημείο λειτουργίας της μηχανής όπου $N_1=1245\text{RPM}$ και $N_2=997\text{RPM}$, οι αντίστοιχες συχνότητες περιστροφής προκύπτουν ίσες με $f_{r1} = \frac{1245}{60} = 20.7519\text{ Hz}$ και $f_{r2} = \frac{997}{60} = 16,6196\text{ Hz}$. Παραθέτουμε το αντίστοιχο φάσμα, σχήμα 4.9, με σημειωμένες τις συνιστώσες που αντιστοιχούν στις συχνότητες: $1 \cdot f_{r2} \approx 16,88984\text{Hz}$, $3 \cdot f_{r2} \approx 48,82813\text{Hz}$, $4 \cdot f_{r1} \approx 83,00718\text{Hz}$, $7 \cdot f_{r1} \approx 146,4844\text{Hz}$ και $18 \cdot f_{r2} \approx 300,293\text{Hz}$.



Σχήμα 4.9: Συνιστώσες σημαντικού μεγέθους σε χαρακτηριστικές συχνότητες της κατάστασης λειτουργίας της μηχανής.

Παραθέτουμε στη συνέχεια το σχήμα 4.10, στο οποίο παρουσιάζονται οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού για τα διάφορα σημεία λειτουργίας της μηχανής συγχρόνως και με τις δύο μεθόδους. Διαπιστώνουμε ότι για το σύνολο των καταστάσεων λειτουργίας οι τιμές που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων του επιταχυνσιόμετρου είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το σύστημα λέιζερ. Επίσης οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού αυξάνονται και στις δύο μεθόδους με την αύξηση των στροφών λειτουργίας.



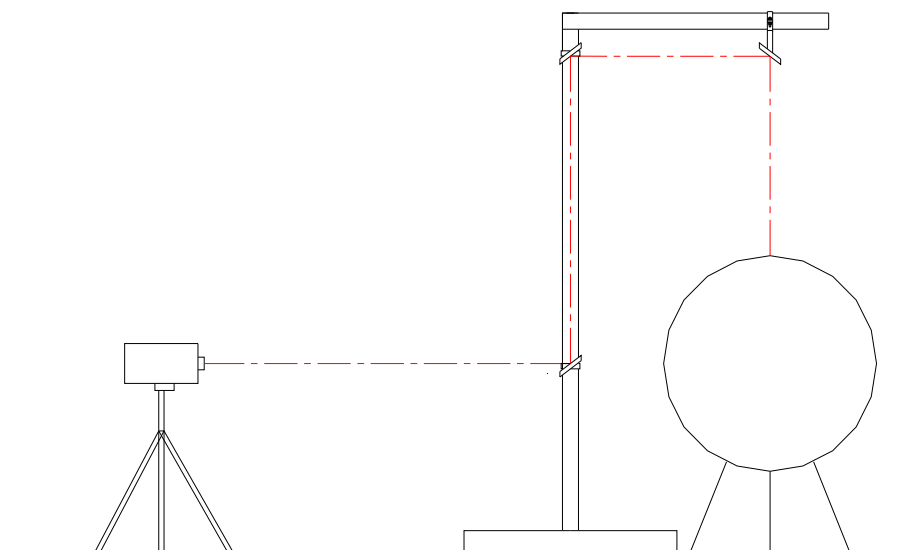
Σχήμα 4.10: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού για τα διάφορα σημεία λειτουργίας της μηχανής.

4.1.2 Μετρήσεις στη δωδέκατη ώρα με χρήση τριών καθρέπτων.

Τοποθετήσαμε το VH-1000-D σε απόσταση 2446mm από τη διάταξη εκτροπής της δέσμης του λέιζερ, στην οποία ρυθμίσαμε τους τρεις καθρέπτες όπως ακριβώς περιγράψαμε στην παράγραφο 3.4.2, ώστε η δέσμη να εκτρέπεται από το οριζόντιο στο κατακόρυφο επίπεδο και να προσπίπτει δίπλα ακριβώς από τη θέση του κατακόρυφου επιταχυνσιόμετρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11. Πραγματοποιήσαμε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις ανά 10sec συγχρόνως και με τις δύο μεθόδους για μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας που αντιστοιχεί στο ζεύγος στροφών ($N_1=1045\text{RPM}$, $N_2=1110\text{RPM}$). Η απόσταση των 2446mm που επιλέχθηκε αποτελεί μια από τις βέλτιστες, όπως αυτές προτείνονται από τον κατασκευαστή.

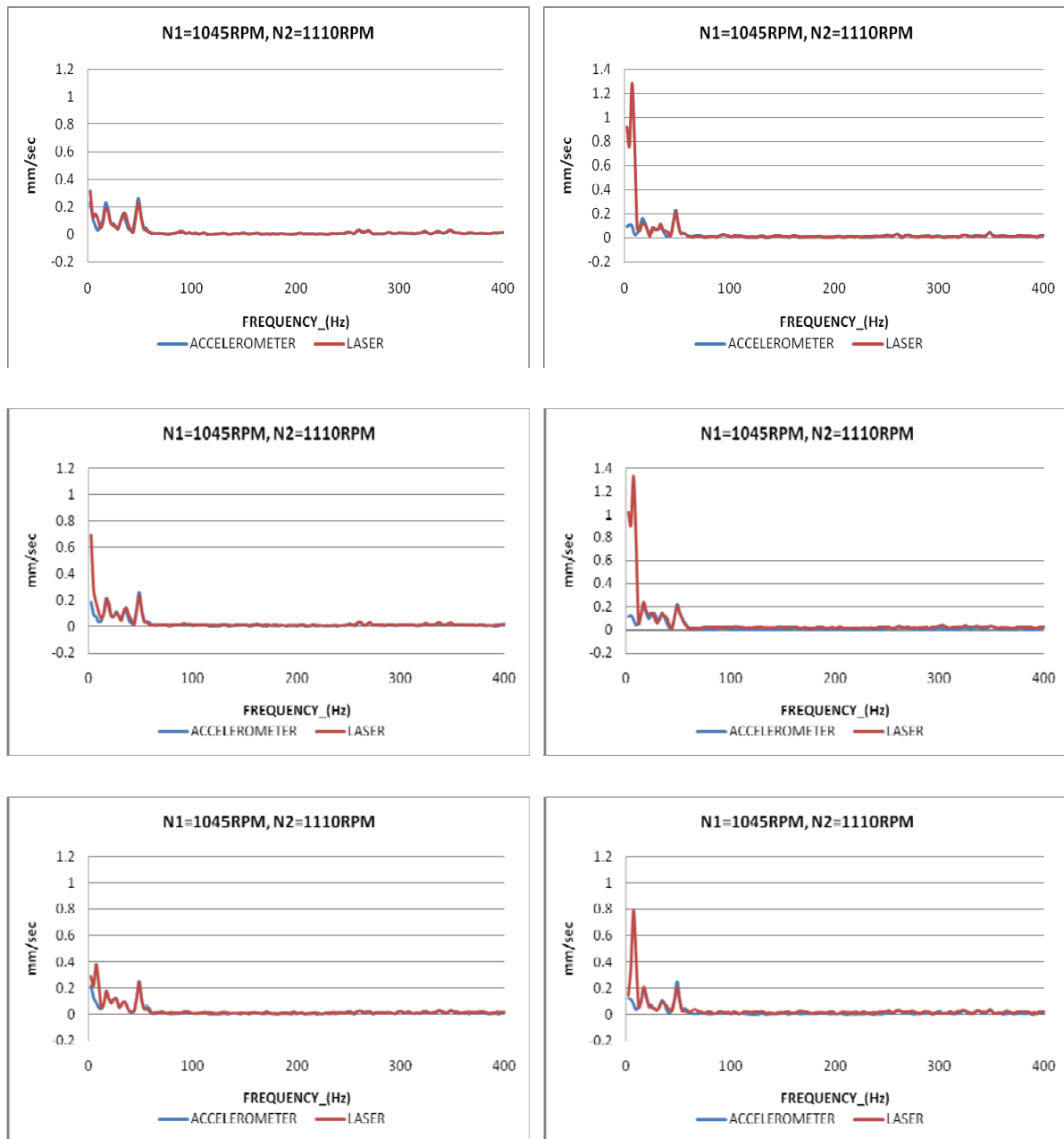


Σχήμα 4.11: Εστίαση της δέσμης του λέιζερ κατά το κατακόρυφο επίπεδο δίπλα από το αντίστοιχο επιταχυνσιόμετρο.



Σχήμα 4.12: Διαδρομή της δέσμης του λέιζερ.

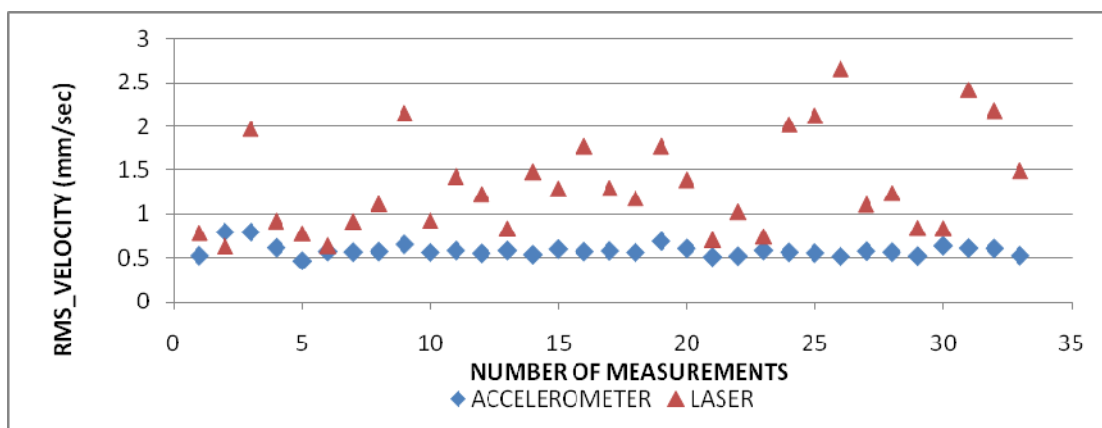
Στα σχήματα 4.13 έως 4.15 παρουσιάζονται επιλεκτικά τα αποτελέσματα από την επεξεργασία ορισμένου αριθμού μετρήσεων. Στο σχήμα 4.13 παραθέτουμε τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού συγχρόνως και με τις δύο μεθόδους, όπου και διαπιστώνουμε τη σύγκλιση τους για συχνότητες μεγαλύτερες των 12Hz. Στις χαμηλότερες συχνότητες παρατηρείται στα περισσότερα διαγράμματα μια σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων με την εμφάνιση συνιστωσών σημαντικού μεγέθους να καταγράφονται από το σύστημα λέιζερ κι όχι από το επιταχυνσιόμετρο. Οι συνιστώσες αυτές εμφανίζονται στις μετρήσεις εκείνες που κατά τη λήψη τους η αναλογία σήματος προς θόρυβο ήταν υποτυπώδης.



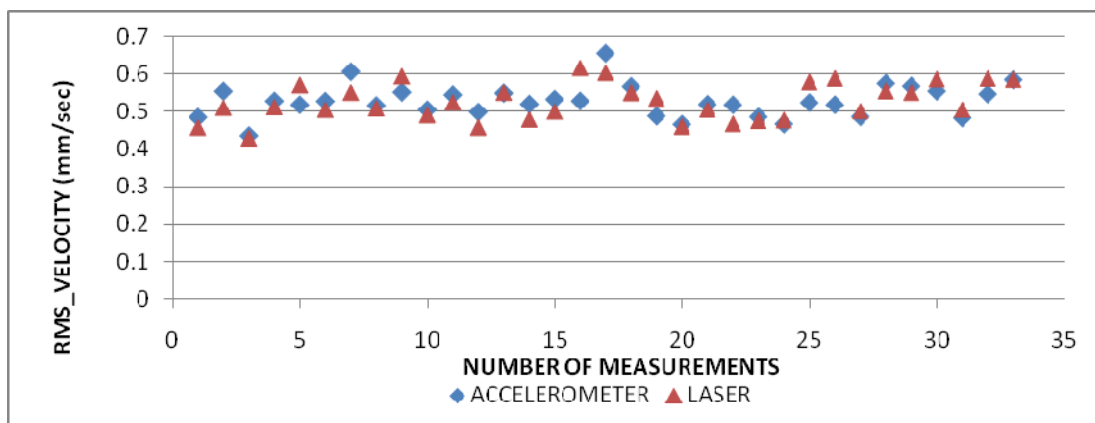
Σχήμα 4.13: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού.

Πριν από την έναρξη των μετρήσεων ρυθμίσαμε το VH-1000-D ώστε να επιτύχουμε το καλύτερο δυνατό σήμα, χωρίς όμως να καταφέρουμε να εξασφαλίσουμε την πληρότητα του μετά τη διέλευση της δέσμης του λέιζερ από τους καθρέπτες. Κατά τη λειτουργία της μηχανής παρατηρήθηκε αυξομείωση της ισχύος του σήματος παρά την αρχική ικανοποιητική ρύθμιση της εστίασης. Ως πιθανή αιτία αυτής της αστάθειας μπορεί να θεωρηθεί η χρήση καθρεπτών που δεν πληρούσαν τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Στην προκειμένη περίπτωση απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη λήψη των μετρήσεων ώστε αυτές να προκύψουν σωστές σε ολόκληρο το επιλεγμένο εύρος συχνοτήτων.

Η παρουσία των εσφαλμένων συνιστωσών που προαναφέραμε στο εύρος συχνοτήτων έως 12Hz επηρεάζει σημαντικά τη διακύμανση των μέσων ενεργών τιμών της ταχύτητας του κραδασμού, όπως παρατηρούμε στο σχήμα 4.14. Για το λόγο αυτό παραθέτουμε και το σχήμα 4.15, το οποίο προκύπτει έπειτα από την αποκοπή των συχνοτήτων που είναι μικρότερες των 12Hz και στο οποίο παρατηρείται η βελτίωση της διακύμανσης των μέσων ενεργών τιμών της ταχύτητας του κραδασμού.



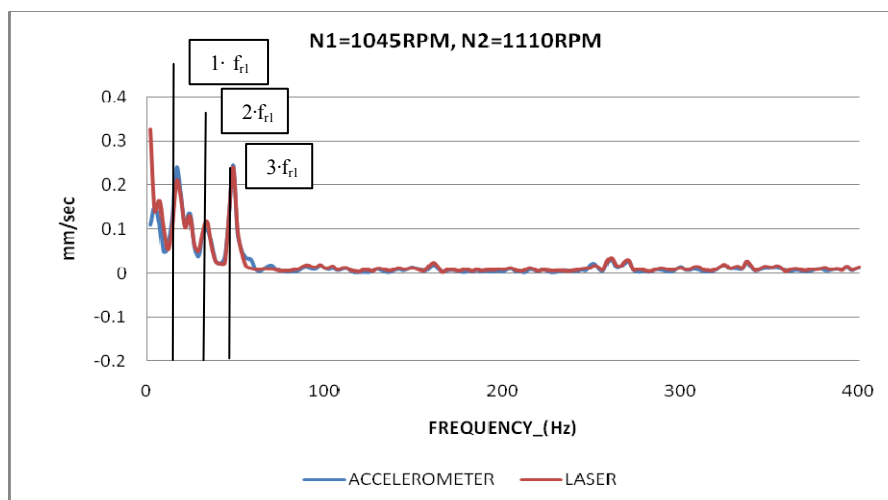
Σχήμα 4.14: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας για ολόκληρο το εύρος των συχνοτήτων.



Σχήμα 4.15: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας για συχνότητες μεγαλύτερες των 12Hz.

Επιπλέον, η επισκόπηση των φασμάτων ισχύος μας δείχνει αμέσως τις συχνότητες οι οποίες εμπεριέχουν διαγνωστική πληροφορία και στις οποίες έχουμε συνιστώσες σημαντικού μεγέθους. Στην περίπτωση μας οι συχνότητες περιστροφής των ατράκτων είναι: $f_{r1} = \frac{1045}{60} = 17,416 \text{ Hz}$ και $f_{r2} = \frac{1110}{60} = 18,5 \text{ Hz}$.

Παραθέτουμε λοιπόν το φάσμα του σχήματος 4.16, με σημειωμένες τις συνιστώσες που αντιστοιχούν στις συχνότητες: $1 \cdot f_{r1} \approx 17,28984 \text{ Hz}$, $2 \cdot f_{r1} \approx 34,17969 \text{ Hz}$ και $3 \cdot f_{r1} \approx 48,82813 \text{ Hz}$.



Σχήμα 4.16: Συνιστώσες σημαντικού μεγέθους σε χαρακτηριστικές συχνότητες της κατάστασης λειτουργίας της μηχανής.

4.1.3 Μετρήσεις στη δωδέκατη ώρα με ανάκλιση του VH-1000-D.

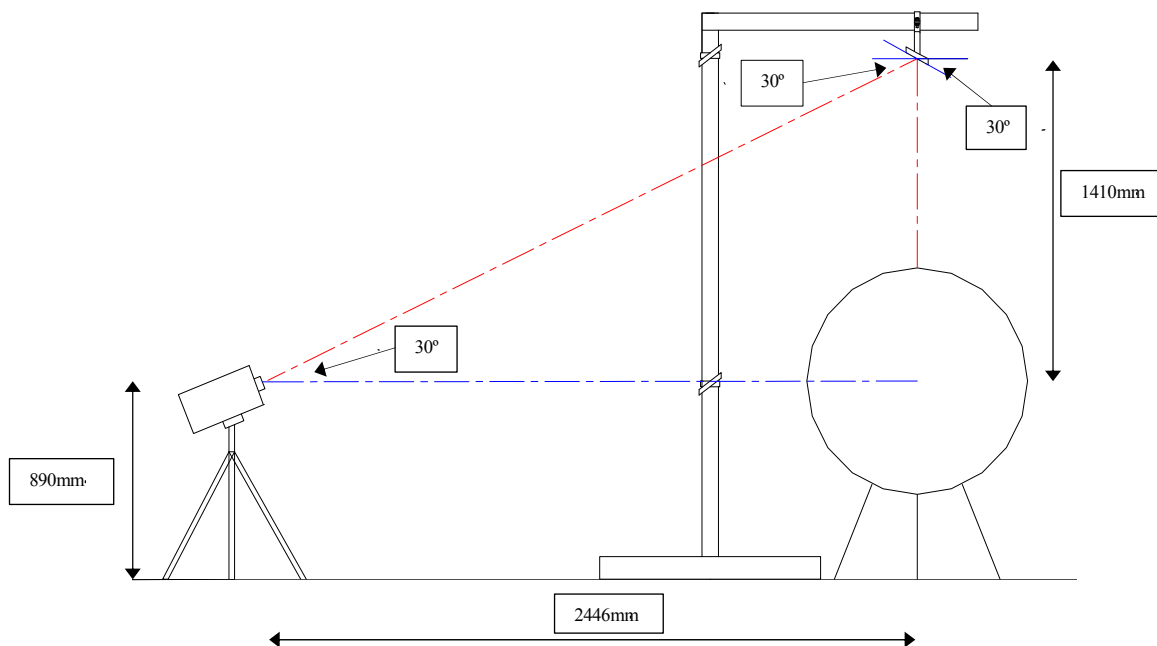
Τοποθετήσαμε το VH-1000-D σε απόσταση 2446mm από τον άξονα της διάταξης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών και υπό γωνία 30° ως προς το οριζόντιο επίπεδο καθώς το τρίποδο στήριξης δίνει τη δυνατότητα ανάκλισης στη θέση στήριξης της συσκευής. Στη διάταξη εκτροπής της δέσμης του λέιζερ τοποθετήσαμε τον καθρέπτη του οριζοντίου στελέχους υπό γωνία επίσης 30° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ώστε η τελική εκτροπή της δέσμης σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης να είναι ίση με 90° σε σχέση πάντα με το οριζόντιο επίπεδο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.17.

Η δέσμη κατευθύνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσπίπτει αρχικά στο κέντρο του καθρέπτη και στη συνέχεια δίπλα ακριβώς από τη θέση του κατακόρυφου επιταχυνσιόμετρου, όπως είδαμε στο σχήμα 4.5. Για να είναι όμως δυνατή η κατεύθυνση της καθ' αυτόν τον τρόπο, πρέπει να υπολογίσουμε αρχικά το ύψος από το οποίο θα πρέπει να ξεκινά τη διαδρομή της. Γνωρίζουμε ότι το ύψος της διάταξης εκτροπής της δέσμης είναι 2300mm, αυτό το ύψος αντιστοιχεί και στον καθρέπτη του οριζοντίου στελέχους. Για γωνία ανάκλισης ίση με 30° και οριζόντια απόσταση 2446mm προκύπτει

από τον ορισμό της εφαπτομένης η αντίστοιχη κατακόρυφη απόσταση σύμφωνα με την εξίσωση 4.5:

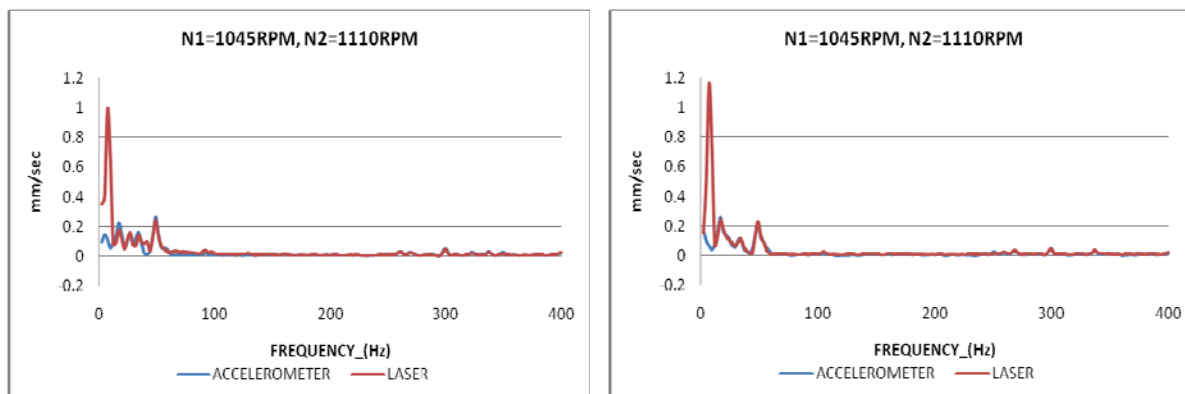
$$\tan \phi = \frac{y}{x} \Rightarrow y = \tan 30^\circ \cdot 2446 \Rightarrow y = 1410\text{mm} \quad (4.5)$$

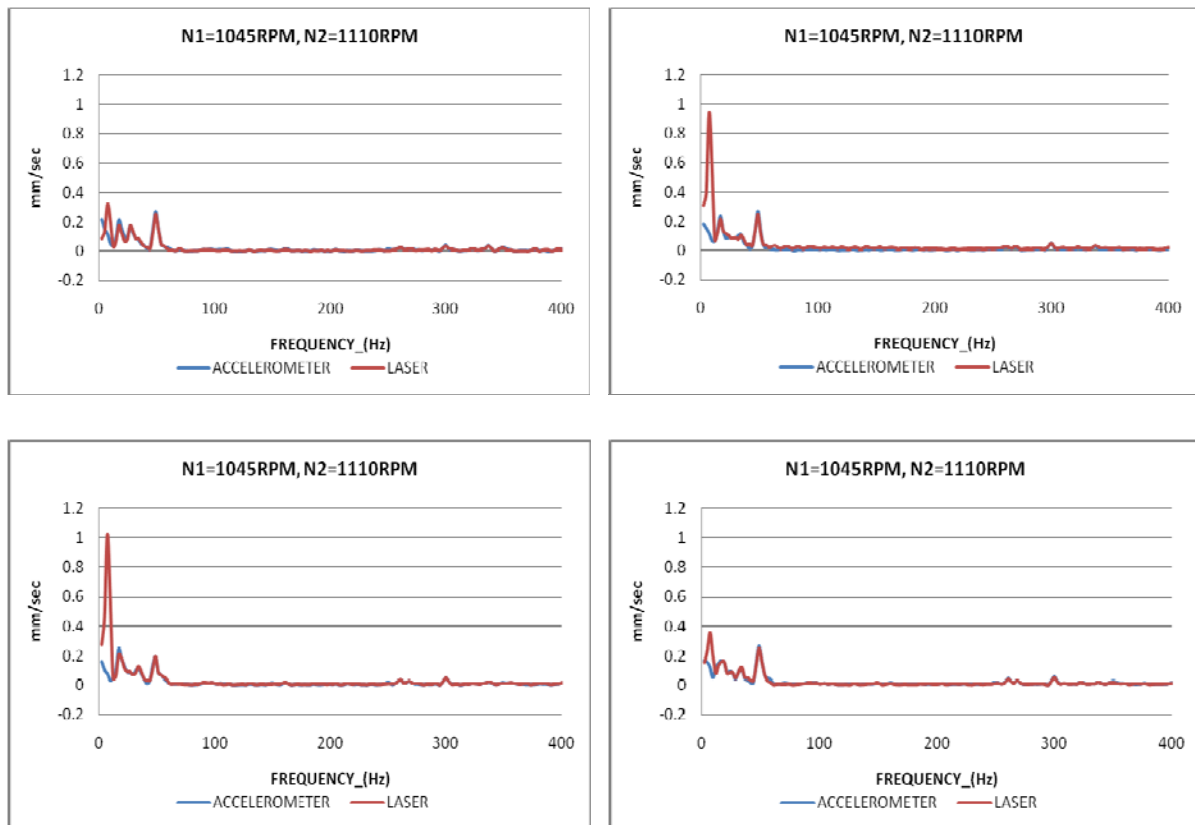
Η απόσταση αυτή εκφράζει το ύψος από το οποίο πρέπει να ξεκινά η δέσμη του λέιζερ σε σχέση με το ύψος του καθρέπτη. Εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας ως επίπεδο αναφοράς το πάτωμα η απόσταση αυτή είναι ίση με $l=2300-1410=890\text{mm}$.



Σχήμα 4.17: Διαδρομή της δέσμης του Laser.

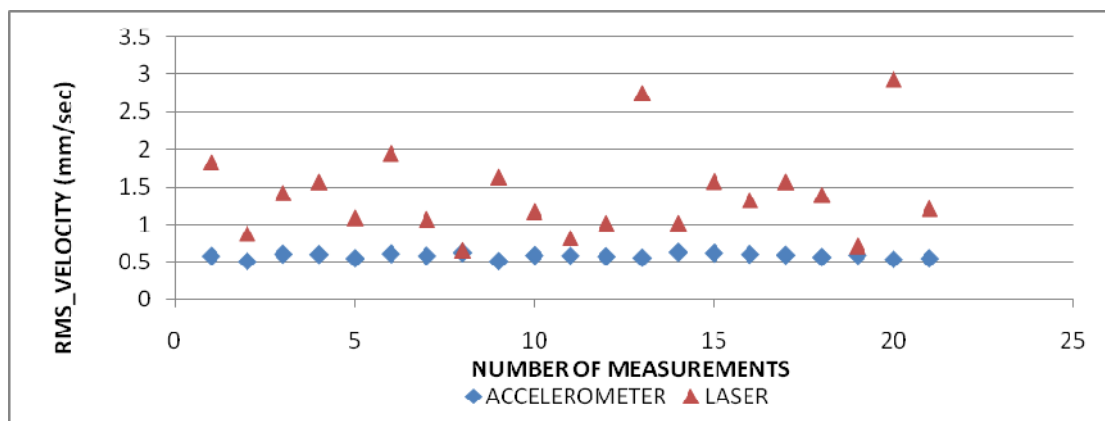
Πραγματοποιήσαμε διαδοχικές μετρήσεις ανά 10sec συγχρόνως και με τις δύο μεθόδους για μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας που αντιστοιχεί στο ζεύγος στροφών ($N1=1045\text{RPM}$, $N2=1110\text{RPM}$). Στα σχήματα 4.18 έως 4.20 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων. Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού συγχρόνως και με τις δύο μεθόδους. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι αντίστοιχα με εκείνα του σχήματος 4.13.



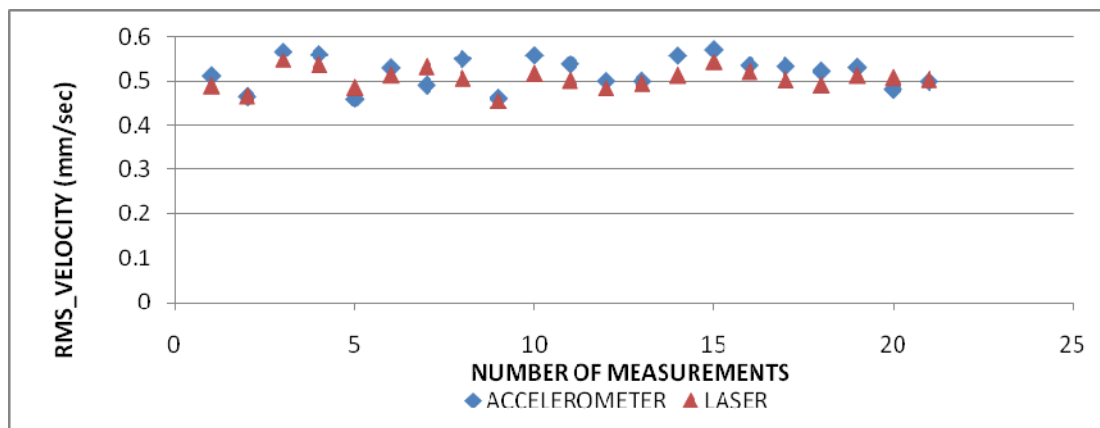


Σχήμα 4.18: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού.

Στο σχήμα 4.19 παρουσιάζονται οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού και τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι αντίστοιχα με εκείνα του σχήματος 4.14. Για τον ίδιο λόγο παραθέτουμε και το σχήμα 4.20, το οποίο προκύπτει και σε αυτήν την περίπτωση έπειτα από την αποκοπή των συχνοτήτων που είναι μικρότερες των 12 Hz και στο οποίο παρατηρείται η βελτίωση της διακύμανσης των μέσων ενεργών τιμών της ταχύτητας του κραδασμού.



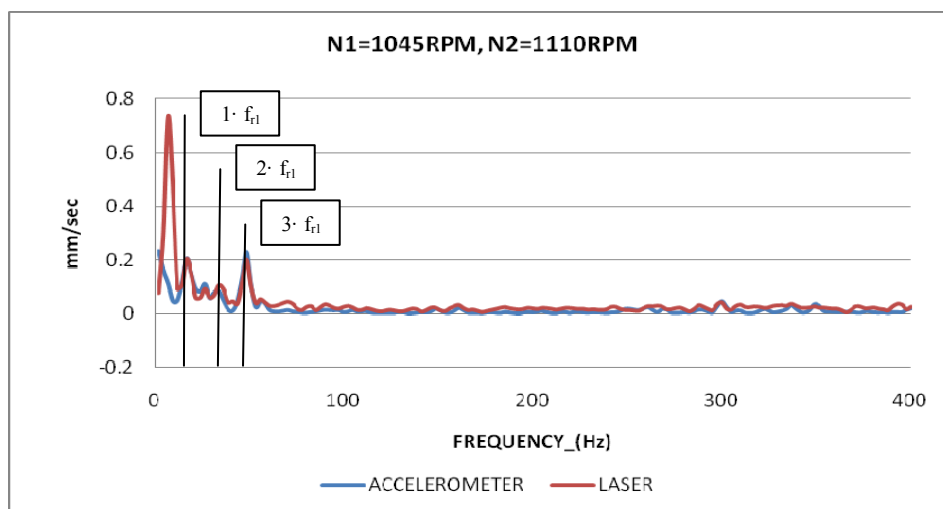
Σχήμα 4.19: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας για ολόκληρο το εύρος των συχνοτήτων.



Σχήμα 4.20: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας για συχνότητες μεγαλύτερες των 12Hz.

Οι συχνότητες περιστροφής των ατράκτων f_{r1} και f_{r2} είναι και σε αυτήν την περίπτωση ίσες με $f_{r1} = \frac{1045}{60} = 17,416$ Hz και $f_{r2} = \frac{1110}{60} = 18,5$ Hz.

Παραθέτουμε λοιπόν το φάσμα του σχήματος 4.21, με σημειωμένες τις συνιστώσες που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές για την κατάσταση λειτουργίας της μηχανής συχνότητες: $1 \cdot f_{r1} \approx 17,08984$ Hz, $2 \cdot f_{r1} \approx 34,17969$ Hz και $3 \cdot f_{r1} \approx 48,82813$ Hz.



Σχήμα 4.21: Συνιστώσες σημαντικού μεγέθους σε χαρακτηριστικές συχνότητες της κατάστασης λειτουργίας της μηχανής.

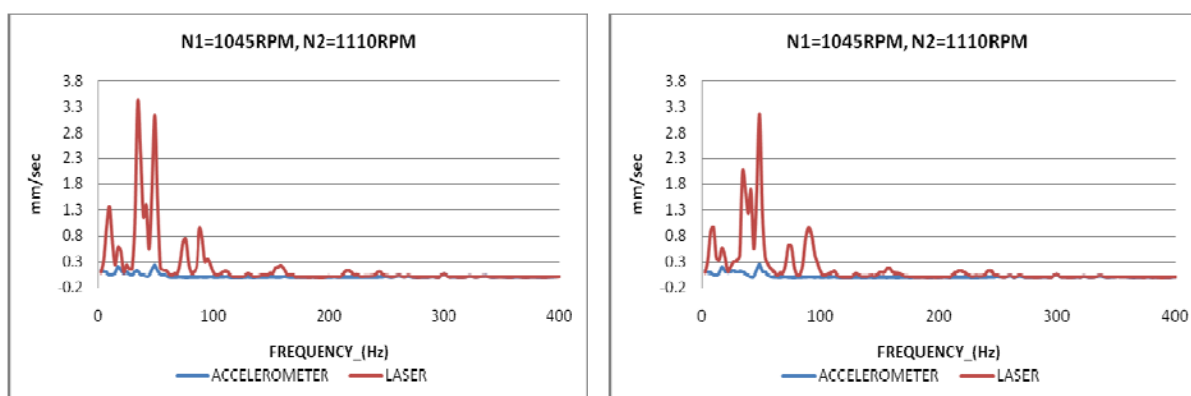
4.1.4 Μετρήσεις στη δωδέκατη ώρα με χρήση ηλεκτρομαγνήτη.

Τοποθετήσαμε το VH-1000-D σε απόσταση 2446mm από τον άξονα της διάταξης αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών και υπό γωνία 10° ως προς το οριζόντιο επίπεδο καθώς το τρίποδο στήριξης δίνει τη δυνατότητα ανάκλισης στη θέση στήριξης

της συσκευής. Στήσαμε τον καθρέπτη του ηλεκτρομαγνήτη υπό γωνία 40° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ώστε η τελική εκτροπή της δέσμης του λέιζερ σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης να είναι ίση με 90° σε σχέση πάντα με το οριζόντιο επίπεδο.

Η δέσμη κατευθύνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσπίπτει αρχικά στο κέντρο του καθρέπτη και στη συνέχεια δίπλα ακριβώς από τη θέση του κατακόρυφου επιταχυνσιόμετρου, όπως είδαμε στο σχήμα 4.6. Για να είναι όμως δυνατή η κατεύθυνση της δέσμης καθ' αυτόν τον τρόπο πρέπει να υπολογίσουμε αρχικά το ύψος από το οποίο θα πρέπει να ξεκινά τη διαδρομή της. Γνωρίζουμε ότι το ύψος του καθρέπτη από το έδαφος είναι ίσο με 1400mm. Για γωνία ανάκλισης ίση με 10° και οριζόντια απόσταση 2446mm προκύπτει από τον ορισμό της εφαπτομένης η αντίστοιχη κατακόρυφη απόσταση, σύμφωνα με την εξίσωση 4.5, ίση με $y=430\text{mm}$. Η απόσταση αυτή εκφράζει το ύψος από το οποίο πρέπει να ξεκινά η δέσμη του λέιζερ σε σχέση με το ύψος του καθρέπτη. Εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας ως επίπεδο αναφοράς το πάτωμα του εργαστηρίου η απόσταση αυτή είναι ίση με $l=1400-890=970\text{mm}$. Η οδήγηση της δέσμης του λέιζερ και ο υπολογισμός των αποστάσεων μεταξύ των συνιστωσών της διάταξης ακολουθήσαν αντίστοιχη λογική με εκείνη του σχήματος 4.17.

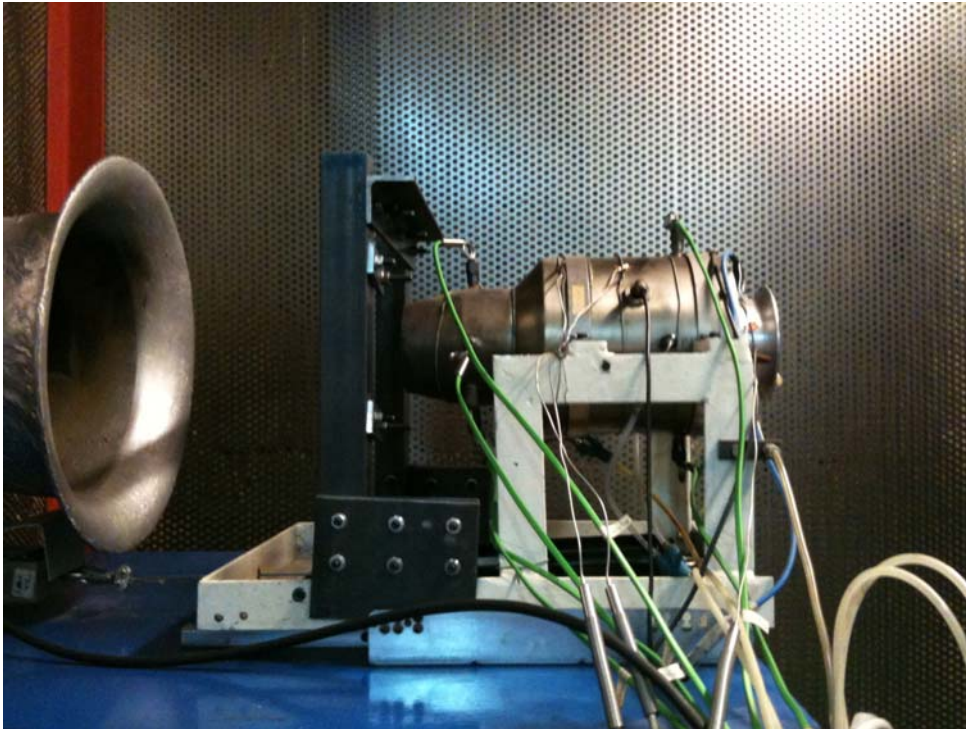
Πραγματοποιήσαμε διαδοχικές μετρήσεις ανά 10sec συγχρόνως και με τις δύο μεθόδους για μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας που αντιστοιχεί στο ζεύγος στροφών ($N1=1045\text{RPM}$, $N2=1110\text{RPM}$). Στο σχήμα 4.22 παρουσιάζονται κάποια από τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού στα οποία παρατηρούμε ότι δεν είναι δυνατή η λήψη μετρήσεων ακριβείας με την προσαρμογή του ηλεκτρομαγνήτη πάνω στη μηχανή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου μετράμε ένα συνδυασμό των κραδασμών της μηχανής και της διάταξης του ηλεκτρομαγνήτη με το στέλεχος του καθρέπτη, καθώς το VH-1000-D αποτελεί έναν σχετικό μορφοτροπέα κραδασμών κι όχι απόλυτο όπως είναι το επιταχυνσιόμετρο.



Σχήμα 4.22: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού.

4.2 Κινητήρας AMT Olympus.

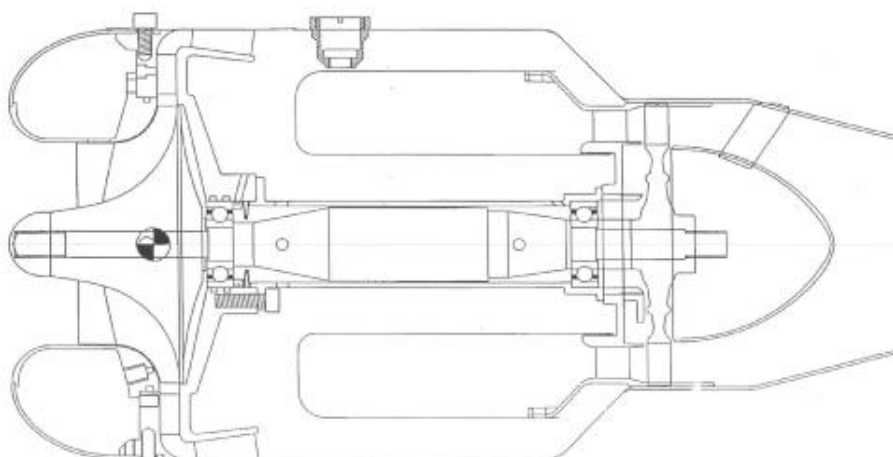
Ο αεροπορικός κινητήρας Olympus κατασκευάζεται στην Ολλανδία από την εταιρία AMT (Advanced Micro Turbines) και αποτελεί μια μικρογραφία πραγματικού αεροπορικού κινητήρα τύπου Turbojet. Ο σκοπός της κατασκευής του είναι η πώληση σε ιδιώτες για την παραγωγή ώσης σε τηλεκατευθυνόμενα μοντέλα αεροσκαφών. Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζεται ο κινητήρας Olympus στο δοκιμαστήριο του εργαστηρίου.



Σχήμα 4.23: Τοποθέτηση του κινητήρα AMT Olympus στο δοκιμαστήριο μικρών στροβιλοκινητήρων του εργαστηρίου.

Ο κινητήρας Olympus αποτελείται από μονοβάθμιο συμπιεστή ακτινικής ροής, δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης και μονοβάθμιο στρόβιλο αξονικής ροής. Η περωτή του συμπιεστή φέρει 6 κύρια πτερύγια και 6 «διαχωριστικά» πτερύγια (splitter vanes) για την καλύτερη οδήγηση της ροής στο ακτινικό τμήμα της, όπου η ακτίνα μεγαλώνει και το πλάτος των καναλιών της ροής αυξάνει. Η περωτή του στροβίλου φέρει 29 πτερύγια συνδεδεμένα στις κεφαλές τους με εξωτερική στεφάνη (shrouded impeller).

Στις εδράσεις της ατράκτου του κινητήρα υπάρχουν δύο μονόσφαιρα έδρανα κύλισης τοποθετημένα το πρώτο λίγο μετά το συμπιεστή και το δεύτερο λίγο πριν το στρόβιλο, όπως φαίνονται στην τομή του κινητήρα στο σχήμα 4.24. Οι μετρήσεις κραδασμών που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του VH-1000-D αφορούν στην τρίτη ώρα της μηχανής και στη θέση του πρώτου εδράνου. Αφορούν επίσης σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητη παράμετρο τη ρύθμιση των στροφών του κινητήρα.



Σχήμα 4.24: Ο αεροπορικός κινητήρας AMT Olympus σε τομή.

Οι δοκιμαστές του κινητήρα παρακολουθούν τη λειτουργία του από την αίθουσα ελέγχου (control room), η οποία για λόγους ασφάλειας και ηχομόνωσης έχει οπτική επαφή με τον κινητήρα μέσω ειδικού παραθύρου, το οποίο φέρει διπλό προστατευτικό τζάμι. Παρατηρήθηκε λοιπόν κατά τη λήψη των μετρήσεων η μερική σκέδαση της δέσμης του λέιζερ προς διάφορες κατευθύνσεις εξαιτίας της διέλευσής της από το διπλό τζάμι του παραθύρου, με συνέπεια την πτώση της ισχύος του σήματος που αναγράφεται στη οθόνη της συσκευής. Ωστόσο στις προδιαγραφές του VH-1000-D προβλέπεται η ικανοποιητική λειτουργία του ακόμη και με χαμηλή στάθμη σήματος. Για να επαληθεύσουμε όμως ότι οι μετρήσεις μας υπό αυτές τις συνθήκες είναι σωστές πραγματοποιήσαμε κάποιες επιπλέον μετρήσεις χωρίς την παρεμβολή του παραθύρου και σε κοντινές στροφές τόσο μεταξύ τους όσο και με προηγούμενες μετρήσεις στις οποίες είχαμε την παρεμβολή του τζαμιού. Καθ' αυτόν τον τρόπο μπορούμε να διαπιστώσουμε την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων μας και την επίδραση της παρεμβολής του τζαμιού.

Για το σύνολο των παραπάνω δοκιμών, δόθηκαν στο πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων του εργαστηρίου οι τιμές της συχνότητας δειγματοληψίας $f_s=45000\text{Hz}$, του συνολικού αριθμού σημείων $n_{pt}=16384$ και του αριθμού των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των φασμάτων $NFFT=8192$. Το πρόγραμμα επιστρέφει τα φάσματα των κραδασμών σε dB, επειδή όμως το VH-1000-D καταγράφει ενδείξεις ταχύτητας, για λόγους καλύτερης εποπτείας των αποτελεσμάτων θα ανάγουμε για κάθε συχνότητα f τα φάσματα από dB σε mm/sec με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.3.

4.2.1 Μετρήσεις στην τρίτη ώρα με παρεμβολή διπλού τζαμιού.

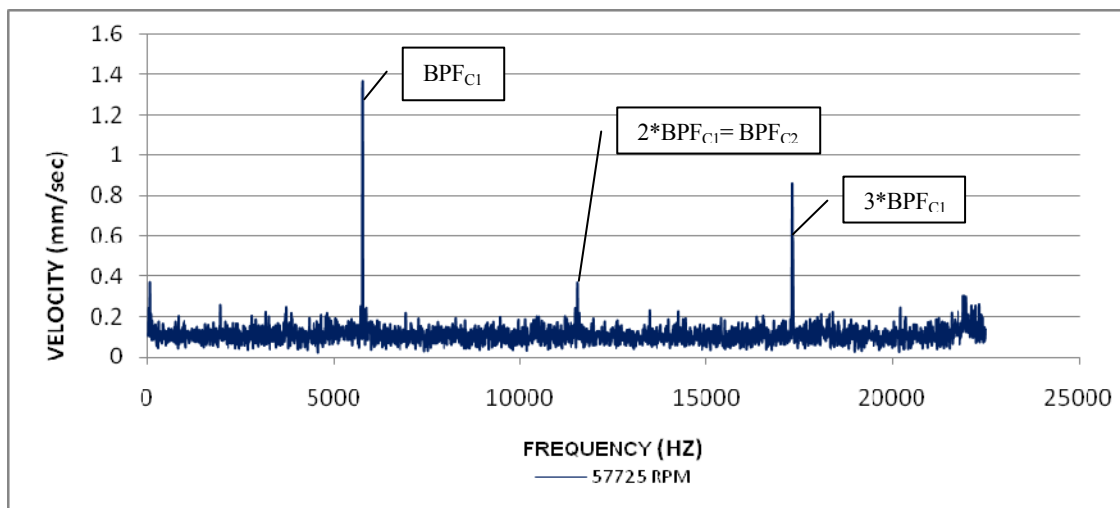
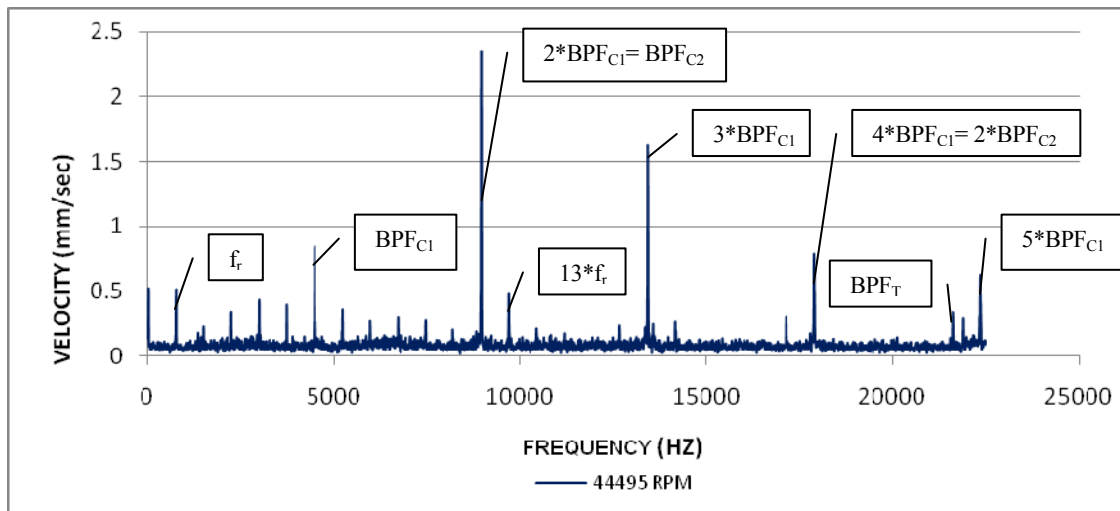
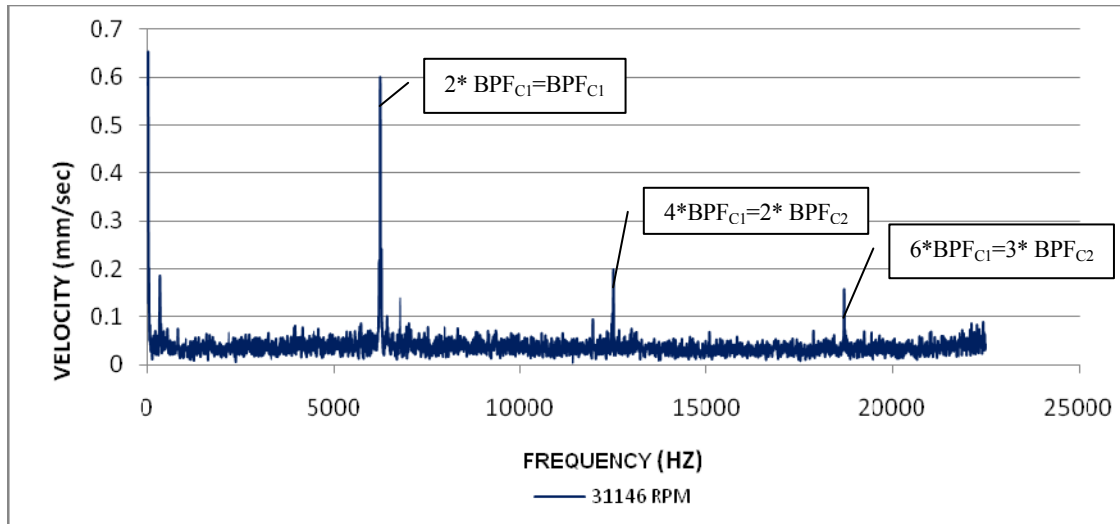
Τοποθετήσαμε το VH-1000-D σε απόσταση 2170mm από τον κινητήρα Olympus και ρυθμίσαμε το τρίποδο στήριξης στο κατάλληλο ύψος, ώστε η δέσμη του λέιζερ να εστιάζει σε ευθεία γραμμή, αφού διέλθει μέσα από το διπλό τζάμι, ακριβώς στην τρίτη ώρα και στη θέση του πρώτου εδράνου. Πραγματοποιήσαμε τις μετρήσεις μας για έντεκα διαφορετικά σημεία λειτουργίας του κινητήρα. Η απόσταση των 2170mm που επιλέχθηκε αποτελεί μια από τις βέλτιστες, όπως αυτές προτείνονται από τον κατασκευαστή.

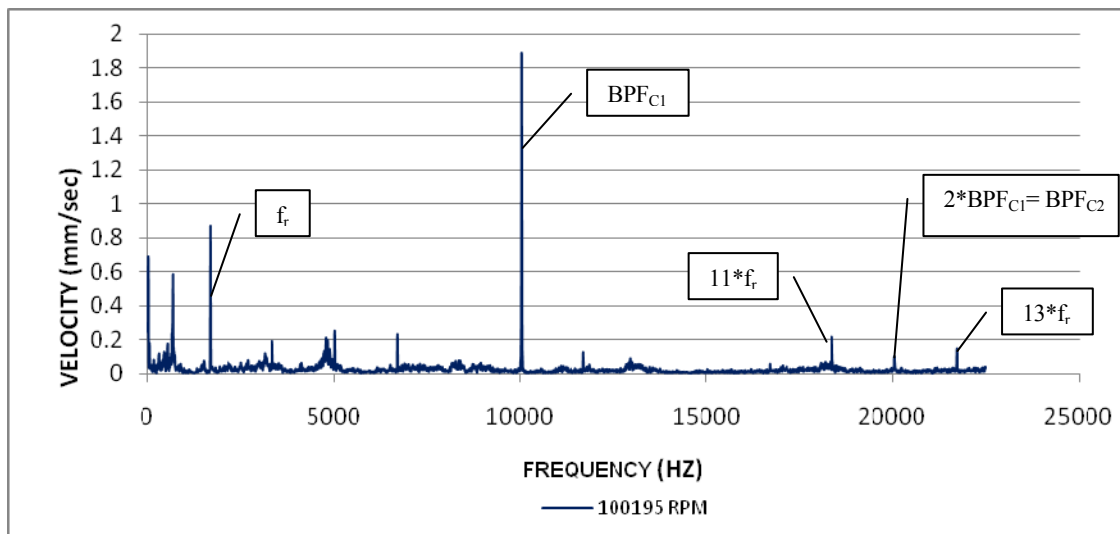
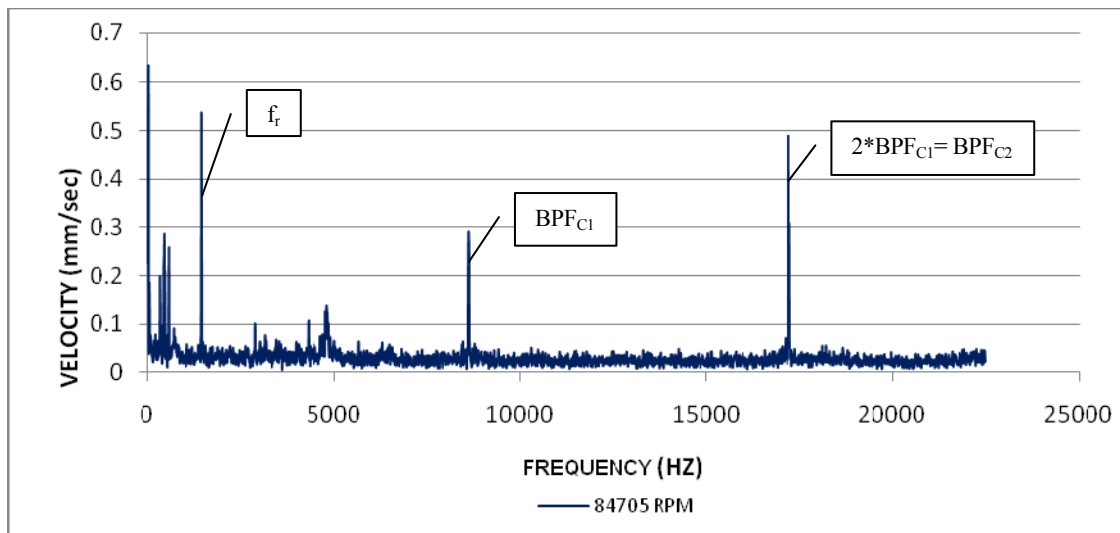
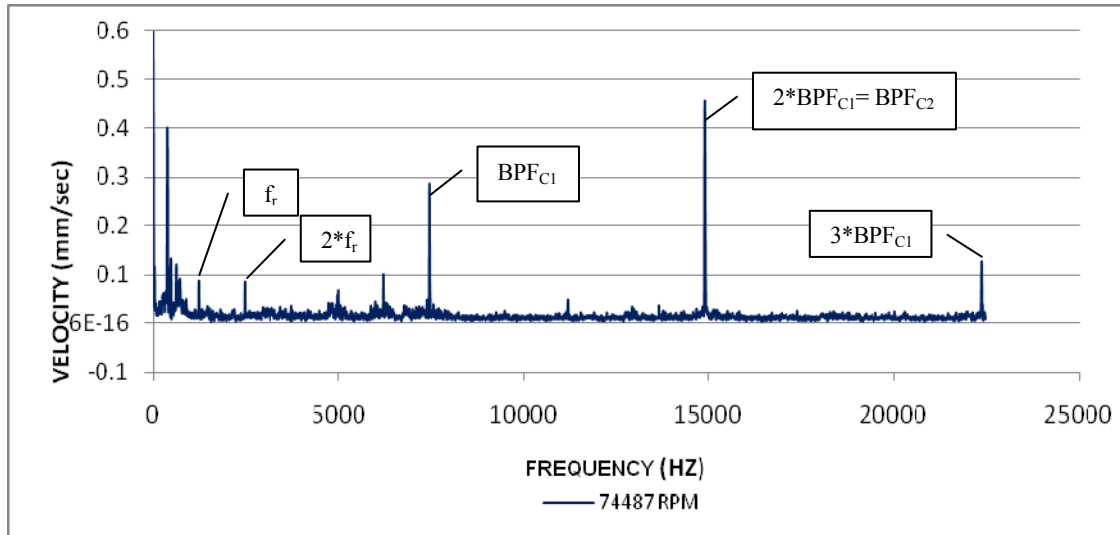
Στο σχήμα 4.25 παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που επέστρεψε το πρόγραμμα για ένα ορισμένο αριθμό σημείων λειτουργίας. Η επισκόπηση των φασμάτων ισχύος μας δείχνει αμέσως τις συχνότητες που εμπεριέχουν διαγνωστική πληροφορία και στις οποίες έχουμε συνιστώσες σημαντικού μεγέθους. Οι συχνότητες αυτές αντιστοιχούν συνήθως είτε σε ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας περιστροφής της ατράκτου f_r , η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 4.4, είτε σε συχνότητες περάσματος πτερυγίων (BPF), δηλαδή σε ακέραια πολλαπλάσια του αριθμού των πτερυγίων των πτερωτών του συμπιεστή ή του στροβίλου (όπου $n_{zC1}=6$ για τα κύρια ή τα διαχωριστικά πτερύγια και $n_{zC2}=12$ για το σύνολο των πτερυγίων του συμπιεστή και $n_{zT}=29$ για τα πτερύγια του στροβίλου) επί τη συχνότητα περιστροφής της ατράκτου.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται για τα έντεκα σημεία λειτουργίας του κινητήρα οι στροφές και η συχνότητα περιστροφής της ατράκτου, N και f_r αντίστοιχα, όπως και οι συχνότητες περάσματος πτερυγίων BPF_{C1} , BPF_{C2} και BPF_T .

N (RPM)	f_r (Hz)	BPF_{C1} (Hz)	BPF_{C2} (Hz)	BPF_T (Hz)
31146	519,1040	3114,6240	6229,2480	15054,0160
34717	578,6133	3471,6798	6943,3596	16779,7857
44495	741,5771	4449,4626	8898,9252	21505,7359
53064	884,3994	5306,3964	10612,7928	25647,5826
57725	962,0886	5772,5316	11545,0632	27900,5694
73169	1219,482	7316,892	14633,784	35364,978
73498	1224,976	7349,856	1499,7120	35524,304
74487	1241,455	7448,730	14897,460	36002,195
84705	1411,743	8470,458	16940,916	40940,547
86023	1433,716	8602,296	17204,592	41577,764
100195	100195,2	60117,2	1202342,4	2905660,8

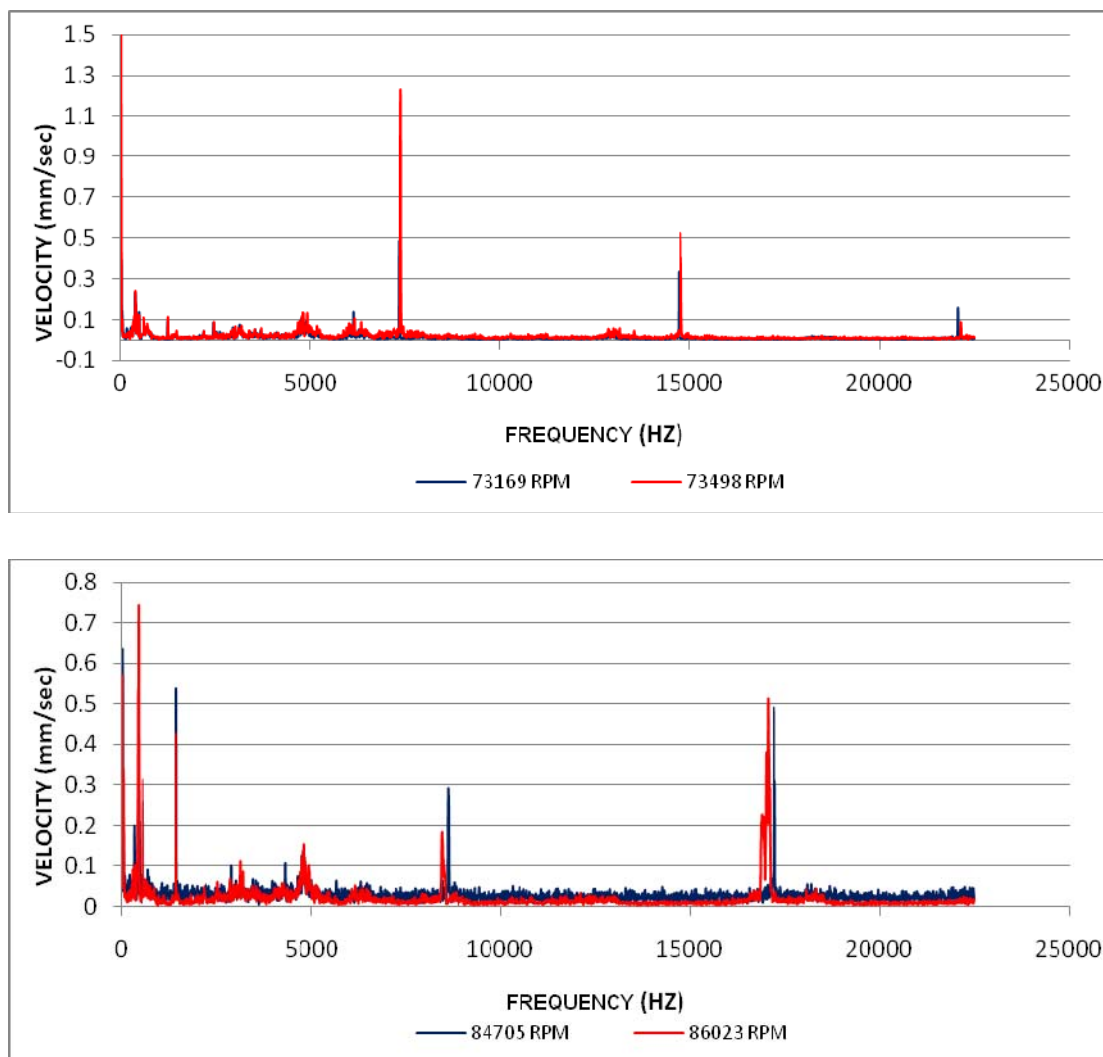
Πίνακας 4.3: Σημεία λειτουργίας του κινητήρα.





Σχήμα 4.25: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού και συνιστώσες σημαντικό μέγεθος σε χαρακτηριστικές συχνότητες της κατάστασης λειτουργίας της μηχανής.

Παραθέτουμε στη συνέχεια το σχήμα 4.26, στο οποίο παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού που αφορούν σε κοντινά σημεία λειτουργίας της μηχανής. Το γεγονός ότι στο κάθε διάγραμμα το δεύτερο εικονιζόμενο φάσμα είναι ελαφρώς μετατοπισμένο σε σχέση με το πρώτο οφείλεται στο ότι δεν έχουμε ακριβώς τις ίδιες στροφές λειτουργίας. Παρατηρούμε όμως στα προς σύγκριση φάσματα ισχύος ότι σημειώνονται οι ίδιες χαρακτηριστικές συχνότητες και συνεπώς υπάρχει πράγματι επαναληψιμότητα στις μετρήσεις που λαμβάνουμε.



Σχήμα 4.26: Σύγκριση φασμάτων ισχύος ταχύτητας κραδασμού για κοντινές καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής.

4.2.2 Μετρήσεις στην τρίτη ώρα χωρίς παρεμβολή διπλού τζαμιού.

Τοποθετήσαμε το VH-1000-D σε απόσταση 2170mm από τον κινητήρα Olympus και ρυθμίσαμε το τρίποδο στήριξης στο κατάλληλο ύψος, ώστε η δέσμη του λέιζερ να εστιάζει σε ευθεία γραμμή ακριβώς στην τρίτη ώρα και στη θέση του πρώτου εδράνου χωρίς την παρεμβολή του διπλού τζαμιού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.27.

Πραγματοποιήσαμε τις μετρήσεις μας για τέσσερα διαφορετικά σημεία λειτουργίας του κινητήρα. Η απόσταση των 2170mm που επιλέχθηκε αποτελεί μια από τις βέλτιστες, όπως αυτές προτείνονται από τον κατασκευαστή.



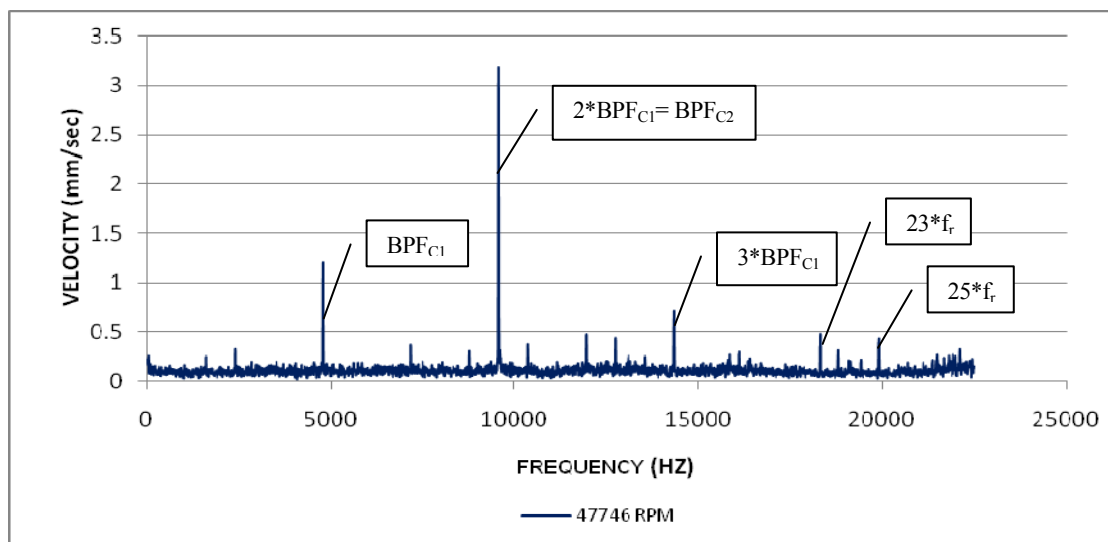
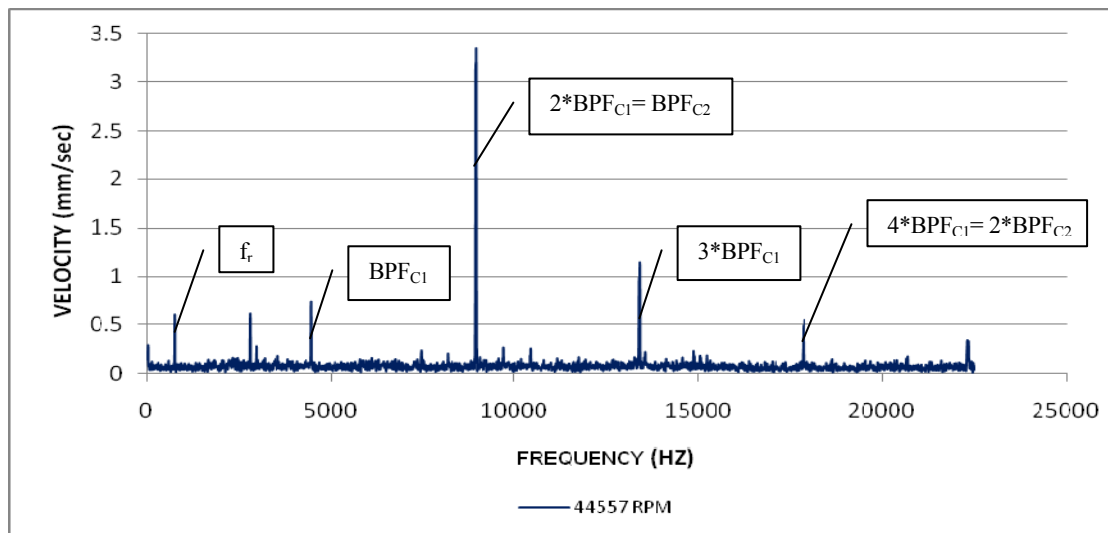
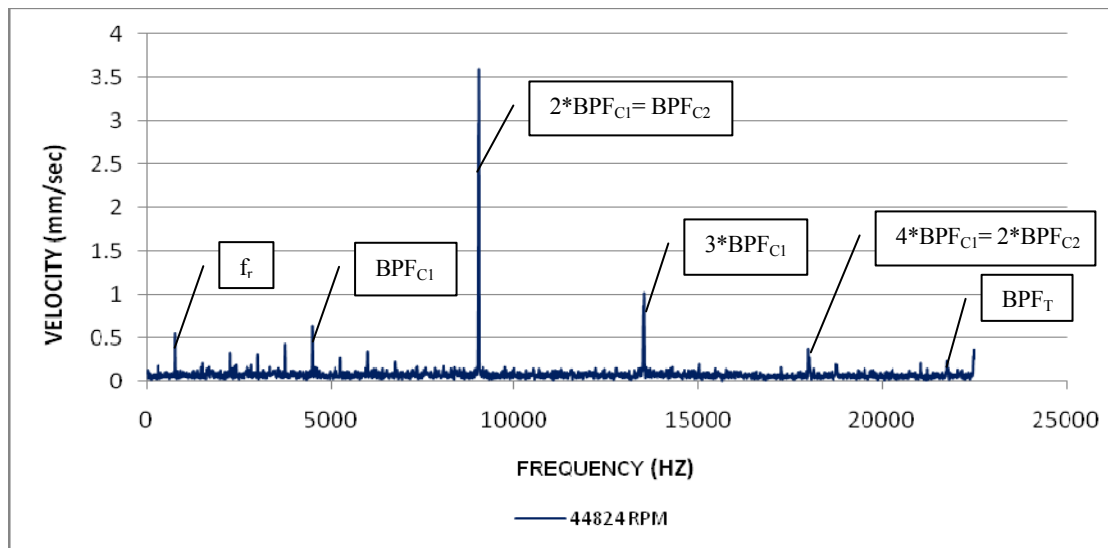
Σχήμα 4.27: Εστίαση της δέσμης του λέιζερ στη θέση του πρώτου εδράνου της μηχανής χωρίς την παρεμβολή του διπλού τζαμιού.

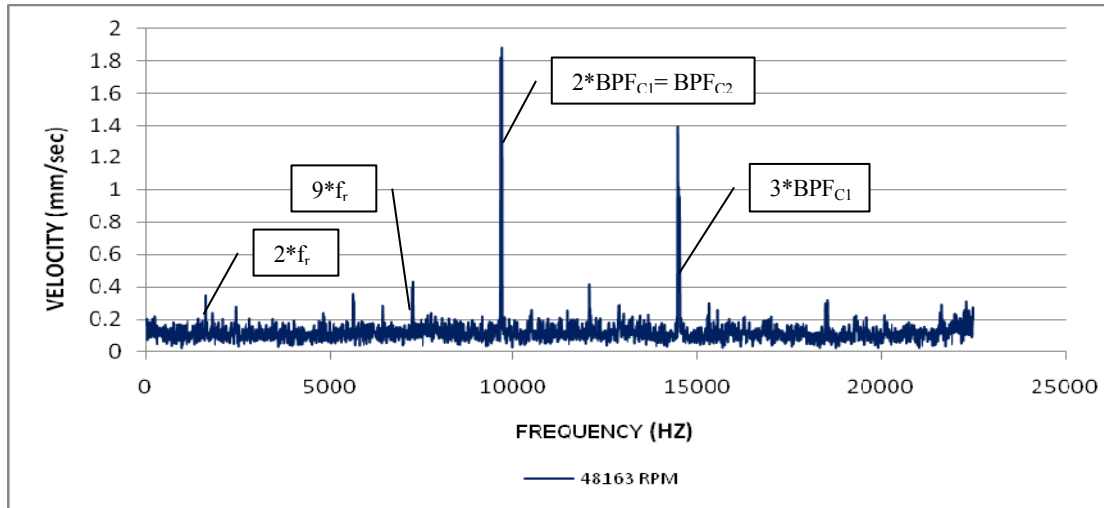
Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται για τα τέσσερα σημεία λειτουργίας του κινητήρα οι στροφές και η συχνότητα περιστροφής της ατράκτου, N και f_r αντίστοιχα, όπως και οι συχνότητες περάσματος πτερυγίων BPF_{C1} , BPF_{C2} και BPF_T .

N (RPM)	f_r (Hz)	BPF_{C1} (Hz)	BPF_{C2} (Hz)	BPF_T (Hz)
44557	742,6271	4455,7626	8911,5252	21536,1859
44824	747,0703	4482,4218	8964,8436	21665,0387
47746	795,7739	4774,6434	9549,2868	23077,4431
48163	802,7175	4816,3050	9632,6100	23278,8075

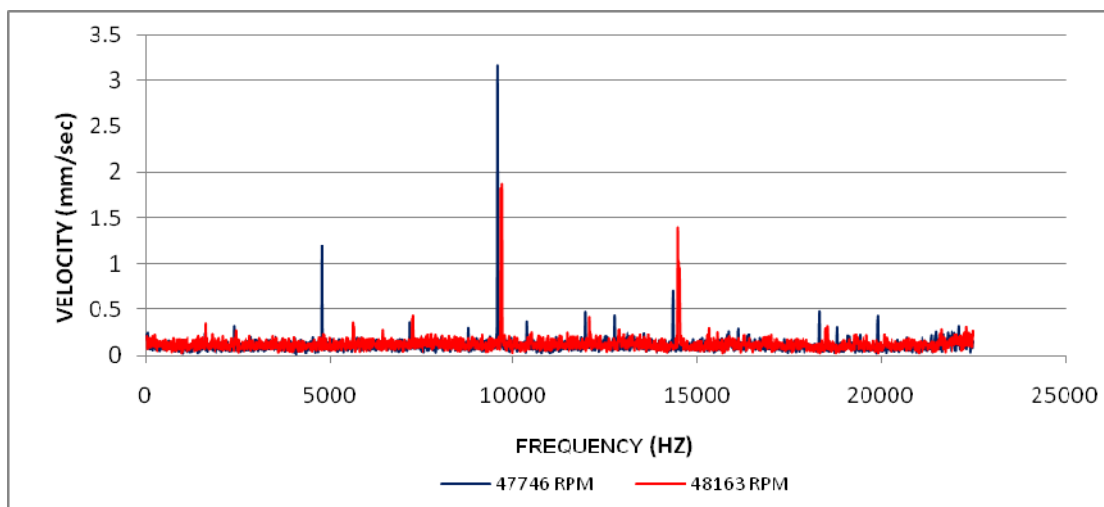
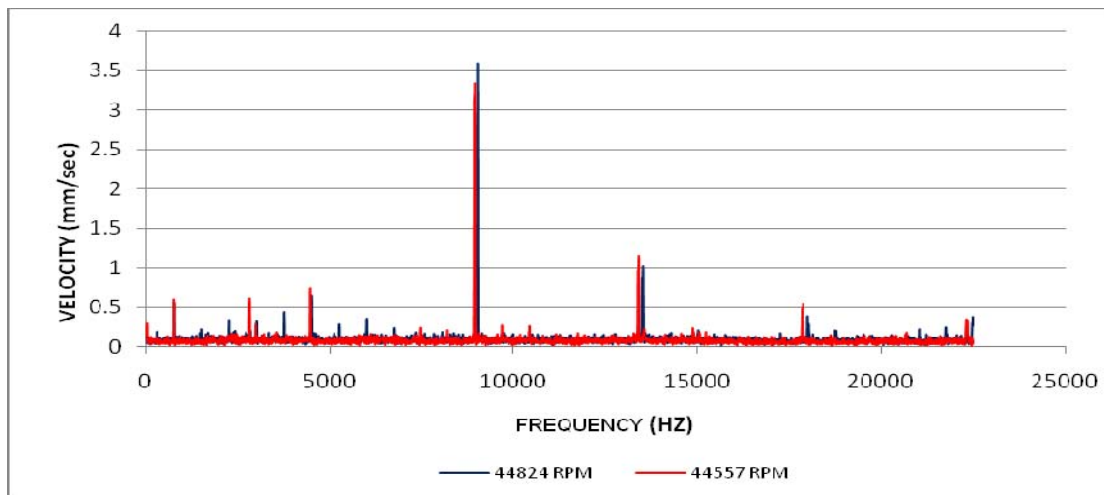
Πίνακας 4.4: Σημεία λειτουργίας του κινητήρα.

Στο σχήμα 4.28 παρουσιάζονται τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού για τα παραπάνω σημεία λειτουργίας. Η επισκόπηση τους μας δείχνει αμέσως τις συχνότητες που εμπεριέχουν διαγνωστική πληροφορία και στις οποίες έχουμε συνιστώσες σημαντικού μεγέθους. Οι συχνότητες αυτές αντιστοιχούν συνήθως είτε σε ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας περιστροφής της ατράκτου, είτε σε συχνότητες περάσματος πτερυγίων (BPF). Παραθέτουμε στη συνέχεια το σχήμα 4.29, στο οποίο παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα τα φάσματα ισχύος της ταχύτητας του κραδασμού που αφορούν σε κοντινά σημεία λειτουργίας της μηχανής και τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι αντίστοιχα με εκείνα του σχήματος 4.26.





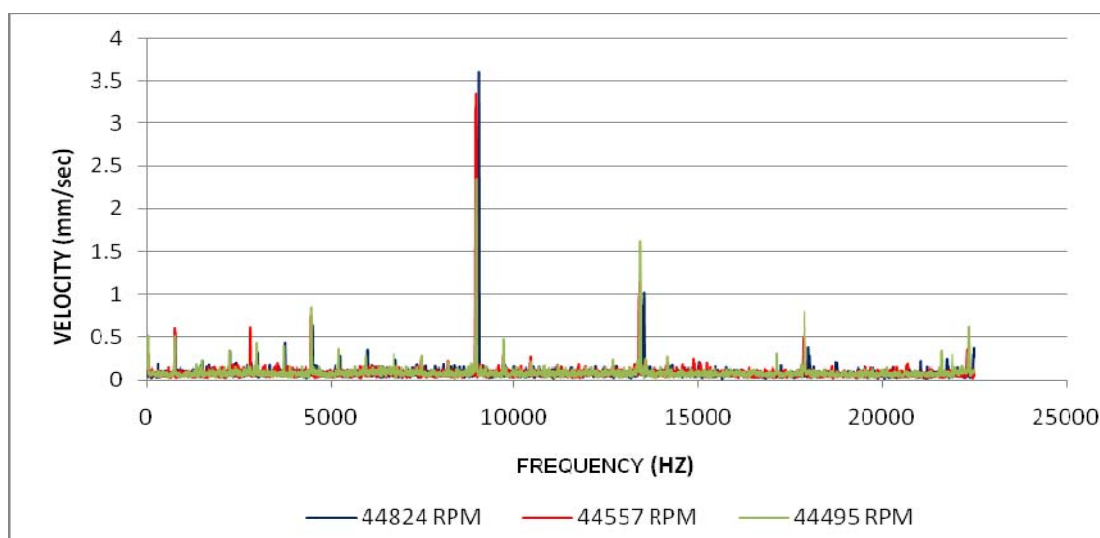
Σχήμα 4.28: Φάσματα ισχύος ταχύτητας κραδασμού και συνιστώσες σημαντικό μεγέθους σε χαρακτηριστικές συχνότητες της κατάστασης λειτουργίας της μηχανής.



Σχήμα 4.29: Σύγκριση φασμάτων ισχύος για κοντινές καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής.

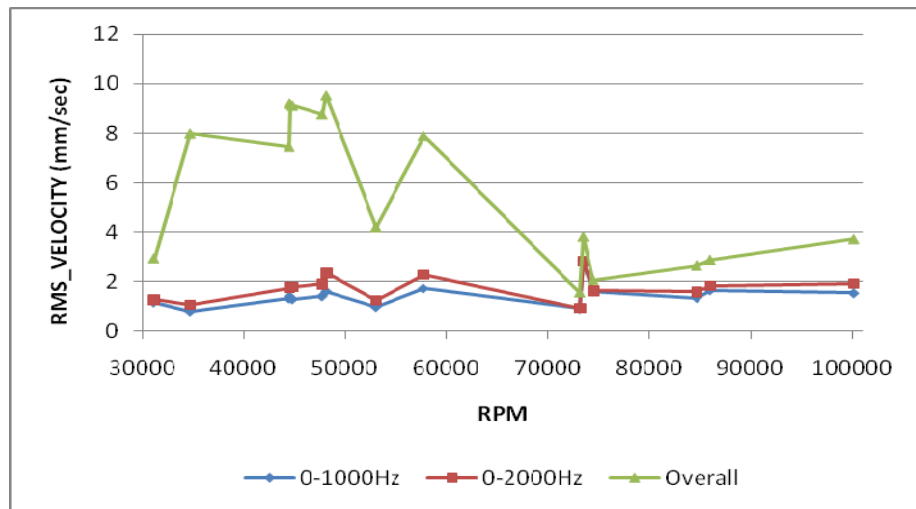
4.2.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

Στη συγκεκριμένη ενότητα παραθέτουμε αρχικά το σχήμα 4.30, το οποίο περιλαμβάνει τα φάσματα ισχύος τριών εκ των δεκαπέντε παραπάνω σημείων λειτουργίας του κινητήρα, τα οποία αφορούν σε παραπλήσιες στροφές λειτουργίας. Η μέτρηση των κραδασμών για τα δύο από τα τρία σημεία λειτουργίας πραγματοποιήθηκε με παρεμβολή του διπλού τζαμιού, ενώ για το τρίτο σημείο χωρίς αυτό. Παρατηρούμε και σε αυτό το διάγραμμα ότι στα προς σύγκριση φάσματα ισχύος, οι συνιστώσες σημαντικού μεγέθους σημειώνονται στις ίδιες χαρακτηριστικές συχνότητες και το συνολικό επίπεδο των κραδασμών είναι παραπλήσιο, οπότε υπάρχει επαναληψιμότητα στις μετρήσεις που λαμβάνουμε. Συνεπώς η μερική σκέδαση της δέσμης του λέιζερ και κατ' επέκταση η μείωση της ισχύος του σήματος δεν επηρεάζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας, καθώς το VH-1000-D είναι σε θέση να πραγματοποιεί μετρήσεις ακριβείας και με χαμηλή στάθμη σήματος.



Σχήμα 4.30: Σύγκριση φασμάτων ισχύος για κοντινές καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής με και χωρίς την παρεμβολή του διπλού τζαμιού.

Παραθέτουμε στη συνέχεια το σχήμα 4.31 στο οποίο παρουσιάζονται οι μέσες ενεργές τιμές της ταχύτητας του κραδασμού για όλα τα σημεία λειτουργίας της μηχανής τα οποία θεωρήσαμε πλέον ως ενιαίο σύνολο. Παρατηρούμε ότι η ενεργειακή συνεισφορά των χαμηλών συχνοτήτων (0-1000Hz και 0-2000Hz) είναι γενικά μικρή για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες συχνότητες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα έντονες κυρίως κατά την εκκίνηση της μηχανής όπου έχουμε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο κραδασμών. Στη συνέχεια όμως κατά την κανονική λειτουργία της παρατηρούμε την πτώση του επιπέδου των κραδασμών και την εξομάλυνση της λειτουργίας της μηχανής.

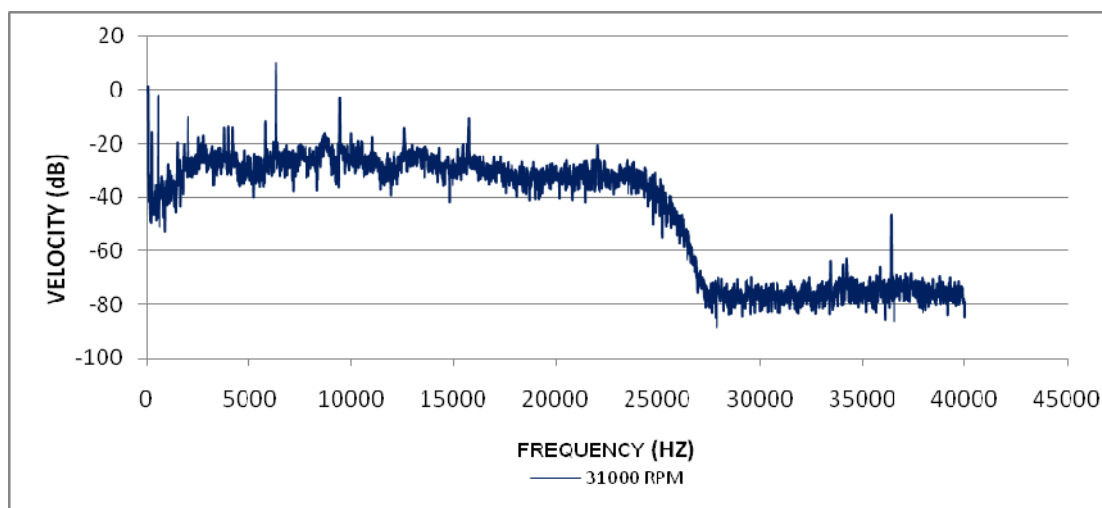


Σχήμα 4.31: Μέσες ενεργές τιμές ταχύτητας κραδασμού για όλα τα σημεία λειτουργίας της μηχανής.

4.3 Περιορισμοί από τη χρήση των φίλτρων συχνοτήτων.

Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο το VH-1000-D διαθέτει ένα ψηφιακό φίλτρο αποκοπής υψηλών συχνοτήτων με τρία διαθέσιμα όρια συχνοτήτων των 1kHz, 5kHz και 22kHz, που ορίζουν το άνω όριο συχνοτήτων για μετρήσεις συγκεκριμένου εύρους. Το γεγονός όμως ότι δε μπορούμε να επιλέξουμε την απενεργοποίηση του συγκεκριμένου φίλτρου εισάγει ένα σοβαρό περιορισμό. Κατά τη λειτουργία της μηχανής σε υψηλές κυρίως στροφές δεν εμφανίζονται στο φάσμα σημαντικές συχνότητες όπως είναι στην περίπτωσή μας η BPF_T , καθώς υπερβαίνουν το όριο αποκοπής των 22kHz και συνεπώς χάνεται πολύτιμη για τον κινητήρα διαγνωστική πληροφορία. Κατ' επέκταση η χρήση του VH-1000-D συνίσταται σε εκείνες τις περιπτώσεις που οι χαρακτηριστικές συχνότητες της μηχανής βρίσκονται για το σύνολο των σημείων λειτουργίας της σε εύρος συχνοτήτων έως 22kHz.

Παραθέτουμε επιπλέον το σχήμα 4.32, στο οποίο φαίνεται η απότομη μείωση συχνότητας που συντελείται εξαιτίας την ύπαρξης του συγκεκριμένου φίλτρου, έχοντας επιλέξει ως όριο αποκοπής τα 22 kHz.



Σχήμα 4.32: Επίδραση του φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στο φάσμα ισχύος.

4.4 Συμπεράσματα.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εφαρμογής του VH-1000-D για τη μέτρηση των κραδασμών τόσο στη διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων περωτών, όσο και στον κινητήρα AMT Olympus στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π.

4.4.1 Διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων περωτών.

Κατά τη μέτρηση των κραδασμών της διάταξης δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων περωτών χρησιμοποιήθηκαν παράλληλα με το σύστημα λέιζερ και συμβατικά επιταχυνσιόμετρα στις ίδιες θέσεις της μηχανής. Διαπιστώθηκε σε πρώτο στάδιο η ακριβής λειτουργία του VH-1000-D κατά τη μέτρηση του οριζόντιου κραδασμού στην ένατη ώρα της μηχανής, καθώς τα λαμβανόμενα αποτελέσματα συγκλίνουν με τα αντίστοιχα που επιστρέφει το επιταχυνσιόμετρο.

Οι μετρήσεις όμως που αφορούν στη δωδέκατη ώρα της μηχανής και για τη λήψη των οποίων η δέσμη του λέιζερ κατευθύνθηκε προς τη μηχανή με τη βοήθεια καθρεπτών, παρουσιάζουν ασταθή αναλογία σήματος προς θόρυβο με αποτέλεσμα πολλές από αυτές να μην αποδίδουν ικανοποιητική απεικόνιση του επιπέδου των κραδασμών για συχνότητες μικρότερες των 12Hz. Στο εύρος συχνοτήτων των 0-12Hz παρατηρήθηκε στις περισσότερες μετρήσεις μια σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο μεθόδων με την εμφάνιση συνιστωσών σημαντικού μεγέθους να καταγράφονται από το σύστημα λέιζερ κι όχι από το επιταχυνσιόμετρο. Οι συνιστώσες αυτές εμφανίζονται στις μετρήσεις εκείνες που κατά τη λήψη τους η αναλογία σήματος προς θόρυβο ήταν υποτυπώδης.

Κατ' επέκταση, πριν από την έναρξη των δοκιμών αποτελεί βασική προϋπόθεση η ρύθμιση του VH-1000-D ώστε να επιτευχθεί το ισχυρότερο δυνατό σήμα. Βέβαια κατά τη διέλευση της δέσμης του λέιζερ από τους καθρέπτες είναι δυνατό κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής να παρατηρηθεί αυξομείωση της ισχύος του σήματος παρά την αρχική ικανοποιητική ρύθμιση της εστίασης, οπότε και σε αυτήν την περίπτωση δεν προκύπτουν αξιόπιστες μετρήσεις. Ως πιθανή αιτία αυτής της αστάθειας του σήματος μπορεί να θεωρηθεί η χρήση καθρεπτών που δεν πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Δεν ήταν επίσης δυνατή η λήψη μετρήσεων ακριβείας με την προσαρμογή ηλεκτρομαγνήτη πάνω στη μηχανή, ο οποίος φέρει στέλεχος με καθρέπτη για την εκτροπή της δέσμης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου μετράμε ένα συνδυασμό των κραδασμών της μηχανής και της διάταξης του ηλεκτρομαγνήτη, καθώς το VH-1000-D αποτελεί έναν σχετικό μορφοτροπέα κραδασμών κι όχι απόλυτο όπως είναι το επιταχυνσιόμετρο.

Στις μετρήσεις που είχαμε ακριβή αποτελέσματα, η επισκόπηση των αντίστοιχων φασμάτων ισχύος έδειξε αμέσως τις συχνότητες που εμπεριέχουν διαγνωστική πληροφορία και στις οποίες καταγράφονται συνιστώσες σημαντικού μεγέθους. Οι συχνότητες αυτές αντιστοιχούν συνήθως είτε σε ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας περιστροφής της ατράκτου, είτε σε συχνότητες περάσματος πτερυγίων.

4.4.2 Κινητήρας AMT Olympus.

Κατά τη μέτρηση των κραδασμών στην τρίτη ώρα του κινητήρα AMT Olympus χρησιμοποιήθηκε μόνο το σύστημα λέιζερ, καθώς η λειτουργία του κρίθηκε αξιόπιστη από τις δοκιμές στη διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών σε μετρήσεις που αφορούν στον οριζόντιο κραδασμό.

Το δοκιμαστήριο του μικρού στροβιλοαντιδραστήρα απομονώνει την αίθουσα ελέγχου από τον κινητήρα επιτρέποντας την οπτική επαφή με αυτόν μέσω ενός ειδικού παραθύρου που φέρει διπλό προστατευτικό τζάμι. Μετρήσεις κραδασμών πραγματοποιήθηκαν τόσο με την παρεμβολή του διπλού τζαμιού και όσο και χωρίς αυτή. Ωστόσο, κατά τη διέλευση της δέσμης του λέιζερ από το τζάμι παρατηρήθηκε μερική σκέδαση αυτής και πτώση της ισχύος του σήματος.

Στα φάσματα ισχύος που αφορούν είτε στην κάθε μέθοδο χωριστά, είτε στη μεταξύ τους σύγκριση καταγράφονται για παραπλήσια σημεία λειτουργίας οι ίδιες χαρακτηριστικές συχνότητες οπότε υπάρχει πράγματι επαναληψιμότητα στις μετρήσεις που λαμβάνουμε. Συνεπώς η μερική σκέδαση της δέσμης του λέιζερ και κατ' επέκταση η μείωση της ισχύος του σήματος δεν επηρεάζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας, καθώς το VH-1000-D είναι σε θέση να πραγματοποιεί μετρήσεις ακριβείας και με χαμηλή στάθμη σήματος.

Ένα ακόμη συμπέρασμα που προκύπτει από την επισκόπηση των μέσων ενεργών τιμών της ταχύτητας του κραδασμού για τα διάφορα σημεία λειτουργίας του κινητήρα, αφορά στην ενεργειακή συνεισφορά των χαμηλών συχνοτήτων (0-1000Hz και 0-2000Hz), η οποία είναι γενικά μικρή για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες συχνότητες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα έντονες κυρίως κατά την εκκίνηση της μηχανής όπου έχουμε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο κραδασμών. Στη συνέχεια όμως κατά την κανονική λειτουργία της παρατηρούμε την πτώση του επιπέδου των κραδασμών και την εξομάλυνση της λειτουργίας της.

Μια παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την επιλογή της συγκεκριμένης συσκευής ως μεθόδου μέτρησης των κραδασμών μιας μηχανής είναι η ρύθμιση του ψηφιακού φίλτρου αποκοπής υψηλών συχνοτήτων. Το ανώτερο διαθέσιμο όριο συχνοτήτων είναι αυτό των 22kHz, που σε συνδυασμό με την αδυναμία απενεργοποίησης του συγκεκριμένου φίλτρου εισάγει τον περιορισμό της συνιστώμενης χρήσης του VH-1000-D μόνο στις περιπτώσεις εκείνες που οι χαρακτηριστικές συχνότητες της μηχανής βρίσκονται για το σύνολο των σημείων λειτουργίας της σε εύρος συχνοτήτων έως 22kHz.

5

Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα-Προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζεται η δομή της εργασίας, η πορεία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του συστήματος λέιζερ. Από τα αποτελέσματα αυτά εντοπίζονται εκείνα τα σημεία στα οποία πρέπει να δίδεται προσοχή κατά τη χρήση του στις διάφορες δοκιμές.

5.1 Ανακεφαλαίωση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη μέτρηση των κραδασμών σε στροβιλομηχανές με χρήση συστήματος λέιζερ και πιο συγκεκριμένα με χρήση της συσκευής Industrial Laser Doppler Vibrometer Type 8338 (ή VH-1000-D). Αναζητήθηκαν αρχικά στη διεθνή βιβλιογραφία πληροφορίες σχετικές με τη χρήση ανάλογων συστημάτων όπως και τα στοιχεία που προέκυψαν από την εφαρμογή τους στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια πρώτη γνωριμία με το σύστημα λέιζερ όπου και παρουσιάστηκαν τα εργονομικά χαρακτηριστικά του, η αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζεται η λήψη των μετρήσεων καθώς και κάποια βασικά στοιχεία της θεωρίας των ταλαντώσεων. Δόθηκαν επίσης οδηγίες για την επιλογή των κατάλληλων για την κάθε περίπτωση παραμέτρων και για την προετοιμασία και τη συνδεσμολογία της συσκευής, ώστε να είναι έτοιμη προς χρήση.

Ακολούθησε στο τρίτο κεφάλαιο η διαδικασία της πιστοποίησης του VH-1000-D, κατά την οποία πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών ώστε να επαληθευτεί η ακριβής λειτουργία του οργάνου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μέτρησης. Ως μέτρο σύγκρισης για τον έλεγχο της ακρίβειας λήφθηκε ο βαθμονομητής επιταχυνσιόμετρων Calibration Exciter Type 4294.

Οι πρώτες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν στη μελέτη της συμπεριφοράς του VH-1000-D στις περιπτώσεις που η δέσμη του λέιζερ προσπίπτει στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες. Προσαρμόσαμε επίσης πάνω στο διεγέρτη επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας ώστε να μελετηθεί επίσης η απόκριση του συστήματος σε σχέση με την τραχύτητα της επιφάνειας. Στη συνέχεια, πραγματοποιήσαμε ένα σύνολο δοκιμών μεταβάλλοντας την απόσταση του VH-1000-D από το διεγέρτη σε ευθεία γραμμή, ώστε να μελετήσουμε την ευαισθησία των μετρήσεων σε σχέση με την απόσταση. Στις αρχικές δοκιμές μεταβάλαμε κάθε φορά την εστίαση ώστε να έχουμε πάντα τη βέλτιστη δυνατή για την κάθε απόσταση, ενώ στις επόμενες κρατήσαμε

σταθερή την εστίαση όπως αυτή ρυθμίστηκε για κάποια συγκεκριμένη απόσταση αναφοράς. Τέλος, μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος όταν μεταξύ του VH-1000-D και του διεγέρτη παρεμβάλλονται καθρέπτες, οι οποίοι εκτρέπουν τη δέσμη του λέιζερ και την κατευθύνουν στο διεγέρτη υπό διάφορες γωνίες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του VH-1000-D για τη μέτρηση των κραδασμών σε διατάξεις αεριοστροβίλων του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π. Η πρώτη σειρά μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στη διάταξη αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών, όπου παράλληλα με το VH-1000-D χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των κραδασμών και συμβατικά επιταχυνσιόμετρα στις ίδιες θέσεις της μηχανής, ώστε να διαπιστωθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και η αξιοπιστία του συστήματος λέιζερ. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια ακόμη σειρά δοκιμών στη διάταξη του μικρού στροβιλοκινητήρα AMT Olympus στο δοκιμαστήριο του εργαστηρίου. Εδώ το VH-1000-D αποτέλεσε τη μοναδική μέθοδο μέτρησης κραδασμών, λόγω της ικανοποιητικής του απόδοσης στις προηγούμενες δοκιμές.

5.2 Συμπεράσματα και προτάσεις.

5.2.1 Πιστοποίηση του VH-1000-D.

Από τη διαδικασία της πιστοποίησης του συστήματος λέιζερ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

1. Στην περίπτωση που η δέσμη του λέιζερ δεν εστιάζει στο στόχο σε ευθεία γραμμή αλλά υπό γνωστή γωνία όπως και στην περίπτωση που εκτρέπεται με τη βοήθεια καθρεπτών, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση τόσο του λέιζερ όσο και των καθρεπτών ώστε να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα λόγω απόκλισης από τις ενδεδειγμένες για την κάθε περίπτωση μοίρες εκτροπής της δέσμης. Στη συνέχεια, το πραγματικό μέγεθος του κραδασμού προκύπτει έπειτα από τη διόρθωση της λαμβανόμενης μέτρησης με το αντίστοιχο συνημίτονο της γωνίας εκτροπής.
2. Ακριβείς μετρήσεις μπορούμε να λάβουμε σε συγκεκριμένο εύρος γωνιών, το οποίο εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του υπό μελέτη αντικειμένου. Από την επισκόπηση των σημάτων της ταχύτητας του κραδασμού προέκυψε ότι όσο πιο λεία είναι η επιφάνεια τόσο μεγαλύτερο είναι το παραπάνω εύρος. Η παρεμβολή των καθρεπτών επηρεάζει το υπόψιν εύρος γωνιών, το οποίο ενδέχεται να είναι λίγο μικρότερο καθώς έχουμε μεγαλύτερα επίπεδα σκέδασης της δέσμης και κατ' επέκταση επηρεάζεται το εύρος αξιοπιστίας της μεθόδου.
3. Στην περίπτωση που η δέσμη του λέιζερ εστιάζει στο στόχο σε ευθεία γραμμή και ζητούμενο είναι η λήψη μετρήσεων ακριβείας από μεγάλη απόσταση, λαμβάνουμε ακριβέστερα αποτελέσματα ρυθμίζοντας την εστίαση ώστε να

έχουμε πάντα τη βέλτιστη δυνατή. Έχοντας ρυθμίσει την εστίαση για κάποια δεδομένη απόσταση αναφοράς οι μετρήσεις παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια όσο απομακρυνόμαστε από αυτή δεδομένου όμως ότι η δέσμη του λέιζερ δεν υπερβαίνει την επιφάνεια του στόχου. Όταν όμως επιδιώκουμε τη βέλτιστη δυνατή εστίαση, το εύρος των αποστάσεων στο οποίο είναι δυνατό να λάβουμε μετρήσεις ακριβείας αυξάνει σημαντικά αλλά αντίστοιχα αν η δέσμη του λέιζερ υπερβεί την επιφάνεια του στόχου οι μετρήσεις χειροτερεύουν. Πλησιάζοντας προς το στόχο η ακρίβεια των μετρήσεων παραμένει ανεπηρέαστη είτε γίνεται ρύθμιση της εστίασης για κάθε απόσταση είτε αν αυτή έχει ρυθμιστεί για κάποια δεδομένη απόσταση αναφοράς.

5.2.2 Διάταξη δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών.

Κατά τη μέτρηση των κραδασμών της διάταξης δοκιμών αντίρροπα στρεφόμενων πτερωτών διαπιστώθηκε σε πρώτο στάδιο η ακριβής λειτουργία του VH-1000-D κατά τη μέτρηση του οριζόντιου κραδασμού στην ένατη ώρα της μηχανής, καθώς τα λαμβανόμενα αποτελέσματα συγκλίνουν με τα αντίστοιχα που επιστρέφουν τα επιταχυνσιόμετρα.

Οι μετρήσεις όμως που αφορούν στη δωδέκατη ώρα της μηχανής και για τη λήψη των οποίων η δέσμη του λέιζερ κατευθύνθηκε προς τη μηχανή με τη βοήθεια καθρεπτών, παρουσιάζουν ασταθή αναλογία σήματος προς θόρυβο με αποτέλεσμα σε πολλές από αυτές, στις οποίες η αναλογία αυτή ήταν υποτυπώδης να μην αποδίδεται ικανοποιητικά η απεικόνιση του επιπέδου των κραδασμών για συχνότητες μικρότερες των 12Hz. Κατ'επέκταση, πριν από την έναρξη των δοκιμών αποτελεί βασική προϋπόθεση η ρύθμιση του VH-1000-D ώστε να επιτευχθεί το ισχυρότερο δυνατό σήμα. Βέβαια κατά τη διέλευση της δέσμης του λέιζερ από τους καθρέπτες είναι δυνατό κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής να παρατηρηθεί αυξομείωση της ισχύος του σήματος παρά την αρχική ικανοποιητική ρύθμιση της εστίασης, οπότε και σε αυτήν την περίπτωση δεν προκύπτουν αξιόπιστες μετρήσεις. Ως πιθανή αιτία αυτής της αστάθειας του σήματος μπορεί να θεωρηθεί η χρήση καθρεπτών που δεν πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Δεν ήταν επίσης δυνατή η λήψη μετρήσεων ακριβείας με την προσαρμογή ηλεκτρομαγνήτη πάνω στη μηχανή, ο οποίος φέρει στέλεχος με καθρέπτη για την εκτροπή της δέσμης του λέιζερ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου μετράμε ένα συνδυασμό των κραδασμών της μηχανής και της διάταξης του ηλεκτρομαγνήτη με το στέλεχος του καθρέπτη, καθώς το VH-1000-D αποτελεί έναν σχετικό μορφοτροπέα κραδασμών κι όχι απόλυτο όπως είναι το επιταχυνσιόμετρο.

Τέλος, στις μετρήσεις που είχαμε ακριβή αποτελέσματα, η επισκόπηση των αντίστοιχων φασμάτων ισχύος έδειξε αμέσως τις συχνότητες που εμπεριέχουν

διαγνωστική πληροφορία και στις οποίες καταγράφονται συνιστώσες σημαντικού μεγέθους. Οι συχνότητες αυτές αντιστοιχούν συνήθως είτε σε ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας περιστροφής της ατράκτου, είτε σε συχνότητες περάσματος πτερυγίων.

5.2.3 Κινητήρας AMT Olympus.

Το δοκιμαστήριο του μικρού στροβιλοαντιδραστήρα απομονώνει την αίθουσα ελέγχου από τον κινητήρα επιτρέποντας την οπτική επαφή με αυτόν μέσω ενός ειδικού παραθύρου που φέρει διπλό προστατευτικό τζάμι. Μετρήσεις κραδασμών πραγματοποιήθηκαν στην τρίτη ώρα της μηχανής τόσο με την παρεμβολή του διπλού τζαμιού και όσο και χωρίς αυτήν. Κατά τη διέλευση της δέσμης του λέιζερ από το τζάμι παρατηρήθηκε μερική σκέδαση αυτής και πτώση της ισχύος του σήματος.

Στα φάσματα ισχύος προς σύγκριση, που αφορούν είτε στην κάθε μέθοδο χωριστά, είτε στη μεταξύ τους σύγκριση καταγράφονται για παραπλήσια σημεία λειτουργίας οι ίδιες χαρακτηριστικές συχνότητες και άρα υπάρχει επαναληψιμότητα στις μετρήσεις που λαμβάνουμε. Συνεπώς η μερική σκέδαση της δέσμης του λέιζερ και κατ' επέκταση η μείωση της ισχύος του σήματος δεν επηρεάζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας, καθώς το VH-1000-D είναι σε θέση να πραγματοποιεί μετρήσεις ακριβείας και με χαμηλή στάθμη σήματος.

Ένα ακόμη συμπέρασμα που προκύπτει από την επισκόπηση των μέσων ενεργών τιμών της ταχύτητας του κραδασμού για τα διάφορα σημεία λειτουργίας του κινητήρα, αφορά στην ενεργειακή συνεισφορά των χαμηλών συχνοτήτων (0-1000Hz και 0-2000Hz), η οποία είναι γενικά μικρή για όλες τις καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες συχνότητες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα έντονες κυρίως κατά την εκκίνηση της μηχανής όπου έχουμε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο κραδασμών. Στη συνέχεια όμως κατά την κανονική λειτουργία της παρατηρούμε την πτώση του επιπέδου των κραδασμών και την εξομάλυνση της λειτουργίας της.

Μια παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την επιλογή της συγκεκριμένης συσκευής ως μοναδικής μεθόδου μέτρησης των κραδασμών μιας μηχανής είναι η ρύθμιση του ψηφιακού φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Το ανώτερο διαθέσιμο όριο συχνοτήτων είναι αυτό των 22kHz, που σε συνδυασμό του ότι δε μπορούμε να επιλέξουμε την απενεργοποίηση του συγκεκριμένου φίλτρου εισάγει τον περιορισμό της συνιστώμενης χρήσης του VH-1000-D σε εκείνες τις περιπτώσεις που οι χαρακτηριστικές συχνότητες της μηχανής βρίσκονται για το σύνολο των σημείων λειτουργίας της σε εύρος συχνοτήτων έως 22kHz.

6

Βιβλιογραφία


- [1] Κ. Μαθιουδάκης, “Διαγνωστική Αεριοστροβίλων”, Αθήνα 2007
- [2] P. Castellini, M. Martarelli, E.P. Tomasini, “Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology’s needs”, *Science Direct - Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 1265-1285.
- [3] C. Cristalli, N. Paone, R.M. Rodriguez, “Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements”, *Science Direct - Mechanical Systems and Signal Processing* 20 (2006) 1350-1261.
- [4] C.J.D. Pickering, N.A. Halliwell, T.H. Wilmshurst, “The Laser Vibrometer: a portable instrument”, *Journal of Sound and Vibration* (1986) 107(3), 471-485.
- [5] D. M. Siringoringo, Y. Fujino, “Experimental study of laser Doppler vibrometer and ambient vibration for vibration-based damage detection”, *Science Direct - Engineering Structures* 28 (2006) 1803–1815.
- [6] N. Paone, G. M. Revel, “Laser vibration measurements through combustive flows: application to an industrial burner in working conditions”, *Science Direct - Measurement* 28 (2000) 21–31.
- [7] G.L. Rossi, C. Santolini, M. Giachi, S. Generosi, “The application of a laser scanning vibrometer for dynamic characterization of large impellers”, *Science Direct - Measurement* 24 (1998) 33.
- [8] P. Castellini, C. Santolini, “Vibration measurements on blades of a naval propeller rotating in water with tracking laser vibrometer”, *Science Direct - Measurement* 24 (1998) 43-54.
- [9] A.J. Oberholster, P.S. Heyns, “Online condition monitoring of axial-flow turbomachinery blades using rotor-axial Eulerian laser Doppler vibrometry”, *Science Direct - Mechanical Systems and Signal Processing* 23 (2009) 1634-1643.
- [10] Steve Rothberg, John Bell, “On the application of laser vibrometry to translational and rotational vibration measurements on rotating shafts”, *Science Direct - Measurement* 35 (2004) 201–210.
- [11] P. Castellini, E. Esposito, V. Legoux, N. Paone, M. Stefanaggi, E.P. Tomasini “On field validation of non-invasive laser scanning vibrometer measurement of damaged frescoes: experiments on large walls artificially aged” *Science Direct - S1296- 2074* (2000) 00145-X:FLA.
- [12] Product Data – Industrial Laser Doppler Vibrometer – Type 8338, Brüel & Kjær.
- [13] Instruction Manual – Calibration Exciter Type 4294, Brüel & Kjær.
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Doppler_vibrometer.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π1

Τεχνικές Προδιαγραφές του VH-1000-D

Π1.1 Προδιαγραφές του Industrial Laser Doppler Vibrometer – Type 8338.

General Specifications			
High-pass Filter (Adjustable via LCD display)	100 Hz on/off (–3 dB analogue, 3rd order Butterworth 60 dB/dec)		
Low-pass Filter (Adjustable via LCD display)	FIR filter cut-off at 1 kHz, 5 kHz or 22 kHz, roll-off >120 dB/dec		
Frequency Range	0.5 Hz to 22 kHz		
Dynamic Range	>90 dB over full bandwidth		
Calibration Accuracy	±1%		
Output Impedance	50 Ω		
Propagation Delay (typical)	1.1 ms		
Power	11 – 14.5 V DC, max. 1 A		
	Range 1	Range 2	Range 3
Configured Velocity Range (Adjustable via LCD display)	±20 mm/s (p-p)	±100 mm/s (p-p)	±500 mm/s (p-p)
Configured Sensitivity (Adjustable via LCD display)	5 mms ⁻¹ /V	25 mms ⁻¹ /V	125 mms ⁻¹ /V
Output Velocity Resolution (RMS) ^a	≤0.02 μm/s/√Hz	≤0.02 μm/s/√Hz	≤0.1 μm/s/√Hz
Housing			
Signal Output Connectors	1. Industrial connector for supply voltage 2. Signal strength level and velocity output		
Housing Protection	IP 64 standard		
Dimensions	299 mm × 148 mm × 83 mm (325 mm with lens) 11.7" × 5.8" × 3.2" (12.7" with lens)		
Weight	< 3.5 kg (7.71 lb.)		
Optics			
Optical System	1. Fixed focus lens (ff); 238 mm (9.3") optimal stand off distance 2. Variable focus lens (vf); 90 mm (3.5") to approximately 30 m (1180") stand off distance. Best signal at 100 mm + n × 138 mm (3.9" + n × 5.4")(n = 0, 1, 2, ...): 100 mm, 238 mm, 376 mm, etc.		
Laser and Safety	< 1 mW output power, safety class II, He-Ne visible 632.8 nm laser (red light) lens shutter		
Environmental	Ambient Temperature: +5°C to +40°C (+41°F to +104°F); Relative Humidity: up to 80%		
Compliance with Standards	 Compliant with CE and C-Tick markings Compliant with EMC Emissions EN 61000–3–2 and EN 61000–3–3 Compliant with EMC Immunity EN 61000–4–2, EN 61000–4–3, EN 61000–4–4, EN 61000–4–5, EN 61000–4–6 and EN 61000–4–11		



Π1.2 Βαθμονόμηση του VH-1000-D.

Π1.2.1 Ηλεκτρονική βαθμονόμηση.

Reference Conditions:

Frequency:	1kHz (sinusoidal)	Measurement procedure: Feeding a synthetic Doppler frequency signal corresponding to a sine-shaped vibration of 1kHz with amplitude of 70% of the full-scale value of the particular range. Measurement of the rms value of the decoder output voltage. Calculation of the individual scaling factor as ration from the rms value of the reference velocity and measured rms value of the voltage.
Amplitude:	70% of full scale	
Temperature:	(25±3)°C	
Uncertainty:	1%	

Measurement Values (Velocity Output):

Nominal scaling factor	Full scale	Set value	Actual value	Individual scaling factor
5 mm/s/V	20 mm/s	1.980 Vrms ±16mV	1.983 Vrms	4.992 mm/s/V
25 mm/s/V	100 mm/sec		1.983 Vrms	24.96 mm/sec/V
125 mm/s/V	500 mm/sec		1.983 Vrms	124.8 mm/sec/V

Π1.2.2 Μηχανική βαθμονόμηση.

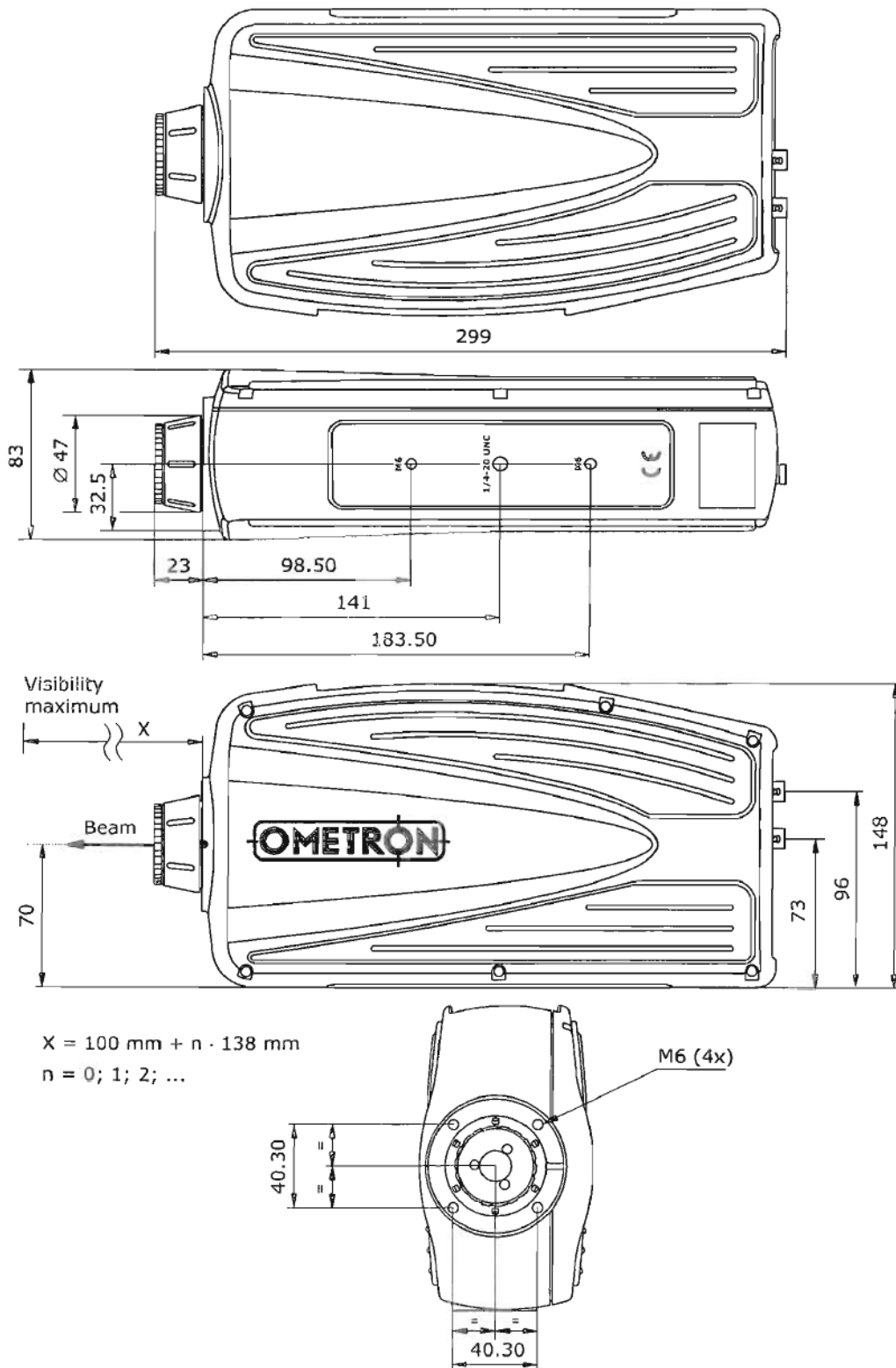
Reference conditions:

Frequency:	159.15Hz (sinusoidal)	Measurement procedure: Measurement on a calibrated vibrating object.
Amplitude:	10.11 μm_{rms}	
Velocity:	10.11 mm/s _{rms}	
Temperature:	(25±3)°C	
Uncertainty:	3%	

Measurement Values (Velocity Output):

Nominal scaling factor	Set value	Actual value	Individual scaling factor
5 mm/s/V	2.022 V _{rms} ± 40 mV	2.017 V _{rms}	5.012 mm/s/V
25 mm/s/V	0.4033 V _{rms} ± 40 mV	0.4033 V _{rms}	25.07mm/sec/V

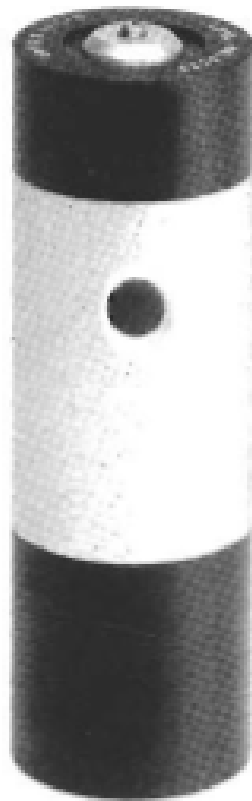
Π1.3 Τεχνικά σχέδια του VH-1000-D.



Σχήμα Π1.1: Όψεις του VH-1000-D

Π2

Calibration Exciter Type 4294



The Calibration Exciter Type 4294 is a completely self-contained, pocket-sized, vibration reference source. It produces a reference acceleration level of 10ms^{-2} RMS at a frequency of 159.15Hz ($\omega=1000\text{rads}^{-1}$) and is intended for rapid calibration of vibration measuring, monitoring and recording systems utilizing piezoelectric accelerometers and other vibration transducers.

Π2.1 Προδιαγραφές του Calibration Exciter Type 4294.

Dynamic Characteristics	
Frequency (Hz)	159.15±0.02%
Acceleration (ms⁻² (RMS))	10±3%
Velocity (mms⁻¹ (RMS))	10±3%
Displacement (μm)	10±3%
Transverse Amplitude	<5% of main axis amplitude
Distortion	<2% for 10 to 70g
Power Requirements	typical: <7% for 0 to 10g, use DB (10g) with very light accelerometers to achieve 2% of distortion
Built-in Battery	One 9V Alkaline Battery QB 0016 (IEC type 6LR61)
Battery Life	Approx. 200 calibrations, each lasting 100s with automatic switching off at the end of each calibration.
Warm-up Time (Seconds)	<5
Signal Duration (Seconds)	103±1s with automatic stop
Long-term Stability	Better than 1% per year for acceleration, velocity and displacement; better than 10ppm per year for frequency
Physical Characteristics	
Length	155mm (6.1in)
Diameter	52mm (2.05in)
Weight	500g (17.6oz) including battery and leather case
Transducer Mounting	
Maximum Load (g)	70
Mounting Torque (Nm)	Max. 0.5
Mounting Thread	10-32 UNF

Calibration Exciter

USES:

- Quick, easy field calibration of vibration measurement and recording systems.
- System fault finding and continuity checking.
- Acceleration, velocity and displacement calibration.

FEATURES:

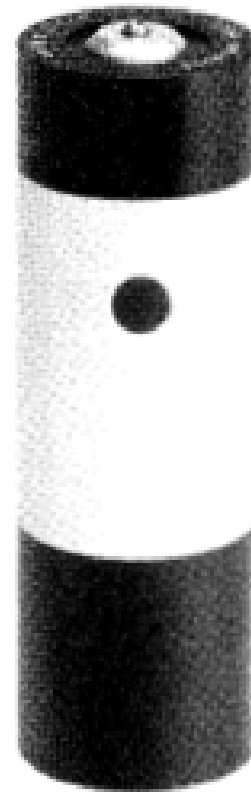
- Convenient, hand-held vibration reference.
- Integral accelerometer for servo-stabilisation of vibration amplitude.
- Reference vibration level of 10ms^{-2} .
- Fixed operating frequency of 159.15Hz corresponding to 1000rads^{-1} .
- Crystal controlled oscillator.
- Self-contained battery operation.

The Calibration Exciter Type 4294 is a small, handy, completely self-contained vibration reference source. It is intended for rapid calibration and checking of vibration measurement, monitoring and recording systems utilizing piezoelectric accelerometers as well as other types of vibration transducer having a maximum mass of 70grammes. The 4294 permits accurate adjustment of measuring instrumentation to indicate a standard acceleration level of 10ms^{-2} , thus calibrating the system for correct measurement of other vibration levels.

The reference signal may additionally be used for velocity and displacement calibration, at 10mms^{-1} and $10\mu\text{m}$ respectively. Not only will a system calibration using the 4294 automatically take into account the influence of the connecting cables on the voltage sensitivity of the transducer but it will also provide a quick check on the correct function of the complete measurement system.

A sectional view of the Calibration Exciter's vibration head is shown in the Fig.1. The calibrator embodies an electromagnetic exciter driven by a crystal oscillator at a frequency of 159.15Hz (1000rads^{-1}). Servo feed-back via a small accelerometer on the underside of the vibration table is used to maintain a constant vibration level of 10ms^{-2} . This enables transducers with masses of up to 70grams to be calibrated without their mass influencing the reference level. To prevent overload, power for the calibrator is automatically disconnected in the event of a transducer mass of more than 70grams being mounted on the table.

Use of the calibrator is very straightforward. The transducer is conveniently attached to the



calibrator table using a 10-32 UNF steel stud YQ 2962. Alternatively, the Mounting Disc DB 2996 (10grams) supplied provides a convenient means of attaching transducers manufactured with 3mm threads or those fitted with a Mounting Magnet Ua 0642. The Mounting Disc also permits the attachment of transducers with either Beeswax or Cyanacrylate adhesive. After connection of the transducer to an appropriate vibration level indicating instrument, the calibrator is actuated by depressing the small push-button on the side of its housing. The indicating instrument may be subsequently adjusted to read the relevant reference value (Fig.2). Following system adjustment the calibrator is switched off by depressing the push-button a second time.

To prolong the useful life of its built-in-battery, the 4294 automatically switches off after approximately 100s sixty calibration periods of this duration are possible with new battery.

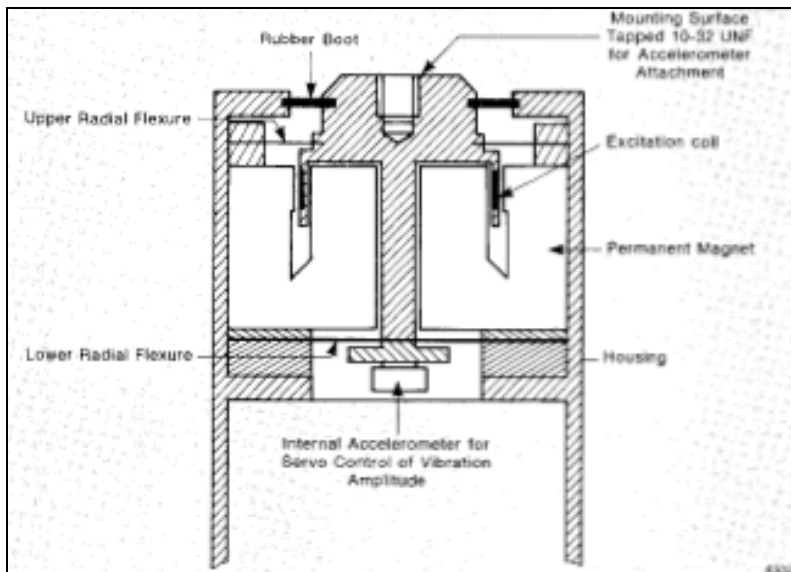


Fig.1. Cross-Section of the Vibration System

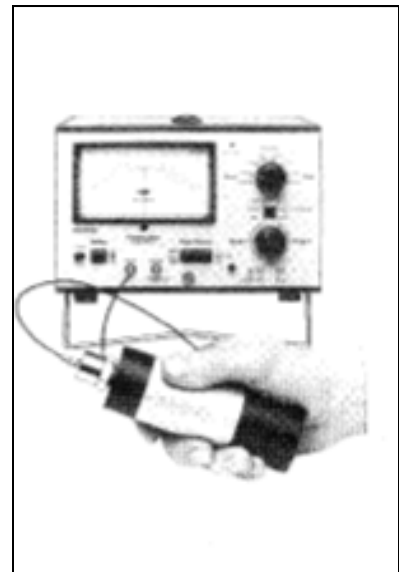


Fig.2. Calibration of a 2511 Vibration Meter using the 4294.

Specifications 4294

Specifications from serial no.: 1466533

<p>VIBRATION SYSTEM: Electromagnetic exciter with internal built-in piezoelectric accelerometer (shear type) for servo regulation of the vibration amplitude. Frequency: 159.15Hz $\pm 0.02\%$ (1000 rads⁻¹). Acceleration: 10ms⁻² (RMS) $\pm 3\%$. Velocity: 10mms⁻¹ (RMS) $\pm 3\%$. Disolcement: 10μm (RMS) $\pm 3\%$. Transverse amplitude: less than 5% of main axis amplitude. Distortion: less than 2% for 10 to 70gram load; less than 7% for 0 to 10gram. Warm-up Time: less than 5s.</p>	<p>TRANCDUCER MOUNTING: Maximum Load: 70grams. Mounting Thread: 10-32 UNF. TEMPERATURE RANGE: +10 to +40°C (50 to 104°F) for 10ms⁻² reference within $\pm 3\%$. -10 to +55°C (14 to 131°F) for 10ms⁻² reference within $\pm 5\%$. HUMIDITY: Up to 90% RH (non-condensing) at 30°C. POWER REQUIREMENTS: Built-in Battery: one 9V Alkaline</p>	<p>DIMENSIONS: Length: 155mm (6.1in). Diameter: 52mm (2.05in). WEIGHT: 500grams including battery and leather case. ACCESSORIES INCLUDED: 1x Leather Case.....KE 0278 1x 9V Battery.....QB 0016 1x 10-31 UNF Steel Stud.....YQ 2962 1x Mounting Disc Adaptor.....DB 2996</p>
--	--	---

<p>Mounting Torque for accelerometer: max. 0.5Nm.</p> <p>Signal Duration: 103 ±1s with automatic stop.</p> <p>Long Term Stability: better than 1% per year for acceleration, velocity, and displacement; better than 10ppm per year for frequency.</p>	<p>Battery QB 0016 (IEC type 6LR61).</p> <p>Battery Life: approximately 60 callibrations each lasting approximately 100s with automatic switching off at the end of each calibration.</p>	
--	--	--

Π3

Piezoelectric Accelerometer Type 8341

Π3.1 Προδιαγραφές του Piezoelectric Accelerometer Type 8341.

	Units	8341	
Dynamic Characteristics			
Voltage Sensitivity (@ 160Hz)	mV/g	100 ±10%	
Measuring Range	g	±50	
Mounted Resonance Frequency	kHz	27	
Amplitude Response ±10%	Hz	0.5 to 10000	
Residual Noise	mg	0.04	
Transverse Sensitivity	%	<5	
Electrical Characteristics			
Output Impedance	Ω	<100	
DC Output	At room temperature	V	12 ±1
Bias Voltage	In specified temp. range	V	8 to 16
Power Supply	mA	2 to 20	
Start-up Time	s	3	
Grounding		Case insulated	
Environmental Characteristics			
Temperature Range	°C (°F)	-50 to +100 (-60 to +212)	
Humidity		Hermetically sealed	
Max. Operational Shock (peak)	g pk	5000	
Base Strain Sensitivity	Equiv. g/μ strain	<0.012	
Thermal Sensitivity	Equiv. %/°C (%/°F)	0.11 (0.06)	
Physical Characteristics			
Dimensions		See outline drawing	
Weight	gram (oz.)	41 (1.45)	
Case Material		Stainless steel	
Connector		MIL-C-5015	
Mounting		¼"–28 UNF thread	
Mounting Torque	Nm (lb. in.)	1.8 (15)	

Π3.2 Τεχνικά σχέδια του Piezoelectric Accelerometer Type 8341.

