



Μελέτη Αισθητηρίου που Λειτουργεί με την Αρχή Ανέπαφης
Ανίχνευσης και Καταγραφής Δεδομένων: Χαρακτηρισμός
Ευαισθησίας Ανίχνευσης και Βαθμονόμηση

από

Αχιλλεύς Δαβράδος

Διατριβή για λήψη βασικού διπλώματος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Γ. Δημογιαννόπουλος

Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024



Study of Sensor that Operates on Contactless Detection and Data Acquisition Principle: Sensitivity Characterization and Calibration

by

Achillefs Davrados

Diploma Thesis

Advisor:

Dimitrios G. Dimogianopoulos

Professor

Department of Industrial Design and Production Engineering

University of West Attica

Athens, February 2024

**Μελέτη Αισθητηρίου που Λειτουργεί με την Αρχή Ανέπαφης Ανίχνευσης και Καταγραφής
Δεδομένων: Χαρακτηρισμός Ευαισθησίας Ανίχνευσης και Βαθμονόμηση**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή:

A/a	Όνομα Επώνυμο	Βαθμίδα/Ιδιότητα	Ψηφιακή υπογραφή
1	Δημήτριος Δημογιαννόπουλος	Καθηγητής Επιβλέπων	
2	Δημήτριος Κάντζος	Καθηγητής	
3	Χρήστος Δρόσος	Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αχιλλεύς Δαβράδος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 714222017077 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Αχιλλεύς Δαβράδος

Περιεχόμενα

Σημασιολογία.....	9
Περίληψη	10
Abstract.....	11
Αναγνωρίσεις	12
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 2 Πειραματική Διάταξη - Μέθοδος Ανάλυσης Δεδομένων.....	15
2.1 Μαγνητοελαστικά υλικά ως αισθητήρια.....	15
2.1.1 Διατάξεις με φιλμ μαγνητοελαστικών	19
2.2 Η πειραματική διάταξη	22
2.3 Καταγραφή και προεργασία σήματος	25
2.4 Σήμα στο πεδίο της συχνότητας - Μετασχηματισμός Fourier.....	28
2.5 Αυτοσυσχέτιση Χρονοσειρών.....	36
2.6 Μέθοδος σύγκρισης των σημάτων.....	39
2.6.1 Σύνοψη	51
2.7 Ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων – Στατιστικοί έλεγχοι υποθέσεων.....	51
2.7.1 Στατιστικοί Έλεγχοι Υποθέσεων	52
2.7.2 Έλεγχος Kruskal-Wallis.....	54
2.7.3 Συντηρητικότητα του ελέγχου	57
2.7.4 Σύνοψη	60
Κεφάλαιο 3 : Εφαρμογή της Μεθόδου Ανάλυσης στα Δεδομένα.....	61
3.1 Διαγράμματα σύγκρισης των σημάτων	62
3.1.1 Σύγκριση των σημάτων στο πεδίο του χρόνου.....	62
3.1.2 Σύγκριση των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας.....	63
3.1.3 Σύγκριση των διαστημάτων εύρους κορυφών στην συχνότητα.....	66
3.2 Εφαρμογή του ελέγχου Kruskal-Wallis στα δεδομένα	70
3.3 Σύνοψη.....	74
Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα, Μελλοντικές Ευκαιρίες για Εργασία και Περιορισμοί	75
4.1 Συμπεράσματα	75
4.2 Περιορισμοί και μελλοντική εργασία	76
Αναφορές	78
Παράρτημα Α Κώδικας και συναρτήσεις του MATLAB [®] που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.....	80

Σχήματα και Πίνακες

Σχήμα 2.1.1: Αλλαγές στις διαστάσεις σε μαγνητοελαστικά υλικά λόγω εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. (α) Από την κανονική τους θέση όταν $H = 0$ (αριστερά), στην περιστροφή τους όταν $H \neq 0$, (β) Υλικό με δίπολα με τυχαίο προσανατολισμό (αριστερά), και αναδιάταξη αυτών όταν $H \neq 0$	16
Σχήμα 2.1.2: Μια τυπική καμπύλη B-H, για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό	18
Σχήμα 2.1.3: Η διάταξη στην οποία το στοιχείο διεγείρεται με την χρήση πηνίου διέγερσης	20
Σχήμα 2.1.4: Διάταξη που χρησιμοποιεί την παθητική διέγερση	21
Σχήμα 2.2.1: Η δοκός που χρησιμοποιείται στην διάταξη με το μαγνητοελαστικό φιλμ στο ένα άκρο	22
Σχήμα 2.2.2: (α) Ο διεγέρτης SMARTSHAKER™ K2004E01 (β) Το κεντρί του διεγέρτη πάνω στο οποίο συνδέεται δοκός	23
Σχήμα 2.2.3: (α) Το πηνίο μέτρησης της μαγνητικής ροής, (β) Η υποδιάταξη του αισθητηρίου (ζεύγος μαγνητοελαστικού – πηνίου ανίχνευσης)	23
Σχήμα 2.2.4: Η πειραματική διάταξη.....	24
Σχήμα 2.3.1: Λήψη κυματομορφής από τον παλμογράφο με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά	26
Σχήμα 2.3.2: Παρουσίαση της τεχνικής αφαίρεσης γραμμικών τάσεων από χρονοσειρές με δύο διαφορετικούς αλγόριθμους α) Αφαίρεση μέσης τιμής ανά τεμάχιο δεδομένων(Block Average), β) Αφαίρεση γραμμικών τάσεων (Linear detrending).....	27
Σχήμα 2.3.3: Το φαινόμενο DC Offset στην συχνότητα 0 Hz, που προκαλείται από την μέση τιμή των σημάτων στο πεδίο του χρόνου	28
Σχήμα 2.4.1: Οι 4 διαφορετικοί τύποι του μετασχηματισμού Fourier	30
Σχήμα 2.4.2: Διάγραμμα του σήματος $x(t)$ στο πεδίο του χρόνου.....	32
Σχήμα 2.4.3: Το φάσμα των μέτρων του μετασχηματισμού FFT του σήματος $x(t)$	33
Σχήμα 2.4.4: Φάσμα FFT στις αρνητικές και θετικές συχνότητες για το σήμα $x(t)$	33
Σχήμα 2.4.5: Μονόπλευρο φάσμα πλάτους του FFT του σήματος $x(t)$	34
Σχήμα 2.4.6: Φάσματα πλάτους του $x(t) = \cos(2\pi 40t - \pi/4)$ (αριστερά), και του $y(t) = \sin(2\pi 40t - \pi/4)$ (δεξιά).....	35
Σχήμα 2.4.7: Φάσματα φάσης του $x(t) = \cos(2\pi 40t - \pi/4)$ (αριστερά), και του $y(t) = \sin(2\pi 40t - \pi/4)$ (δεξιά).....	35
Σχήμα 2.5.1: Διάγραμμα βαθμίδων της πειραματικής διάταξης της δοκού, όπου η μετατόπιση της δοκού μετατρέπεται σε μετρούμενο σήμα με την χρήση της υποδιάταξης του αισθητηρίου	36
Σχήμα 2.5.2: Ακολουθία λευκού θορύβου: (1) Η χρονοσειρά δεδομένων της ακολουθίας (2) Μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT (3) Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της ακολουθίας.....	39
Σχήμα 2.6.1: Μέτρηση θορύβου: (1) Η χρονοσειρά δεδομένων της μέτρησης (2) Μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT (3) Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς	40
Σχήμα 2.6.2: Μέτρηση διέγερσης: (1) Η χρονοσειρά δεδομένων της μέτρησης (2) Μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT (3) Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς	41
Σχήμα 2.6.3: Μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT των δύο μετρήσεων (θόρυβος και διέγερση) σε κοινό σύστημα αξόνων, με εμφανές το φαινόμενο μετατόπισης στην συχνότητα	43
Σχήμα 2.6.4: Μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT των δύο μετρήσεων (θόρυβος και διέγερση) σε κοινό σύστημα αξόνων, με εμφανές το φαινόμενο μετατόπισης στην συχνότητα στις χαμηλές συχνότητες	44
Σχήμα 2.6.5: Φάσματα πλάτους των δύο σετ μετρήσεων (θορύβου και διέγερσης).....	45

Σχήμα 2.6.6: Φάσματα πλάτους των δύο σετ μετρήσεων (θορύβου και διέγερσης), στις χαμηλές συχνότητες	46
Σχήμα 2.6.7: (α) Οι κορυφές των μετρήσεων των δύο προφίλ στην συχνότητα (περιοχή 316 kHz) (β) Διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για την συγκεκριμένη περιοχή στην συχνότητα.....	47
Σχήμα 2.6.8: (α) Οι κορυφές των μετρήσεων των δύο προφίλ στην συχνότητα (περιοχή 1400Hz) (β) Διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για την συγκεκριμένη περιοχή στην συχνότητα	47
Σχήμα 2.6.9: Φάσματα πλάτους δύο διαφορετικών διεγέρσεων στα οποία δεν είναι εμφανής η διάκριση μεταξύ των κορυφών	48
Σχήμα 2.6.10: Φάσματα πλάτους δύο διαφορετικών διεγέρσεων στα οποία δεν είναι εμφανής η διάκριση μεταξύ των κορυφών (χαμηλές συχνότητες).....	49
Σχήμα 2.6.11: Διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για τις περιοχές ενδιαφέροντος (α) 316 kHz και (β) 1400 Hz	50
Σχήμα 2.6.12: Διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για τις περιοχές ενδιαφέροντος (α) 1800 kHz και (β) 2100 Hz	50
Σχήμα 2.7.1: Πίνακας με στοιχεία και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων ελέγχου Kruskal-Wallis της σύγκρισης στο MATLAB®	57
Σχήμα 2.7.2: Διάγραμμα των δύο ημιτόνων με 40 δείγματα στο χρόνο (πάνω). Πίνακας ANOVA για τον έλεγχο Kruskal-Wallis (κάτω)	58
Σχήμα 2.7.3: Διάγραμμα των δύο ημιτόνων με 400 δείγματα στο χρόνο (πάνω). Πίνακας ANOVA για τον έλεγχο Kruskal-Wallis (κάτω)	59
Σχήμα 2.7.4: Πίνακας ANOVA για τον έλεγχο Kruskal-Wallis για ημίτονα με πλήθος δειγμάτων: (1) 800 δείγματα, (2) 1000 δείγματα, (3) 1600 δείγματα.....	60
Σχήμα 3.1.1: Χρονοσειρές των μετρήσεων για τα πρώτα τρία προφίλ διέγερσης	63
Σχήμα 3.1.2: Φάσματα πλατών συγκεκριμένων μετρήσεων για όλα τα προφίλ διέγερσης	65
Σχήμα 3.1.3: Η ομάδα κορυφών στην περιοχή 357kHz	65
Σχήμα 3.1.4: Φαινόμενα θορύβου στα σήματα που προήλθαν από την διέγερση της δοκού..	66
Σχήμα 3.1.5: Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για την περιοχή ενδιαφέροντος 316 kHz	68
Σχήμα 3.1.6: Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για την περιοχή ενδιαφέροντος 1400 Hz	68
Σχήμα 3.1.7: Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για την περιοχή ενδιαφέροντος 1800 Hz	69
Σχήμα 3.1.8: Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για την περιοχή ενδιαφέροντος 2100 Hz	69
Πίνακας 2.7.1: Τα προφίλ διέγερσης που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.....	62
Πίνακας 3.2.1: Τιμές σημαντικότητας (p-values) για την σύγκριση μεταξύ δύο γκρουπ στην ζώνη ενδιαφέροντος 316 kHz	71
Πίνακας 3.2.2: Τιμές σημαντικότητας (p-values) για την σύγκριση μεταξύ δύο γκρουπ στην ζώνη ενδιαφέροντος 1400 Hz	72
Πίνακας 3.2.3: Τιμές σημαντικότητας (p-values) για την σύγκριση μεταξύ δύο γκρουπ στην ζώνη ενδιαφέροντος 1800 Hz	72
Πίνακας 3.2.4: Τιμές σημαντικότητας (p-values) για την σύγκριση μεταξύ δύο γκρουπ στην ζώνη ενδιαφέροντος 2100 Hz	72

Πίνακας 3.2.5: Η χαρτογράφηση λειτουργίας του αισθητηρίου στην συχνότητα..... 74

Σημαιολογία

Magnetostriction – Μαγνητοελαστικότητα

Magnetic permeability – Μαγνητική διαπερατότητα

Coercivity – Δύναμη συνεκτικότητας μαγνητικού πεδίου

Stress – Τάση

Strain – Παραμόρφωση

Torque – Ροπή

Stochastic processes – Στοχαστικές (αναφέρονται και ως τυχαίες σε ορισμένη βιβλιογραφία (Oppenheim & Schaffer, 2013)) διεργασίες

Probability density function – Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

Underlying Process – Υποκείμενη διεργασία

Variance – Διακύμανση/ δειγματική διασπορά

Covariance – Συνδιασπορά

Autocorrelation – Αυτοσυσχέτιση

Distribution – κατανομή

Frequency Resolution – Ανάλυση στην συχνότητα

Spectral Leakage – Φασματική διαρροή

Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί ο χαρακτηρισμός ευαισθησίας ανίχνευσης και η βαθμονόμηση ενός αισθητηρίου που λειτουργεί με ανέπαφα σύμφωνα με την μαγνητοελαστική αρχή, αναφορικά με την ανίχνευση των μεταβαλλόμενων συνθηκών διέγερσης στις οποίες υποβάλλεται μια δοκό προβόλου. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από την δοκό προβόλου, κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά, έναν μικρό διεγέρτη που συνδέεται στο ελεύθερο άκρο της δοκού και μία παλμογεννήτρια που παρέχει σε αυτόν μια διέγερση με επιλεγμένα χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιείται διαφορετική συχνότητα διέγερσης για κάθε ξεχωριστό προφίλ διέγερσης. Ένα φιλμ μαγνητοελαστικού υλικού τοποθετημένο πάνω στην δοκό και ένα πηνίο τοποθετημένο σε μικρή απόσταση από πάνω της αποτελούν την διάταξη ανίχνευσης, η οποία δέχεται τις φορτίσεις της δοκού και τις μετατρέπει σε τάση. Αυτά τα σήματα καταγράφονται με την χρήση ενός παλμογράφου. Η πειραματική διάταξη έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την σχεδίαση αποδοτικής διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων, αφού η επιτυχής ανίχνευση των διαφορετικών προφίλ διέγερσης βασίζεται σε συμβατικό εξοπλισμό. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα υπόκεινται σε επεξεργασία με την χρήση τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, με σκοπό να παρατηρηθούν τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν σήματα που προέρχονται από διαφορετικά προφίλ διέγερσης. Αυτές οι διαφορές εκφράζονται με την μορφή αλλαγών στο φασματικό περιεχόμενο (μετατοπίσεις στην συχνότητα) των σημάτων. Αυτή η διατριβή πρωτοτυπεί στο γεγονός ότι γίνεται απόπειρα να επεκταθούν τα ευρήματα προηγούμενων μελετών που αφορούν την ικανότητα ανίχνευσης του αισθητηρίου με την χρήση μεθόδων στατιστικής ανάλυσης στα δεδομένα. Με τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης είναι δυνατή η χαρτογράφηση της λειτουργίας του αισθητηρίου για διαφορετικές συχνότητες διέγερσης. Αποδεικνύεται ότι το αισθητήριο μπορεί να ανιχνεύσει διαφορετικά προφίλ με συχνότητες διέγερσης σε ένα εύρος έως 145 Hz.

Abstract

The subject of the current thesis is the sensitivity characterization and calibration of a sensor operating in a contactless manner based on the magnetoelastic principle. The sensor is fixed on a cantilever beam, which is subjected to varying excitation conditions. The experimental setup consists of a composite beam fixed in a cantilever arrangement, a compact exciter connected to the beam's clamp-free end, which provides an excitation profile as set by a waveform generator. Different excitation frequencies are used for each distinct mode. A magnetoelastic film which is fixed upon the beam and a coil suspended above it form the sensing setup, which receives the beam's various excitation modes and transforms them into voltage. These signals are recorded using an oscilloscope. The design of the experimental setup is cost-efficient, since the successful detection of the altered modes relies on the use of conventional equipment. The acquired data are then processed using digital signal processing techniques, in order to pick up distinct features of the signals originating from different modes. These features show up as changes in the spectral content (frequency shifts) of the signals. The novelty of this study is the use of statistical analysis methods for extending past findings concerning the sensing ability of the setup. Through the statistical evaluation of the data, a mapping of the sensing characteristics of the setup as a function of various excitation modes, is proposed. It is demonstrated that the sensor successfully detects modes of various excitation frequencies up to 145 Hz.

Αναγνωρίσεις

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Γ. Δημογιαννόπουλο για την συνεχή υποστήριξη της διπλωματικής μου διατριβής για την υπομονή που επέδειξε και για την καθοδήγηση την οποία μου παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησης της.

Ευχαριστώ βαθιά τον πατέρα και την μητέρα μου για την στήριξη που μου παρείχαν σε πνευματικό και οικονομικό επίπεδο. Χωρίς την ενθάρρυνση και την υποστήριξη τους αυτό το εγχείρημα θα ήταν πολύ πιο δύσκολο.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την σύντροφο μου Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου για τα επικοινωνιακά σχόλια της και την υποστήριξη της.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής διατριβής είναι ο χαρακτηρισμός ευαισθησίας ανίχνευσης του αισθητηρίου που λειτουργεί με την αρχή της ανέπαφης ανίχνευσης και η μελέτη των χαρακτηριστικών λειτουργίας του πάνω σε μια ήδη δοκιμασμένη πειραματική διάταξη. Η διάταξη αποτελείται από μια δοκό προβόλου (cantilever beam) η οποία στο πακτωμένο άκρο της έχει τοποθετημένη την διάταξη του αισθητηρίου. Αυτή συνίσταται από ένα λεπτό φιλμ μαγνητοελαστικού υλικού και σε μικρή απόσταση από πάνω της, ανέπαφα, βρίσκεται ένα πηνίο. Αυτά τα δύο στοιχεία σε συνδυασμό εκμεταλλεύονται το φαινόμενο μαγνητοελαστικότητας για να λαμβάνουν και να στέλνουν ηλεκτρικά σήματα. Το αισθητήριο λοιπόν δέχεται τις διεγέρσεις που εφαρμόζονται στο ελεύθερο άκρο της δοκού και μεταφράζει τις δονήσεις που παράγονται σε ηλεκτρικά σήματα.

Παρόμοια διάταξη έχει χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της παραμόρφωσης προβόλου δοκού σε προηγούμενες εργασίες (Dimogianopoulos & Mouzakis, 2021), (Σουλτάνα, 2022). Στην παρούσα διατριβή γίνεται η προσπάθεια επιβεβαίωσης των ικανοτήτων ανίχνευσης που παρουσιάζονται σε αυτές με την χρήση εργαλείων στατιστικής ανάλυσης.

Από τις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση παραμόρφωσης σε μία δοκό, η χρήση της παραπάνω διάταξης έχει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνει σήματα χωρίς να έρχεται σε επαφή με την δοκό οπότε με αυτόν τον τρόπο δεν επηρεάζει την λειτουργία της διάταξης με την χρήση καλωδίων, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους (όπως επιταχυνσιόμετρα). Η πειραματική διάταξη έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την οικονομική αποδοτικότητα, γι' αυτό η επιτυχής ανίχνευση της διάταξης βασίζεται σε συμβατικό εξοπλισμό και δίνεται έμφαση στην επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται από κατάλληλα πακέτα λογισμικού.

Τα ηλεκτρικά σήματα δημιουργούνται από το πηνίο της διάταξης ανίχνευσης καταγράφονται από έναν παλμογράφο. Πάνω σε αυτά τα δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν μέθοδοι ανάλυσης και επεξεργασίας ψηφιακού σήματος για την διερεύνηση της ικανότητας ανίχνευσης του αισθητηρίου όταν η δοκός υποβάλλεται σε εξωτερικά φορτία με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο ήταν απαραίτητο στα στάδια της παρούσας διπλωματικής διατριβής και δίνεται μια περιγραφή των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, με έμφαση στην διάταξη του αισθητηρίου και στην αρχή λειτουργίας του. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η μέθοδος με την οποία επεξεργάστηκαν τα δεδομένα. Από την καταγραφή τους και τις τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακού σήματος που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάλληλη οπτική σύγκριση των σημάτων, μέχρι και τα στατιστικά εργαλεία που έρχονται να παγιώσουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις συγκρίσεις αυτές.

Στο τρίτο κεφάλαιο εφαρμόζεται η μέθοδος που παρουσιάστηκε προηγουμένως στα δεδομένα που προέρχονται από την διέγερση της δοκού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία του συνόλου των δεδομένων. Πρώτα δίνονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των σημάτων και τα διαγράμματα των συγκρίσεων και έπειτα ακολουθούν οι πίνακες στατιστικής ανάλυσης των επεξεργασμένων

δεδομένων. Με βάση τα αποτελέσματα που λαμβάνονται προτείνεται και η χαρτογράφηση του αισθητηρίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ο απολογισμός της εργασίας και παρουσιάζονται οι δυνατότητες που υπάρχουν για περαιτέρω έρευνα πάνω στο αντικείμενο της εργασίας.

Στο Παράρτημα Α δίνονται οι συναρτήσεις του MATLAB[®] που δημιουργήθηκαν για την ανάλυση των δεδομένων.

Κεφάλαιο 2

Πειραματική Διάταξη - Μέθοδος Ανάλυσης Δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία με την οποία λήφθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία και σύγκριση των καταγραφών του παλμογράφου έτσι ώστε να μελετηθεί η δυνατότητα ανίχνευσης διέγερσης από το αισθητήριο.

Επίσης δίνονται πληροφορίες για την αρχή λειτουργίας του αισθητηρίου, τα εργαλεία επεξεργασίας ψηφιακού σήματος και τα στατιστικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο ανάλυσης που παρουσιάζεται.

2.1 Μαγνητοελαστικά υλικά ως αισθητήρια

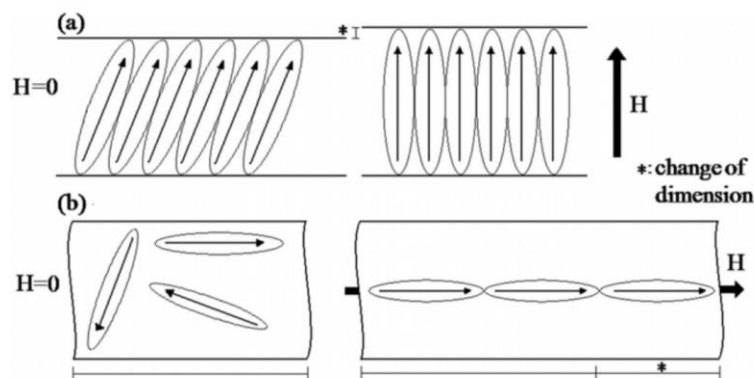
Η λειτουργία της διάταξης ανίχνευσης βασίζεται στην μαγνητοελαστική αρχή. Υπάρχουν συγκεκριμένες διατάξεις που εκμεταλλεύονται αυτήν την σύζευξη μηχανικών και μαγνητικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν κάποια υλικά. Η καταγραφή αυτών των διατάξεων σε κατηγορίες ανάλογα με την δομή της διάταξης, αλλά και η επεξήγηση της μαγνητοελαστικής αρχής, παρουσιάζονται στην μελέτη η οποία αναφέρεται παρακάτω.

(Dimogianopoulos, 2012):

Η μέτρηση παραμόρφωσης της δοκού από αυτήν την διάταξη βασίζεται στην αρχή της μαγνητοελαστικότητας (magnetoelasticity). Όπως εξηγείται στη συγκεκριμένη μελέτη για τα αισθητήρια που λειτουργούν με αυτήν την αρχή, ο όρος μαγνητοελαστικότητα αναφέρεται στην ιδιότητα που παρουσιάζουν ορισμένα υλικά να μεταβάλλουν τις διαστάσεις τους όταν αλλάζει η εσωτερική τους μαγνήτιση. Αντιστρόφως παρατηρούνται αλλαγές στην εσωτερική τους μαγνήτιση όταν υποστούν μηχανική καταπόνηση.

Η χαρακτηριστική αυτή συμπεριφορά που παρουσιάζουν οφείλεται στην εσωτερική τους δομή. Αντί σφαιρικού σχήματος, τα άτομα που αποτελούν αυτά τα υλικά μοιάζουν περισσότερο σε δίπολα με ελλειπτική μορφή. Όταν το υλικό υποβληθεί σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H , προκαλείται μια αναδιάταξη των δίπολων αυτών εξαιτίας της εσωτερικής μαγνήτισης που δημιουργείται. Η αναδιάταξη αυτή προκαλεί επιμηκύνσεις και συστολές στην κρυσταλλική δομή του οι οποίες σε μακροσκοπικό επίπεδο μεταφράζονται σε παραμόρφωση του σχήματος του υλικού. Διάφορες μορφές αναδιάταξης που προκαλούνται σε μαγνητοελαστικά υλικά φαίνονται στο Σχήμα 2.1.1. Ο όρος λ_s αφορά την μετρούμενη για ένα υλικό μαγνητοελαστικότητα όταν αυτό βρίσκεται σε μαγνήτιση που έχει φτάσει κορεσμό, ενώ ο όρος λ_{xyz} αφορά την μετρούμενη μαγνητοελαστικότητα ενός υλικού που καθορίζεται από την αλλαγή των διαστάσεων σε κάθε έναν από τους άξονες x, y, z .

Σχήμα 2.1.1: Αλλαγές στις διαστάσεις σε μαγνητοελαστικά υλικά λόγω εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. (α) Από την κανονική τους θέση όταν $H = 0$ (αριστερά), στην περιστροφή τους όταν $H \neq 0$, (β) Υλικό με δίπολα με τυχαίο προσανατολισμό (αριστερά), και αναδιάταξη αυτών όταν $H \neq 0$



Σημείωση: Από “Sensors and Energy Harvesters Utilizing the Magnetoelastic Principle: Review of Characteristic Applications and Patents” του D. G. Dimogianopoulos, Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering © 2012 Bentham Science Publishers

Σε αυτά τα υλικά παρατηρείται μια σύνδεση λοιπόν μεταξύ της εσωτερικής μαγνητικής τους κατάστασης και της μηχανικής παραμόρφωσης που παρατηρείται ως αποτέλεσμα της αλλαγής διαστάσεων. Αυτή η σύνδεση των μηχανικών ιδιοτήτων και της εσωτερικής μαγνητικής κατάστασης των υλικών αυτών τους έχει προσδώσει την ονομασία μαγνητοελαστικά και εξαιτίας της βρίσκουν εφαρμογή σε μια πληθώρα διατάξεων για την ανέπαφη ανίχνευση και μέτρηση της μεταβολής διάφορων ποσοτήτων (θερμοκρασία, τοξικές χημικές ουσίες κλπ.) όπως επίσης και για συλλογή ενέργειας από την εκμετάλλευση της κίνησης που παράγεται από κραδασμούς.

Από αυτήν την σύνδεση συμβαίνουν διάφορα φαινόμενα σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο. Το φαινόμενο Joule αντιστοιχεί στην αλλαγή διάστασης κατά μήκος ενός μαγνητοελαστικού και σε μικρές αλλαγές στο εγκάρσιο μήκος και στον όγκο του, εξαιτίας ενός εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Το αντίθετο φαινόμενο παίρνει την ονομασία Villari, και αφορά τις αλλαγές της εσωτερικής μαγνήτισης που προκαλούνται από την εφαρμογή μηχανικών καταπονήσεων πάνω στο υλικό. Το φαινόμενο Wiedemann, που αντιστοιχεί στην στρέψη ενός μαγνητοελαστικού που προκύπτει από την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου ελικοειδούς σχήματος, το οποίο προκαλείται όταν ρεύμα διαπερνά το μαγνητοελαστικό υλικό. Οι αλλαγές που προκαλούνται στην μαγνήτιση του υλικού από την στρέψη του, μπορούν μαθηματικά να συσχετιστούν με την εξωτερική ροπή που παρουσιάζεται. Και αυτό το φαινόμενο έχει το αντίστοιχο ανάστροφο του, που ονομάζεται φαινόμενο Matteucci, και αναφέρεται στην στρέψη ενός μαγνητοελαστικού υλικού και στην μέτρηση του ρεύματος που προκύπτει από αυτήν. Σε μικροσκοπικό επίπεδο η εναλλαγή της εφαρμοζόμενης μαγνήτισης προκαλεί μεταβολές στις ελαστικές ιδιότητες των μαγνητοελαστικών υλικών. Για παράδειγμα

στο μέτρο ελαστικότητας Young των υλικών αυτών, έχουν παρατηρηθεί αλλαγές που σχετίζονται με την εσωτερική μαγνητική κατάσταση τους. Σε αντιπαράβολή, αλλαγές στις μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται αυτά τα υλικά έχουν συνδεθεί με αλλαγές στην μαγνητική τους διαπερατότητα.

Οι δυο εξισώσεις που περιγράφουν αυτήν την σύνδεση μεταξύ μηχανικής και μαγνητικής κατάστασης δίνονται παρακάτω. Αυτές περιλαμβάνουν τις μηχανικές παραμέτρους (μηχανική παραμόρφωση ε , μηχανική τάση σ , μέτρο ελαστικότητας Young υπό σταθερό μαγνητικό πεδίο E_y^H) τις μαγνητικές (εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο H , μαγνητική επαγωγή B , μαγνητική διαπερατότητα υπό σταθερή τάση μ^σ) και τις δύο σταθερές d και d^* . Οι δύο σταθερές $d^* = \left. \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right|_H$ και $d = \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right|_\sigma$ συνδέουν την μηχανική παραμόρφωση με το μαγνητικό πεδίο και την μηχανική τάση με την μαγνητική επαγωγή αντίστοιχα.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_y^H} + d \cdot H \quad (2.1)$$

$$B = d^* \cdot \sigma + \mu^\sigma \cdot H \quad (2.2)$$

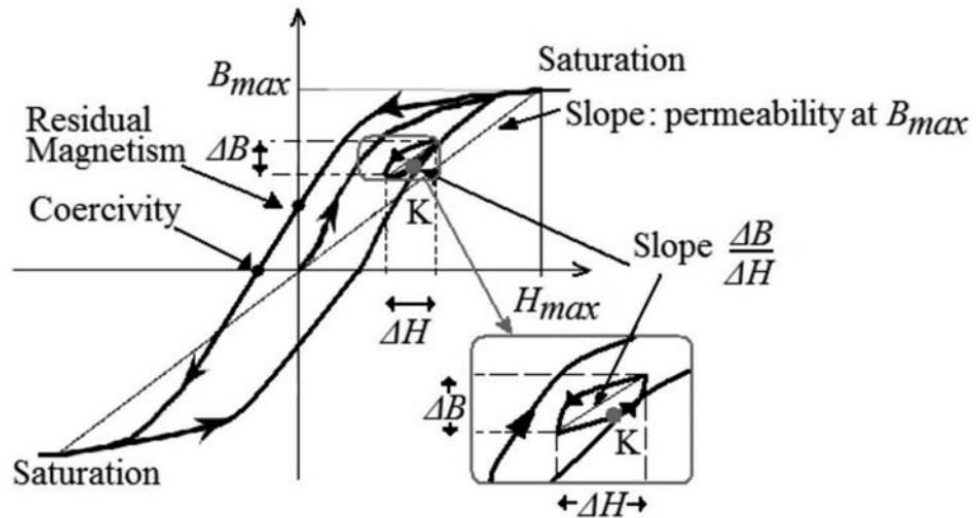
Είναι φανερό μέσω των εξισώσεων πως τα μεγέθη ε και B εξαρτώνται από το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου H και της μηχανικής παραμόρφωσης σ .

Από την εξίσωση 2.2 επίσης διαπιστώνεται πως εφαρμογή εξωτερικής μηχανικής τάσης συνεπάγεται αλλαγή στην μαγνητική επαγωγή. Η συνηθέστερη, πιο γενική μορφή της εξίσωσης περιέχει τον όρο μ , ο οποίος αντιστοιχεί στην μαγνητική διαπερατότητα (permeability):

$$B = \mu \cdot H \quad (2.3)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα στα μαγνητοελαστικά υλικά βασίζεται στις συνθήκες φόρτισης και στις συνθήκες περιβάλλοντος. Κατά συνέπεια η σχέση μεταξύ B και H δεν είναι γραμμική. Αυτό παρατηρείται και από την εξίσωση 2.2, στην οποία η μαγνητική επαγωγή εξαρτάται από τους όρους d^* και μ^σ , οι οποίοι μεταβάλλονται αναφορικά με το σημείο λειτουργίας. Η τυπική καμπύλη B - H για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.1.2, παρουσιάζει βρόγχους υστέρησης και μη-γραμμικά φαινόμενα.

Σχήμα 2.1.2: Μια τυπική καμπύλη B-H, για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό



Σημείωση: Από “Sensors and Energy Harvesters Utilizing the Magnetoelastic Principle: Review of Characteristic Applications and Patents” του D. G. Dimogianopoulos, Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering © 2012 Bentham Science Publishers

Από όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, αυτά που είναι πιο κατάλληλα για αυτές τις εφαρμογές είναι τα άμορφα κράματα (amorphous alloys) ή αλλιώς μεταλλικοί ύαλοι (metallic glasses), εξαιτίας ενός συνδυασμού εξαιρετικών μηχανικών και μαγνητικών ιδιοτήτων και του σχετικά χαμηλού τους κόστους. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτήν την κατηγορία υλικών έναντι αυτών που χρησιμοποιούν άλλα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι η συντριπτική πλειοψηφία, γεγονός που επιβεβαιώνεται στην προαναφερόμενη μελέτη.

Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από μια σχετική μαγνητική διαπερατότητα, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτήν που έχει παρατηρηθεί σε άλλους σιδηρομαγνήτες, το οποίο τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές στις οποίες είναι σημαντική η ευαισθησία στα ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Επίσης παρουσιάζουν χαμηλή δύναμη συνεκτικού πεδίου (coercivity), η οποία εκφράζει την ικανότητα ενός σιδηρομαγνήτη να αντέχει σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο χωρίς να απομαγνητίζεται. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δεν απαιτείται ισχυρό μαγνητικό πεδίο για να επιτευχθεί η μαγνήτιση του υλικού, και οι απώλειες που υπάρχουν λόγω υστέρησης είναι μικρές όπως επιβεβαιώνεται και από την καμπύλη στο Σχήμα 2.1.2. Παρουσιάζουν υψηλή ηλεκτρική αντίσταση που μειώνει τις απώλειες που προκύπτουν από δινορεύματα. Ορισμένα από αυτά τα κράματα παρουσιάζουν και θερμοκρασίες Curie που κυμαίνονται μεταξύ 350 – 550° που είναι αρκετά παραπάνω από το όριο για τυπικές εφαρμογές ανίχνευσης δονήσεων.

Όσον αφορά τις μηχανικές τους ιδιότητες αυτά τα υλικά παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε εφελκυστικές τάσεις, ελαστικό όριο και μέτρο ελαστικότητας Young, γεγονός που αποδεικνύει ότι μπορούν να αντέξουν μεγάλες τάσεις και παραμορφώσεις χωρίς να υποστούν πλαστικές

παραμορφώσεις. Επιπλέον έχουν υψηλά όρια κόπωσης σε κάμψη, τα οποία είναι ενδεικτικά για την αντοχή και την ανθεκτικότητα που παρουσιάζουν. Ορισμένα κράματα με βάση τον σίδηρο τα οποία έχουν υποστεί την μεταλλουργική διαδικασία της ανόπτησης, έχουν μαγνητοελαστική σταθερά έως και 0.95. Αυτή η σταθερά εκφράζει την ικανότητα ενός μαγνητοελαστικού υλικού να μετατρέψει μαγνητική ενέργεια σε μηχανική και το αντίστροφο. Οπότε αυτά τα υλικά έχουν μεγάλη αποδοτικότητα για τις εφαρμογές που εκμεταλλεύονται αυτήν την σύνδεση μεταξύ των μηχανικών και των μαγνητικών τους ιδιοτήτων.

Αλλαγές στην μαγνητική διαπερατότητα μπορούν να μετρηθούν καθώς οι δύο ποσότητες B και H μπορούν να συνδεθούν με μετρούμενες ηλεκτρικές ποσότητες με την χρήση των νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού. Με βάση αυτές τις αλλαγές αλλά και τους μηχανισμούς των εξισώσεων 2.1 - 2.3 η αρχή λειτουργίας μιας ευρεία χρησιμοποιούμενης διάταξης ανίχνευσης περιγράφεται παρακάτω:

Ένα μαγνητοελαστικό στοιχείο τοποθετείται στο εσωτερικό ενός πηνίου διέγερσης (interrogation/excitation coil) το οποίο τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται επαρκής μαγνήτιση του μαγνητοελαστικού στοιχείου. Στο στοιχείο δημιουργούνται μηχανική παραμόρφωση και μαγνητική επαγωγή σύμφωνα με τις σχέσεις 2.1 και 2.2. Τότε σύμφωνα με τον Νόμο Faraday – Lenz δημιουργείται μια τάση στα τυλίγματα ενός άλλου πηνίου (που ονομάζεται πηνίο ανίχνευσης ή δευτερεύον πηνίο), που οφείλεται στην μαγνητική επαγωγή. Εξαρτάται λοιπόν άμεσα από το μέγεθος αυτής η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την τιμή που λαμβάνει η μαγνητική διαπερατότητα. Η μαγνητική διαπερατότητα εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες φόρτισης στις οποίες υποβάλλεται το στοιχείο, στο μέτρο ελαστικότητας Young που αυτό παρουσιάζει, στην θερμοκρασία και σε άλλους παράγοντες. Όταν λοιπόν οι παράγοντες αυτοί είναι γνωστοί εκτός από την ποσότητα η οποία τίθεται προς μέτρηση, η εκτίμηση αυτής της ποσότητας προκύπτει από την ανάλυση των χαρακτηριστικών της τάσης που προκλήθηκε στα τυλίγματα του πηνίου.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι δεν είναι απαραίτητη η χρήση πηνίου για να προκληθεί διέγερση στο μαγνητοελαστικό στοιχείο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση του στοιχείου πάνω σε μια κατασκευή η οποία υποβάλλεται σε δονήσεις και να δέχεται παθητικά τις παραμορφώσεις που δημιουργούνται σε αυτήν. Επακόλουθη είναι η δημιουργία της μαγνητικής επαγωγής, όπως φαίνεται από την εξίσωση 2.2, και μετασχηματίζεται σε τάση με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτή η τάση μπορεί να βρει χρήση σε εφαρμογές συλλογής ενέργειας που βασίζουν την λειτουργία τους σε μαγνητοελαστικά υλικά.

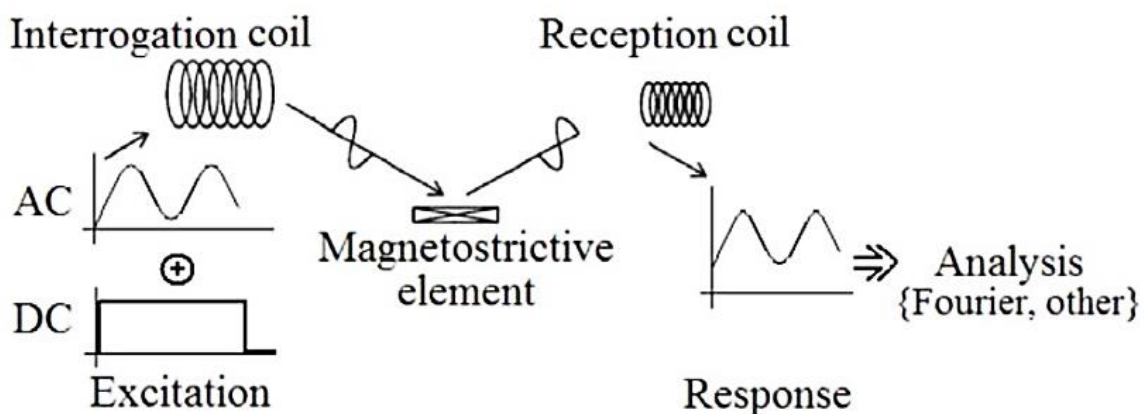
2.1.1 Διατάξεις με φιλμ μαγνητοελαστικών

Οι διατάξεις που λειτουργούν με την χρήση μαγνητοελαστικών φιλμ χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο διέγερσης που χρησιμοποιούν.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιείται η τεχνική της ενεργητικής διάταξης (Σχήμα 2.1.3), που για την διέγερση του μαγνητοελαστικού στοιχείου χρησιμοποιείται ένα πηνίο διέγερσης. Αυτό το πηνίο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα (ή τριγωνικούς

παλμούς) και παράγει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό ως αποτέλεσμα, δημιουργεί στο μαγνητοελαστικό φιλμ αλλαγές στην διαστάσεις του. Θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις δημιουργούνται πάνω σε αυτό, το οποίο είναι σταθερά τοποθετημένο στις δύο του άκρες και ξεκινά να δονείται. Η συχνότητα αυτής της δόνησης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της διέγερσης του πηνίου. Αυτή η εναλλαγή θλιπτικών και εφελκυστικών φαινομένων δημιουργεί εναλλασσόμενη μαγνήτιση στο μαγνητοελαστικό φιλμ και κατά συνέπεια δημιουργείται μαγνητική ροή στα τυλίγματα του πηνίου ανίχνευσης το οποίο είναι τοποθετημένο κοντά στο μαγνητοελαστικό. Αυτός ο τρόπος απαιτεί και την υπέρθεση του εναλλασσόμενου ρεύματος σε ένα μεγαλύτερο συνεχές ρεύμα το οποίο έχει ως σκοπό την μαγνητική πόλωση του στοιχείου, για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου ΔΕ.

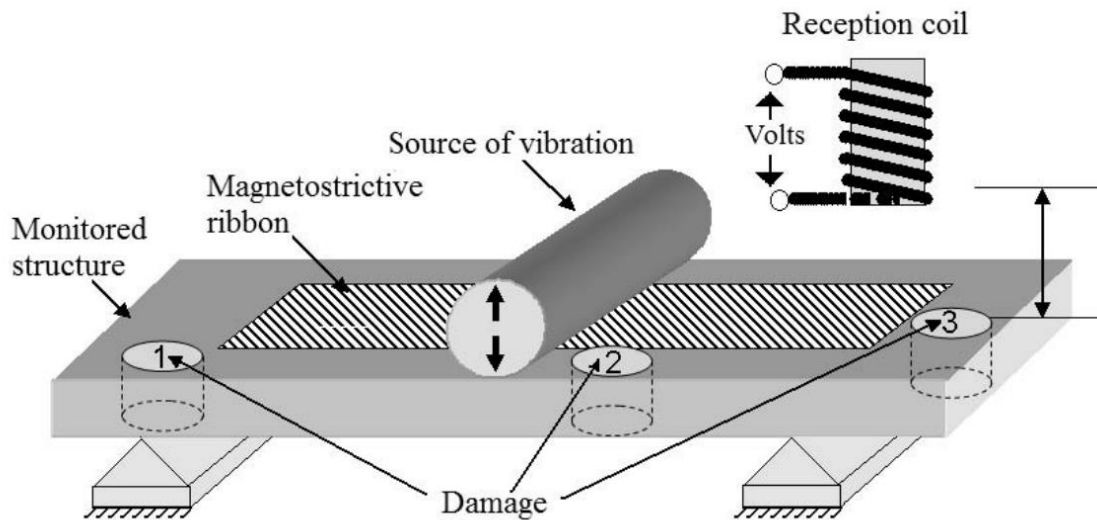
Σχήμα 2.1.3: Η διάταξη στην οποία το στοιχείο διεγείρεται με την χρήση πηνίου διέγερσης



Σημείωση: Από “Sensors and Energy Harvesters Utilizing the Magnetoelastic Principle: Review of Characteristic Applications and Patents” του D. G. Dimogianopoulos, Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering © 2012 Bentham Science Publishers

Η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ της διάταξης με ενεργή διέγερση με αυτήν που χρησιμοποιεί την παθητική διέγερση (Σχήμα 2.1.4), είναι η απουσία του πηνίου διέγερσης. Τα μηχανικά φαινόμενα τάσης και θλίψης στο υλικό, οφείλονται στην διέγερση μέσω δόνησης του μέσου πάνω στο οποίο στηρίζεται το μαγνητοελαστικό υλικό. Όπως και στην περίπτωση της ενεργής διέγερσης, τα ηλεκτρεγερτικά σήματα που προκύπτουν από τις αλλαγές της εσωτερικής μαγνήτισης του υλικού ανιχνεύονται μέσω του πηνίου ανίχνευσης. Στην παθητική διάταξη όμως τα σήματα που παράγονται είναι πιο αδύναμα και περιέχουν περισσότερο παρασιτικό θόρυβο. Παρά το μειονέκτημα αυτό, οι παθητικές διατάξεις πλεονεκτούν στο ότι είναι πιο απλές στην υλοποίηση και συνήθως είναι πιο χαμηλού κόστους, ενώ με την χρήση τεχνικών επεξεργασίας σήματος και το κατάλληλο φιλτράρισμα στα παραγόμενα σήματα, μπορούν να πετύχουν ικανοποιητικές αποδόσεις.

Σχήμα 2.1.4: Διάταξη που χρησιμοποιεί την παθητική διέγερση



Σημείωση: Από “Sensors and Energy Harvesters Utilizing the Magnetoelastic Principle: Review of Characteristic Applications and Patents” του D. G. Dimogianopoulos, Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering © 2012 Bentham Science Publishers

Για να ληφθούν τα κατάλληλα αποτελέσματα, ο τρόπος ανάλυσης των αποτελεσμάτων διαφέρει μεταξύ των δύο τύπων διάταξης. Στην διάταξη που χρησιμοποιεί πηνίο διέγερσης, η μαγνητοελαστική ταινία διεγείρεται στην συχνότητα συντονισμού της με την χρήση του πηνίου, η οποία εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες, την κατανομή μάζας και την γεωμετρία της. Όταν επιτευχθεί η συχνότητα συντονισμού, το πλάτος των ταλαντώσεων είναι το μεγαλύτερο. Σε αυτό το σημείο λαμβάνεται το σήμα της τάσης που προκλήθηκε στο πηνίο ανίχνευσης. Οποιαδήποτε μετατόπιση της συχνότητας συντονισμού που οφείλεται στην μεταβολή ενός παράγοντα όταν οι υπόλοιποι παραμένουν σταθεροί, γίνεται αντιληπτή από το αντίστοιχα διαφορετικό προφίλ ηλεκτρικού σήματος. Από την άλλη στην περίπτωση της χρήσης της παθητικής διάταξης (χωρίς πηνίο διέγερσης), λαμβάνεται το ηλεκτρικό σήμα στα τυλίγματα του πηνίου. Αφού υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία για να αναδειχθεί το περιεχόμενο του στην συχνότητα, αναλύεται με σκοπό να ανιχνευθούν οποιεσδήποτε μετατοπίσεις στην συχνότητα ή αλλαγές στα φασματικά χαρακτηριστικά του σήματος. Αυτές, όπως και στην περίπτωση της ενεργητικής διάταξης, συσχετίζονται με την αλλαγή ενός συγκεκριμένου παράγοντα, ενώ οι υπόλοιποι παραμένουν σταθεροί, για την ποσοτικοποίηση της αλλαγής του παράγοντα που διερευνάται.

2.2 Η πειραματική διάταξη

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της ευαισθησίας του αισθητηρίου, χρησιμοποιείται μια ήδη υπάρχουσα διάταξη η οποία έχει προκύψει ύστερα από προηγούμενες μελέτες και έχει βελτιστοποιηθεί με γνώμονα την ευαισθησία ανίχνευσης και την συνέπεια των καταγραφών που λαμβάνονται από αυτήν (Σουλτάνα, 2022).

Η πειραματική διάταξη χωρίζεται στα παρακάτω επιμέρους στοιχεία:

- Μία παλμογεννήτρια τύπου SIGLENT-SDG5122 που παράγει τις κυματομορφές που παρέχονται στον διεγέρτη.
- Ένας Διεγέρτης SMARTSHAKER™ K2004E01. Πρόκειται για ένα μικρό φορητό μοντέλο μικρού διεγέρτη που διαθέτει ενσωματωμένο ενισχυτή ο οποίος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές Δονητικών Ελέγχων.
- Μια δοκό πακτωμένη από την μία πλευρά η οποία αποτελείται από δύο ξεχωριστά τμήματα τα οποία έχουν δημιουργηθεί με διαδικασία 3D εκτύπωσης FDM από υλικό Prusament PETG (Πολυαιθυλένιο τερεφθαλική γλυκόλη) τα οποία έχουν κολληθεί με κυανοακρυλική κόλλα (κόλλα στιγμής) και φαίνεται στο Σχήμα 2.2.1 παρακάτω.
- Ένα λεπτό φιλμ μαγνητοελαστικού υλικού 2826MB MetGlass® που είναι το βασικό στοιχείο της υποδιάταξης του αισθητηρίου
- Ένα συμβατικό πηνίο χαμηλού κόστους, που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ασύρματης φόρτισης, στην συγκεκριμένη διάταξη αποτελεί μέρος της υποδιάταξης του αισθητηρίου και χρησιμοποιείται ως πηνίο ανίχνευσης, όπως αυτό περιγράφεται στην σχετική ενότητα
- Ο ψηφιακός παλμογράφος τύπου GDS-2102AGW της INSTEK για την καταγραφή και την λήψη των σημάτων στα οποία πρέπει να γίνει η επεξεργασία

Σχήμα 2.2.1: Η δοκός που χρησιμοποιείται στην διάταξη με το μαγνητοελαστικό φιλμ στο ένα άκρο

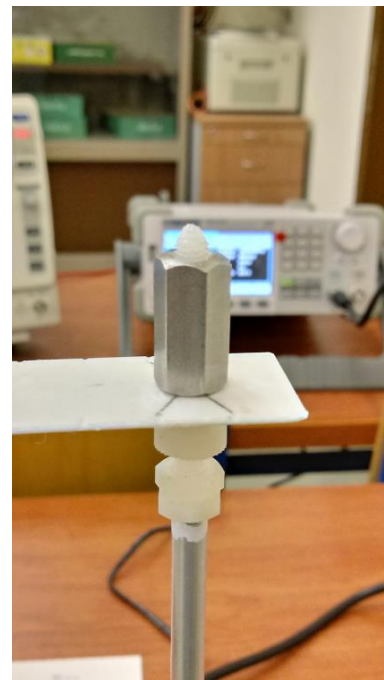


Σημείωση: Από “Ανίχνευση μεταβολής δομικών χαρακτηριστικών δοκού με τη χρήση αλγοριθμικών μη-καταστροφικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών επί πειραματικών δεδομένων από αισθητήρια μη-επαφής” του Ρομπερτ Γ. Σουλτάνα, Διπλωματική Διατριβή. Copyright Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής 2022

Σχήμα 2.2.2: (α) Ο διεγέρτης SMARTSHAKER™ K2004E01 (β) Το κεντρί του διεγέρτη πάνω στο οποίο συνδέεται δοκός



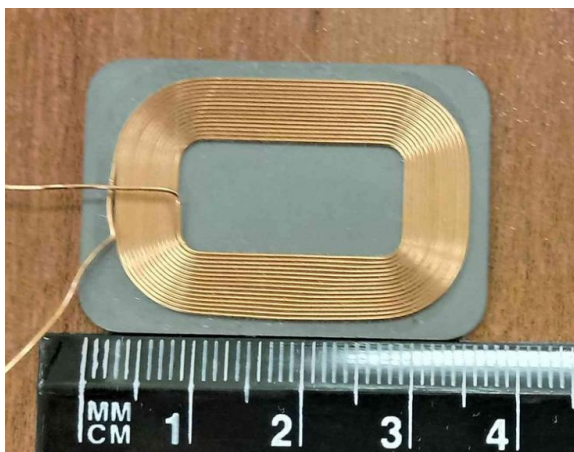
(α)



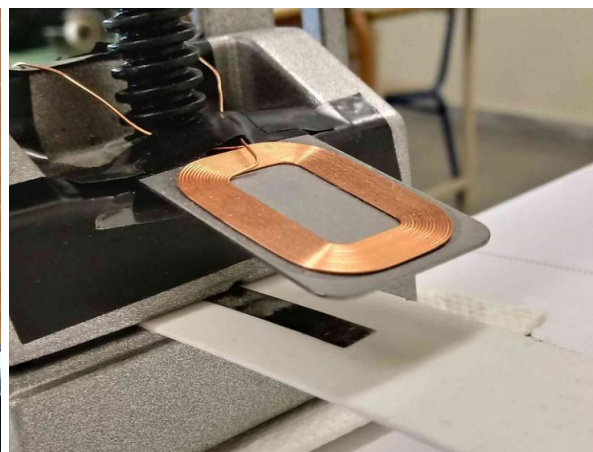
(β)

Σημείωση: Από “Ανίχνευση μεταβολής δομικών χαρακτηριστικών δοκού με τη χρήση αλγοριθμικών μη-καταστροφικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών επί πειραματικών δεδομένων από αισθητήρια μη-επαφής” του Ρομπερτ Γ. Σουλτάνα, Διπλωματική Διατριβή. Copyright Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής 2022

Σχήμα 2.2.3: (α) Το πηνίο μέτρησης της μαγνητικής ροής, (β) Η υποδιάταξη του αισθητηρίου (ζεύγος μαγνητοελαστικού – πηνίου ανίχνευσης)



(α)



(β)

Σημείωση: Από “Ανίχνευση μεταβολής δομικών χαρακτηριστικών δοκού με τη χρήση αλγοριθμικών μη-καταστροφικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών επί πειραματικών δεδομένων από αισθητήρια μη-επαφής” του Ρομπερτ Γ. Σουλτάνα, Διπλωματική Διατριβή. Copyright Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής 2022

Σχήμα 2.2.4: Η πειραματική διάταξη



Σημείωση: Από “Ανίχνευση μεταβολής δομικών χαρακτηριστικών δοκού με τη χρήση αλγοριθμικών μη-καταστροφικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών επί πειραματικών δεδομένων από αισθητήρια μη-επαφής” του Ρομπερτ Γ. Σουλτάνα, Διπλωματική Διατριβή. Copyright Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής 2022

(Dimogianopoulos & Mouzakis, 2021): Η παλμογεννήτρια (Σχήμα 2.2.4, δεξιά πάνω) παράγει κυματομορφή με επιλεγμένα χαρακτηριστικά πλάτους, συχνότητας και μορφής των παλμών. Γίνεται επιλογή τριγωνικής μορφής, γιατί έπειτα από διερεύνηση έχει βρεθεί ότι τα προφίλ φορτίων που συναντώνται σε πραγματικά σενάρια φόρτισης δεν αντιστοιχούν συχνά σε τετραγωνικούς ή τέλειους ημιτονοειδείς παλμούς, όπως είναι το παράδειγμα της λειτουργίας μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, με μηχανικά μέρη σε κίνηση. Το προφίλ διέγερσης που επιλέγεται δίνεται στον διεγέρτη ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την γεννήτρια και αυτός παράγει μια κίνηση η οποία έχει τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής που επιλέχθηκε. Στην πραγματικότητα υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των χαρακτηριστικών της κυματομορφής και των χαρακτηριστικών της κίνησης που παράγεται από τον διεγέρτη το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω διάφορων περιορισμών της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε κίνηση, όπως για παράδειγμα ο κορεσμός των κυκλωμάτων που δρουν ως ενεργοποιητές.

Η σύνδεση μεταξύ δοκού και διεγέρτη πραγματοποιείται με την χρήση ενός κεντριού (stinger) το οποίο περιορίζει την δοκό στην κίνηση την οποία επιβάλλει σε αυτήν ο διεγέρτης με την χρήση παξιμαδιών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.2.

Κατά την διάρκεια διέγερσης της δοκού με τα χαρακτηριστικά (προφίλ) διέγερσης που έχουν επιλεγθεί, το λεπτό φιλμ μαγνητοελαστικού υλικού 2826MB Metglas® που είναι

τοποθετημένο επάνω στην δοκό δίπλα από το σημείο πάκτωσης δέχεται αυτές δονήσεις και σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην σχετική ενότητα, από τις μηχανικές παραμορφώσεις που δέχεται προκαλούνται αλλαγές στην εσωτερική του μαγνητική κατάσταση.

Το πηνίο βρίσκεται σε απόσταση 5mm πάνω από την ταινία, τοποθετημένη σε μία πλατφόρμα που φτιάχτηκε με τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτή η απόσταση υιοθετήθηκε ύστερα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε προηγούμενη μελέτη (Σουλτάνα, 2022), αφού αρχικά ήταν τοποθετημένο σε απόσταση 20mm όπως σε μελέτες που προηγήθηκαν σε παρόμοιες διατάξεις (Dimogianopoulos & Mouzakis, 2021). Η διάταξη πηνίου – μαγνητοελαστικού (

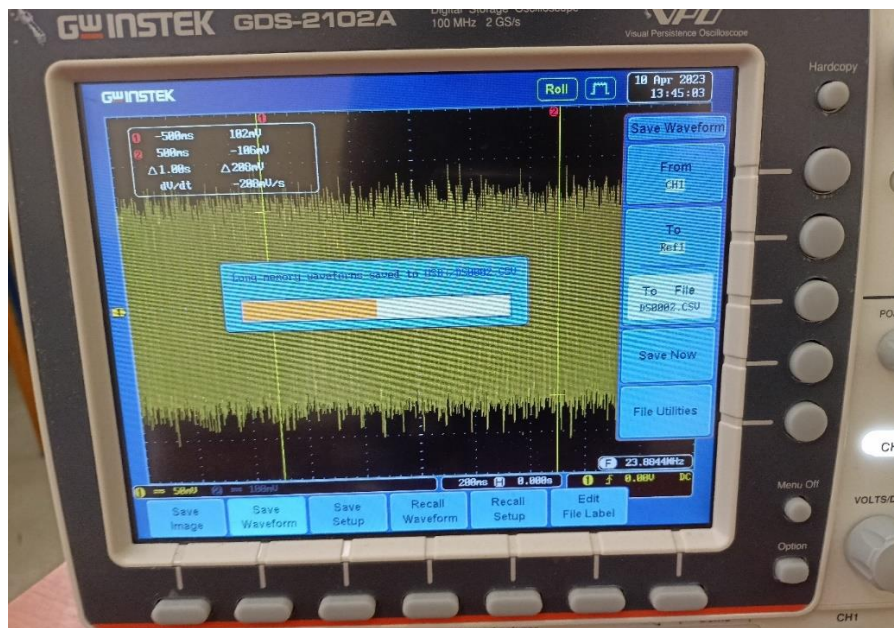
Σχήμα 2.2.2) λειτουργεί εκμεταλλευόμενη αυτήν την εναλλασσόμενη εσωτερική μαγνήτιση η οποία μετατρέπεται σε μαγνητική ροή στα τυλίγματα του πηνίου. Το πηνίο, μετατρέπει αυτήν την μαγνητική ροή σε τάση εξ επαγωγής και η τάση αυτή είναι και το σήμα που λαμβάνεται προς επεξεργασία.

Για την καταγραφή αυτού του σήματος είναι απαραίτητος ο ψηφιακός παλμογράφος (Σχήμα 2.2.4: Η πειραματική διάταξη, αριστερά πάνω) που συνδέεται στα δύο άκρα των τυλιγμάτων του πηνίου καταγράφει και αποθηκεύει το σήμα σε ένα εξωτερικό μέσο αποθήκευσης σε μορφή αρχείου .CSV (Comma Separated Values).

2.3 Καταγραφή και προεργασία σήματος

Το αρχείο που λαμβάνεται από τον παλμογράφο σε μορφή .CSV περιέχει το καταγεγραμμένο για κάθε δεδομένη διέγερση σήμα. Τα σήματα που λήφθηκαν είναι αρχεία της μορφής long memory CSV τα οποία συγκρατούν όλη την πληροφορία της κυματομορφής. Η συχνότητα διέγερσης είναι $f_s = 1$ MHz και τα αρχεία είναι διάρκειας δύο δευτερολέπτων, όσο δηλαδή είναι το οριζόντιο μήκος παραθύρου του παλμογράφου (Κάθε τετράγωνο αντιστοιχεί σε 200 ms όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3.1).

Σχήμα 2.3.1: Λήψη κυματομορφής από τον παλμογράφο με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά



Κάθε μεμονωμένη δοκιμή είχε διάρκεια κοντά στα 8 λεπτά, καθώς η διαδικασία αποθήκευσης της κυματομορφής με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε ένα εξωτερικό μέσο αποθήκευσης ήταν χρονοβόρα. Επίσης τα αρχεία αυτά είχαν μεγάλο μέγεθος με την κάθε δοκιμή να φτάνει σχεδόν τα 50MB.

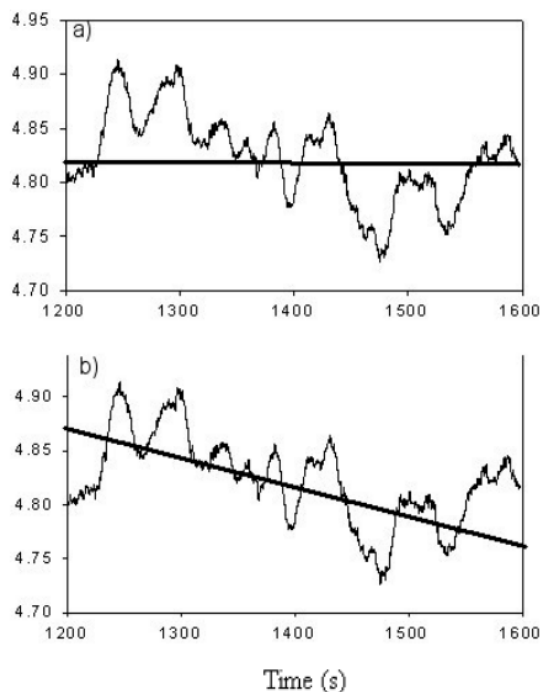
Στην συνέχεια κάθε μέτρηση χωρίστηκε σε δύο ίσα τμήματα με το πρώτο τμήμα της μέτρησης να είναι από το πρώτο μέχρι το εκατομμυριοστό δείγμα και το δεύτερο να είναι από το εκατομμυριοστό πρώτο μέχρι το τελευταίο δείγμα. Οπότε στην θέση των μετρήσεων διάρκειας 2 δευτερολέπτων προέκυψαν μετρήσεις διάρκειας ενός δευτερολέπτου. Τα δεδομένα έχουν την ίδια συχνότητα δειγματοληψίας, οπότε το πλήθος δειγμάτων για κάθε μεμονωμένο τμήμα είναι 1.000.000. Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατός ο έλεγχος των δύο τμημάτων κάθε μέτρησης για φαινόμενα ασυνέχειας, όταν αυτά εξετάστηκαν ως προς το περιεχόμενό τους. Κάτι τέτοιο είναι πιθανό να συμβεί, όπως παρατηρήθηκε και σε προηγούμενα πειράματα πάνω στην διάταξη.

Στα πλαίσια της προεργασίας που έγινε στα σήματα αφαιρέθηκε η μέση τιμή, που είναι από τις πιο απλές τεχνικές αφαιρέσεις τάσεων σε χρονοσειρές. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα αποκτούν μέση τιμή μηδέν, δηλαδή κυμαίνονται γύρω από την αρχή του άξονα. Πολλές φορές χρησιμοποιείται η έννοια των κινητών μέσων, η οποία αναφέρεται στην διαδικασία αφαίρεσης μέσων ανά συγκεκριμένη χρονική περίοδο T , που εξομαλύνει χρονοσειρές δεδομένων, οι οποίες είναι μη-στάσιμες, για την παρατήρηση της κίνησης τους σε βάθος χρόνου (Moncrieff, Clement, Finnigan, & Meyers, 2005).

Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι απαραίτητη μια τέτοια διαδικασία καθώς τα δεδομένα είναι μικρής χρονικής διάρκειας και δεν αλλάζουν χαρακτηριστικά με την πάροδο του χρόνου. Επίσης σκοπός είναι η αντιστάθμιση του φαινομένου DC offset που προκαλεί περιεχόμενο στην συχνότητα με πολύ μεγάλη συνεισφορά πλάτους στην συχνότητα 0 Hz, το οποίο οφείλεται στην τιμή DC, η οποία είναι η μέση τιμή της τάσης του σήματος στον χρόνο. Η μεγάλη συνεισφορά στην συχνότητα σε σύγκριση με την επόμενη μεγαλύτερη κορυφή, από σήματα που δεν έχουν υποστεί αυτή την διεργασία φαίνεται και στο Σχήμα 2.3.3. Ουσιαστικά η μέση τιμή αφαιρείται από όλα τα δείγματα του σήματος. Σύμφωνα με τον τύπο:

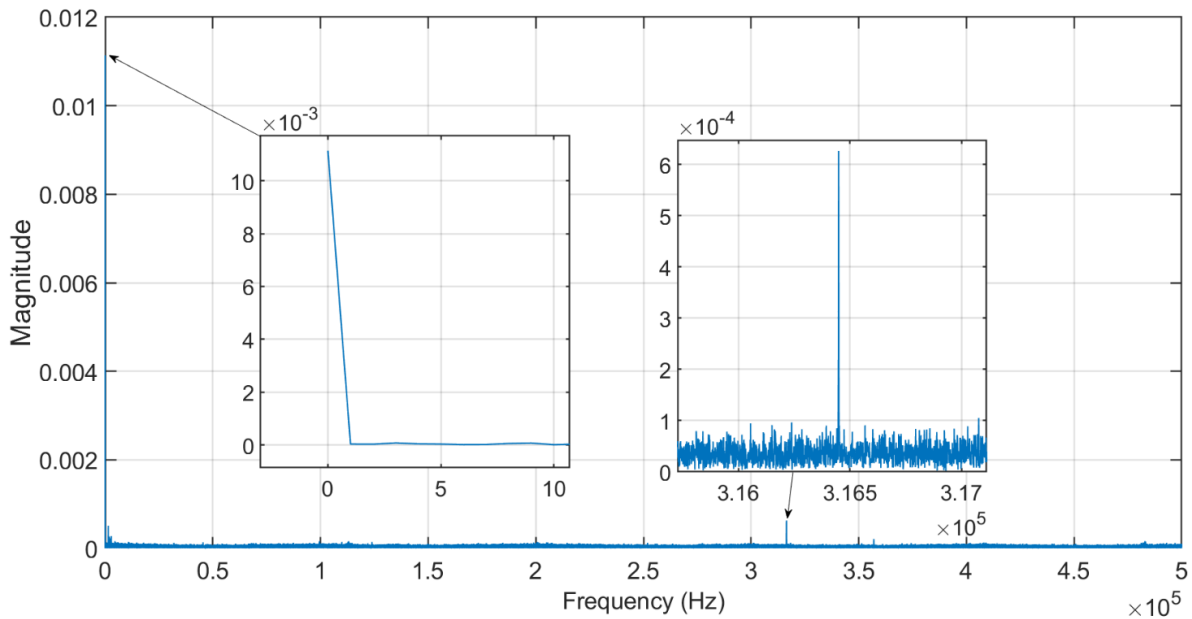
$$x_d(kt) = x(kt) - \bar{x} \quad (2.4)$$

Σχήμα 2.3.2: Παρουσίαση της τεχνικής αφαίρεσης γραμμικών τάσεων από χρονοσειρές με δύο διαφορετικούς αλγόριθμους α) Αφαίρεση μέσης τιμής ανά τεμάχιο δεδομένων(Block Average), β) Αφαίρεση γραμμικών τάσεων (Linear detrending)



Σημείωση: Από “Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series” των Moncrieff, J., Clement, R., Finnigan, J., Meyers, T. Lee, X., Massman, W., Law, B. (eds) Handbook of Micrometeorology. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, vol 29. Springer © 2004 Kluwer Academic Publishers

Σχήμα 2.3.3: Το φαινόμενο DC Offset στην συχνότητα 0 Hz, που προκαλείται από την μέση τιμή των σημάτων στο πεδίο του χρόνου



2.4 Σήμα στο πεδίο της συχνότητας - Μετασχηματισμός Fourier

Ένας από τα πιο σημαντικά βήματα στην ανάλυση των σημάτων που λαμβάνονται, είναι η μελέτη του περιεχόμενου που αυτά παρουσιάζουν στο πεδίο της συχνότητας. Η μεταφορά της πληροφορίας που δίνεται από ένα σήμα στον χρόνο στο ισοδύναμο περιεχόμενο στην συχνότητα είναι δυνατή με την χρήση των μετασχηματισμών Fourier.

Ο μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου αποτελεί την πιο γενική μορφή της Σειράς Fourier, σύμφωνα με την οποία όλα τα περιοδικά σήματα, ανεξάρτητα από την μορφή την οποία έχουν, μπορούν να εκφραστούν ως τριγωνομετρική σειρά άπειρων ημιτονικών σημάτων με μη μηδενικές γωνίες φάσης (Καραϊσκος & Κάντζος, 2015):

$$x(t) = c_0 \cos(\theta_0) + c_1 \cos(2\pi f_0 t + \theta_1) + c_2 \cos(2\pi 2f_0 t + \theta_2) + \dots + c_n \cos(2\pi n f_0 t + \theta_n) + \dots \quad (2.5)$$

Όπου η f_0 είναι η συχνότητα του περιοδικού σήματος και η συχνότητα $n f_0$ είναι η n -οστή αρμονική του σήματος. Τα c_n και θ_n αποτελούν το πλάτος και την φάση αντίστοιχα της αρμονικής αυτής.

Από την σχέση αυτή προκύπτει ότι οποιοδήποτε περιοδικό σήμα μπορεί να είναι το αποτέλεσμα άθροισης άπειρων ημιτονικών όρων με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της

συχνότητας του περιοδικού σήματος τα οποία έχουν το κατάλληλο πλάτος και την κατάλληλη φάση οι οποίες εξαρτώνται από το σήμα $x(t)$. (Καραϊσκος & Κάντζος, 2015)

Αυτή η διαδικασία ανάλυσης σημάτων επεκτάθηκε με τον πιο γενικό μετασχηματισμό Fourier που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του φάσματος ενός πραγματικού μη-περιοδικού σήματος ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$X(f) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.6)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αναφέρονται σε σήματα συνεχούς χρόνου. Τέτοιου είδους σήματα αποτελούνται από άπειρες τιμές ανεξάρτητα από την χρονική τους διάρκεια, επομένως υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθούν σε υπολογιστικά συστήματα. Σε αυτά χρησιμοποιούνται σήματα που αποτελούνται από ένα σύνολο διακριτών τιμών και προκύπτουν από την δειγματοληψία σημάτων συνεχούς χρόνου. (Καραϊσκος & Κάντζος, 2015). Ο αντίστοιχος μετασχηματισμός διακριτού χρόνου του είναι ο Μετασχηματισμός Fourier Διακριτού Χρόνου (Discrete – Time Fourier Transform) ο οποίος εφαρμόζεται σε μη-περιοδικά σήματα του διακριτού χρόνου. Αυτός έχει την μορφή:

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \quad (2.7)$$

Η μεταβλητή Ω είναι η κυκλική συχνότητα για σήματα διακριτού χρόνου που μετρείται σε rad ή rad/δείγμα.

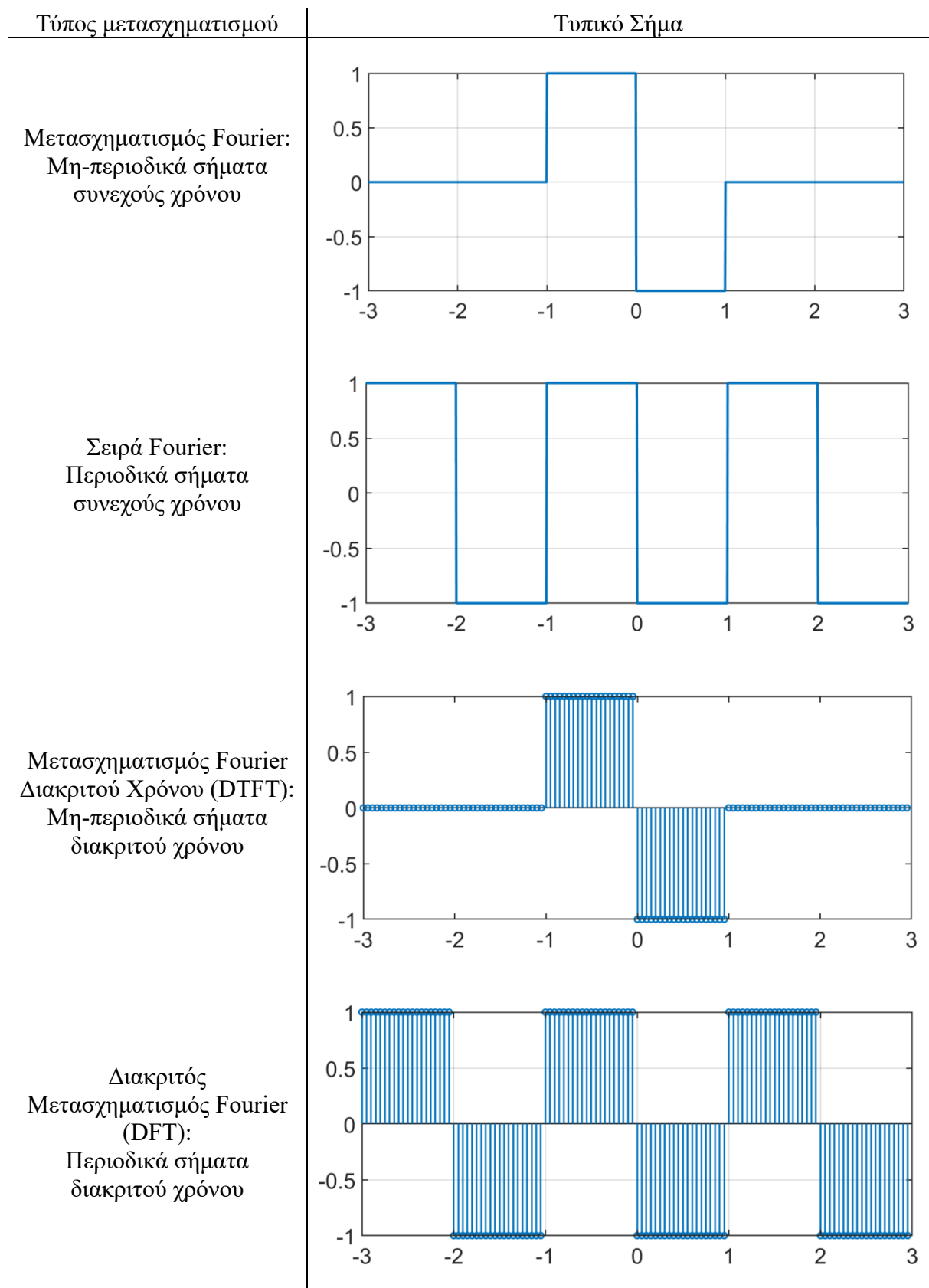
Στα σήματα διακριτού χρόνου τα οποία είναι περιοδικά εφαρμόζεται μια άλλη μορφή του μετασχηματισμού, ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform) ο οποίος περιγράφεται από την σχέση:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{nk}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2.8)$$

Όπου το $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$. Οι διαφορετικοί τύποι του μετασχηματισμού φαίνονται στο Σχήμα 2.4.1, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του σήματος διακριτό/συνεχές στο χρόνο και περιοδικό/μη-περιοδικό (Smith, 1997). Στην εξίσωση 2.8 του DFT, παρατηρείται ότι έχει N όρους υπολογισμού οπότε αποτελεί τον μοναδικό εξ αυτών που αναφέρονται ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί με αριθμητικές μεθόδους, αφού οι υπόλοιποι απαιτούν την χρήση άπειρων τιμών του σήματος $x(t)$ ή του $x[n]$ (για σήματα συνεχούς και διακριτού χρόνου αντίστοιχα).

Αυτό συμβαίνει διότι τα ημίτονα και συνημίτονα που χρησιμοποιούνται για την σύνθεση ορίζονται ως σήματα που εκτείνονται επ' άπειρον προς αρνητικές και θετικές τιμές. Επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευάσουν ένα σήμα πεπερασμένου αριθμού δειγμάτων. Ακόμα και στην περίπτωση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier πρέπει να γίνουν ορισμένες συμβάσεις. Για να είναι εφικτός ο υπολογισμός του για ένα σήμα πεπερασμένου αριθμού δειγμάτων, γίνεται η υπόθεση ότι αυτό είναι περιοδικό και επαναλαμβάνεται με περίοδο N , όπου N είναι το πλήθος δειγμάτων του σήματος. (Smith, 1997).

Σχήμα 2.4.1: Οι 4 διαφορετικοί τύποι του μετασχηματισμού Fourier



Αυτός ο μετασχηματισμός έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι για N που είναι δυνάμεις του δύο μπορεί να υπολογιστεί με τον γρήγορο αλγόριθμο διακριτού μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform) ο οποίος είναι πολύ πιο αποδοτικός από τον απλό DFT, καθώς μειώνει τους απαιτούμενους υπολογισμούς σε πολύ μεγάλο ποσοστό. Για τον υπολογισμό του απλού DFT απαιτούνται $2N^2$ ξεχωριστοί υπολογισμοί ενώ για τον FFT ο αριθμός αυτός ισούται με $N \log_2 N$. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα του δεύτερου δεν είναι απλά ότι είναι μικρότερη σε αριθμό, αλλά αυξάνεται με πολύ πιο αργό ρυθμό για μεγάλες τιμές του N (Smith, 1997).

Ύστερα από τον υπολογισμό του μετασχηματισμού για ένα πραγματικό σήμα, το επόμενο βήμα αποτελεί η απεικόνιση των αποτελεσμάτων με έναν τρόπο που να δίνει την απαραίτητη πληροφορία. Οι τιμές του $X[k]$ είναι μιγαδικοί αριθμοί οι οποίοι έχουν την μορφή $z = \alpha + j\beta$ με το α να είναι το πραγματικό μέρος τους και το β να είναι το φανταστικό. Οι μιγαδικοί αριθμοί μπορούν επίσης να παρασταθούν σε πολική μορφή $z = r \cos \theta + j r \sin \theta$ και από τις τριγωνομετρικές ιδιότητες είναι γνωστό ότι $\cos \theta + j \sin \theta = e^{j\theta}$ οπότε μπορεί να γραφτεί και με την μορφή $z = r e^{j\theta}$. Το r ονομάζεται μέτρο του μιγαδικού αριθμού και συμβολίζεται με $|z|$ και προκύπτει από την σχέση $|z| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ ενώ το θ αποτελεί το όρισμα του και συμβολίζεται με $\text{Arg}(z)$ και υπολογίζεται από την σχέση $\text{Arg}(z) = \theta = \tan^{-1}(\beta/\alpha)$.

Σε αυτές τις δύο ποσότητες βασίζεται και η ερμηνεία των τιμών του μετασχηματισμού Fourier. Από τις μιγαδικές τιμές που προκύπτουν ως αποτέλεσμα του μετασχηματισμού γίνεται η μετατροπή τους σε πολική μορφή για να ληφθούν τα φάσματα πλάτους και φάσης. Η γραφική παράσταση του μέτρου του μετασχηματισμού αποτελεί το φάσμα πλάτους του σήματος στην συχνότητα, ενώ η γραφική παράσταση της φάσης αποτελεί το φάσμα φάσης του. (Καραϊσκος & Κάντζος, 2015)

Με την χρήση αυτών των δύο συναρτήσεων της συχνότητας, ένα σήμα μπορεί να αναλυθεί ως προς τα φασματικά του χαρακτηριστικά. Έτσι μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ διαφορετικών σημάτων αξιοποιώντας τις ποιοτικές διαφορές που παρουσιάζουν τα φάσματα τους.

Το φάσμα πλάτους είναι αυτό που χρησιμοποιείται κυρίως για την απεικόνιση του περιεχομένου του σήματος στην συχνότητα καθώς δείχνει το μέγεθος της συνεισφοράς της κάθε συχνότητας στο σήμα το οποίο είναι και το ζητούμενο σε αρκετές εφαρμογές επεξεργασίας σημάτων. Προφανώς και η φάση περιέχει σημαντική πληροφορία και είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις που απαιτείται ανακατασκευή ενός σήματος στο χρόνο από το περιεχόμενο του στην συχνότητα.

Η ανεξάρτητη μεταβλητή στο πεδίο της συχνότητας μπορεί να είναι η συχνότητα f σε Hz από 0 έως $f_s/2$, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η γωνιακή συχνότητα ω (rad/sec), από 0 έως π . Η μέγιστη συχνότητα στην οποία μπορεί να παρατηρηθεί περιεχόμενο έχει να κάνει με την συχνότητα δειγματοληψίας. Σύμφωνα με το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist, αυτή δεν

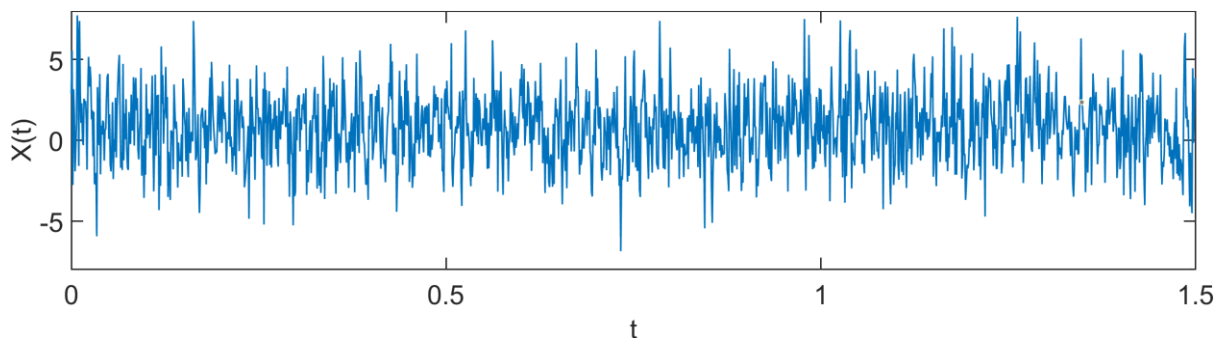
ξεπερνάει το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας όπως δίνεται από την σχέση $f_s \geq 2f_{max}$. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν οι αριθμοί των δειγμάτων από 0 έως $N/2$ η και ως κλάσμα της περιόδου δειγματοληψίας με τις τιμές του φάσματος να είναι στο εύρος 0 έως 0.5, για να εντυπωθεί το γεγονός πως στα πραγματικά σήματα περιεχόμενο παρουσιάζεται μέχρι το $\frac{1}{2}$ της συχνότητας δειγματοληψίας. (Smith, 1997)

Η ανάλυση των φασματικών χαρακτηριστικών των σημάτων γίνεται πολλές φορές εξαιτίας της ικανότητας του πεδίου συχνότητας να διαχωρίζει τα σήματα από τον θόρυβο που τα καλύπτει στο πεδίο του χρόνου. Για παράδειγμα στο επόμενο σχήμα διακρίνεται ένα σήμα που δημιουργήθηκε στο MATLAB® το οποίο αποτελείται από δύο ημιτονοειδή σήματα στα οποία έχει προστεθεί μια ακολουθία τυχαίου θορύβου και μία σταθερή τιμή (D.C.), σύμφωνα με τον τύπο:

$$x[n] = 0.8 + 0.7 \cdot \sin(2\pi 50n) + \cos(2\pi 80n) + 2 \cdot \text{RandomNoise}(\text{size}(n)) \quad (2.9)$$

Λήφθηκαν δείγματα με συχνότητα $f_s = 1000$ Hz διάρκειας 1.5 δευτερολέπτου. Από το διάγραμμα του σήματος (Σχήμα 2.4.2) στο πεδίο του χρόνου δεν υπάρχει δυνατότητα να διακριθούν τα στοιχεία που το αποτελούν.

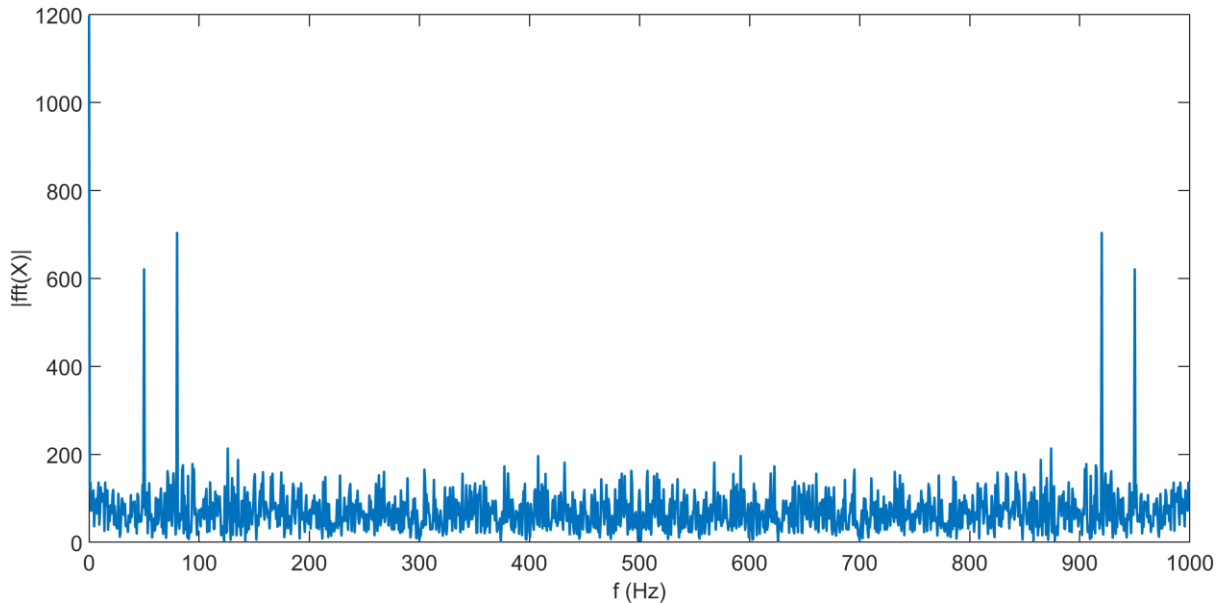
Σχήμα 2.4.2: Διάγραμμα του σήματος $x(t)$ στο πεδίο του χρόνου



Υπολογίζεται μέσω του αλγόριθμου FFT του MATLAB® τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού Fourier για το συγκεκριμένο σήμα και παρουσιάζεται το φάσμα μέτρων του μετασχηματισμού (Σχήμα 2.4.3). Παρατηρούνται κορυφές στις εξής τιμές στην συχνότητα 0 Hz, 50Hz, 80Hz, 920Hz, 980Hz. Η κορυφή στα 0 Hz είναι το περιεχόμενο που οφείλεται στην σταθερή τιμή (DC Component). Οι δύο κορυφές στα 50 και 80 Hz είναι οι κορυφές που οφείλονται στα ημιτονοειδή μέρη του σήματος που κατασκευάστηκε. Όπως προαναφέρθηκε η μέγιστη συχνότητα που είναι δυνατόν να παρατηρηθεί περιεχόμενο είναι η μισή της συχνότητας δειγματοληψίας. Επομένως για $f_s = 1000$ Hz η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να παρατηρηθεί περιεχόμενο είναι τα 500 Hz. Οι συχνότητες που ακολουθούν μετά από αυτήν την τιμή ουσιαστικά είναι οι συζυγείς αρνητικές συχνότητες του μετασχηματισμού και οι κορυφές που βρίσκονται στις τιμές 920 και 980, είναι ουσιαστικά αυτές που οφείλονται στα ημιτονοειδή μέρη του σήματος απλά στο αρνητικό μέρος των συχνοτήτων. Στα πραγματικά σήματα ο FFT δημιουργεί ένα φάσμα με θετικές και αρνητικές συχνότητες τα οποία είναι

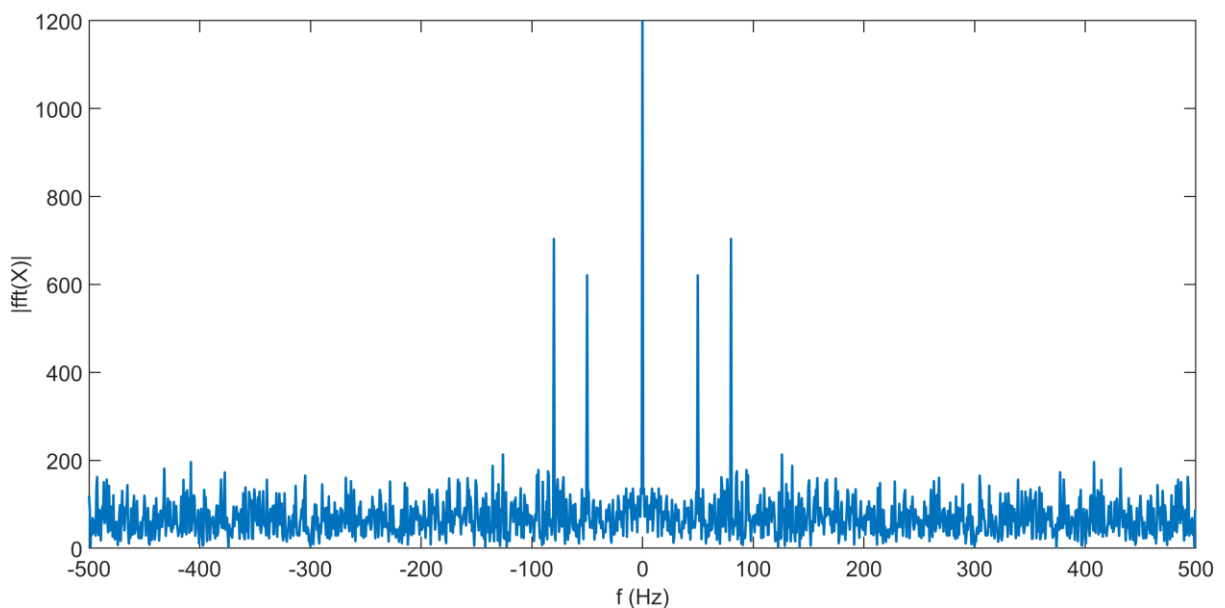
συζυγή μεταξύ τους. Αυτή η ιδιότητα του μετασχηματισμού φαίνεται καλύτερα με την μετατόπιση των αρνητικών συχνοτήτων στο αριστερό μέρος του φάσματος.

Σχήμα 2.4.3: Το φάσμα των μέτρων του μετασχηματισμού FFT του σήματος $x(t)$



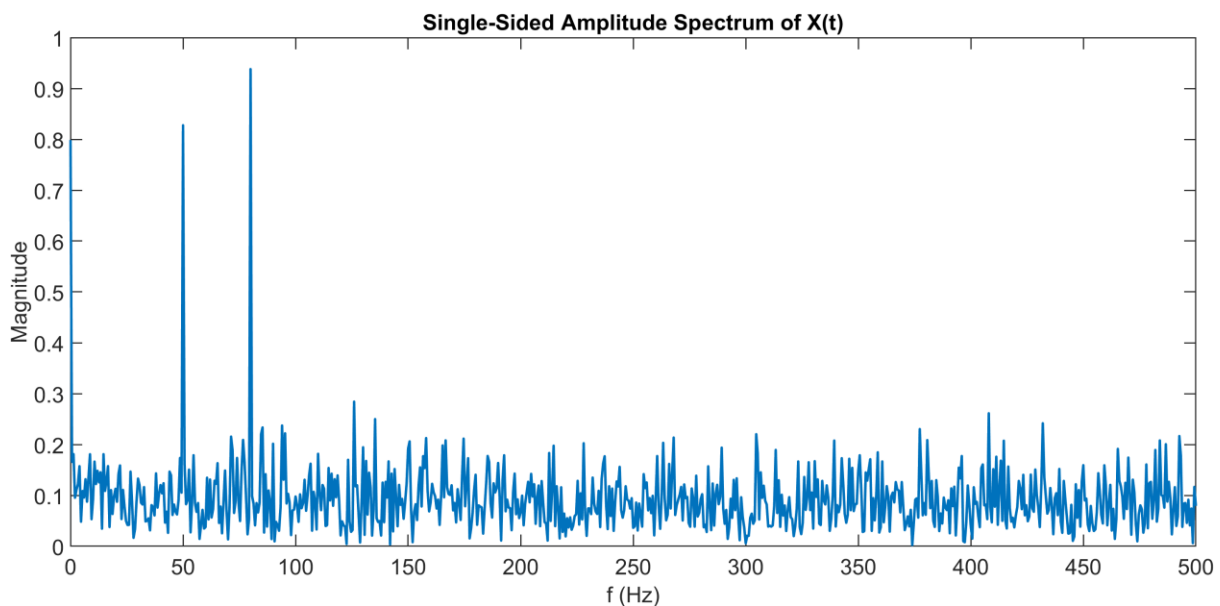
Στο Σχήμα 2.4.3 παρουσιάζεται το φάσμα απόλυτων τιμών του μετασχηματισμού μετατοπισμένο έτσι ώστε οι αρνητικές συχνότητες να βρίσκονται στην αριστερή πλευρά του φάσματος και στο κέντρο του φάσματος βρίσκεται η τιμή μηδέν της συχνότητας. Οι τιμές στην συχνότητα παίρνουν τιμές στο διάστημα $[-f_{Nyquist}, f_{Nyquist}]$.

Σχήμα 2.4.4: Φάσμα FFT στις αρνητικές και θετικές συχνότητες για το σήμα $x(t)$



Η μετατροπή από αυτή την απεικόνιση του φάσματος FFT στα φάσματα πλάτους στην συχνότητα, γίνεται με την αλλαγή της κλίμακας του μετασχηματισμού με την διαίρεση των μέτρων $|FFT(X)|$ του μετασχηματισμού με το πλήθος των δειγμάτων του σήματος. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το αμφίπλευρο φάσμα πλάτους του μετασχηματισμού. Επειδή όμως είναι συζυγείς οι δυο πλευρές μπορούν να διατηρηθούν μόνο οι θετικές συχνότητες του φάσματος χωρίς να χαθεί πληροφορία. Επομένως διατηρείται μόνο το πρώτο μισό του αμφίπλευρου φάσματος και οι όλες οι τιμές του πλάτους διπλασιάζονται, εκτός από την πρώτη και την τελευταία τιμή που αντιστοιχούν στην συχνότητα μηδέν και στην συχνότητα Nyquist που δεν έχουν συζυγή ζευγάρια στις αρνητικές συχνότητες. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται το μονόπλευρο φάσμα πλάτους του FFT. Στο επόμενο σχήμα δίνεται το μονόπλευρο φάσμα πλάτους για το σήμα του παραδείγματος. Στον κάθετο άξονα φαίνεται η αλλαγή κλίμακας που πραγματοποιήθηκε από τις προηγούμενες απεικονίσεις. Υπάρχει δυνατότητα χρήσης της λογαριθμικής κλίμακας στην απεικόνιση των φασμάτων, ενώ πολλές εφαρμογές επεξεργασίας ψηφιακού σήματος χρησιμοποιούν τα φάσματα ενέργειας των σημάτων που είναι ουσιαστικά τα μέτρα του μετασχηματισμού υψωμένα στο τετράγωνο $|FFT(X)|^2$ (Καραϊσκος & Κάντζος, 2015).

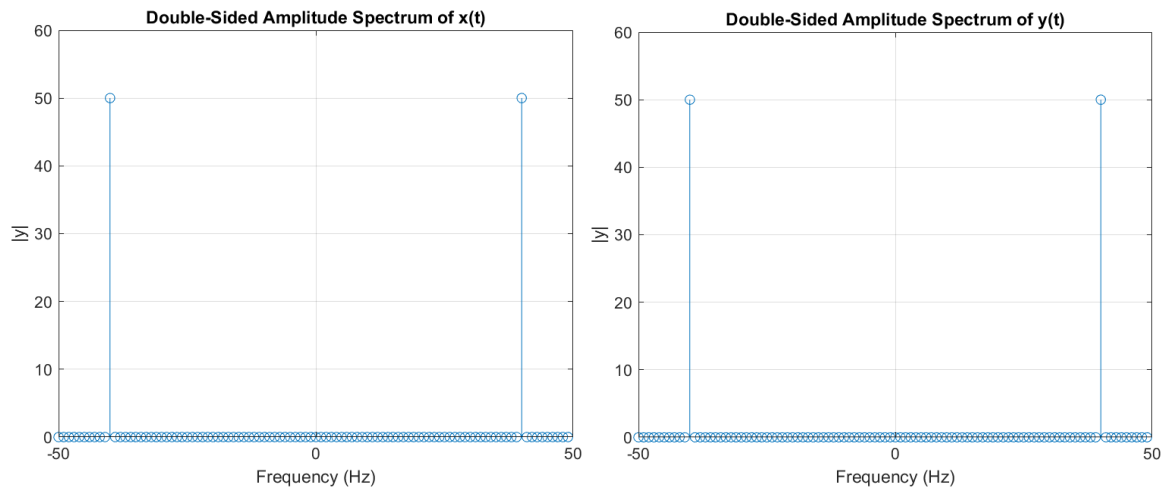
Σχήμα 2.4.5: Μονόπλευρο φάσμα πλάτους του FFT του σήματος $x(t)$



Στα σχήματα παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα χρήσης στο οποίο είναι απαραίτητες και οι δύο συναρτήσεις της συχνότητας (φάσματα πλάτους και φάσματα φάσης) σε δύο ημιτονοειδή σήματα, ένα ημίτονο πλάτους 1 συχνότητας 40 Hz και φάσης $-\pi/4$ ($y(t) = \sin(2\pi 40t - \pi/4)$) και ένα συνημίτονο με ίδια χαρακτηριστικά ($x(t) = \cos(2\pi 40t - \pi/4)$). Όπως είναι γνωστό τα φάσματα πλάτους και φάσης ημιτονοειδών συναρτήσεων είναι μια γραμμή στην συχνότητα (Καραϊσκος & Κάντζος, 2015). Έχουν ληφθεί δείγματα με συχνότητα δειγματοληψίας $f_s = 100$ Hz για ένα δευτερόλεπτο. Τα αμφίπλευρά φάσματα πλάτους των δύο αυτών σημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4.6. Είναι λογικό πως το περιεχόμενο των φασμάτων πλάτους είναι ταυτόσημο καθώς τα δύο ημιτονοειδή σήματα έχουν την ίδια συχνότητα. Επομένως δεν θα μπορούσαν να ανασκευαστούν τα σήματα στον χρόνο μόνο από

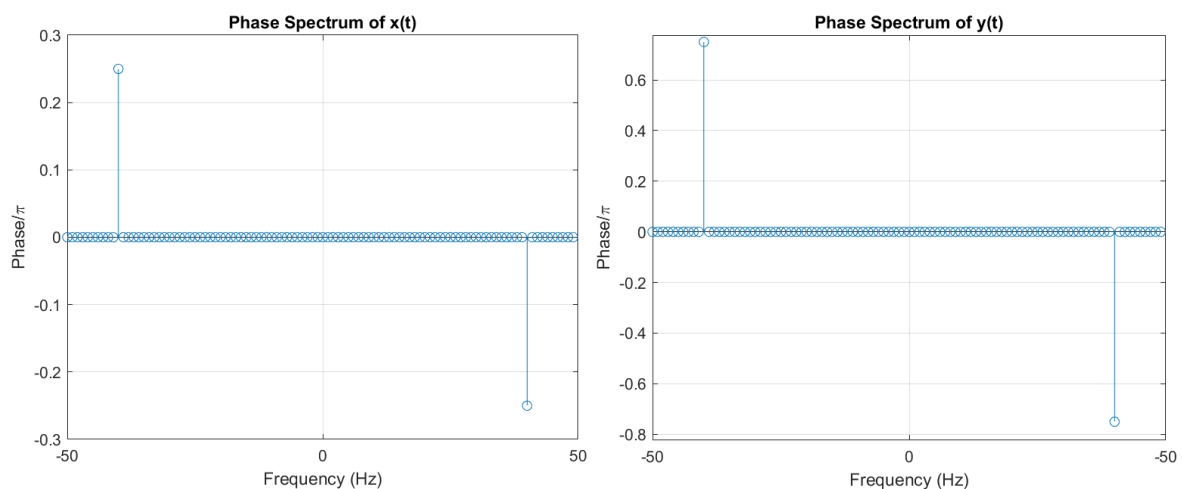
την πληροφορία που παρέχεται από τα φάσματα πλάτους των σημάτων. Λείπει η πληροφορία που κάνει αυτά τα δύο σήματα να ξεχωρίζουν που προφανώς έχει να κάνει με την φάση.

Σχήμα 2.4.6: Φάσματα πλάτους του $x(t) = \cos(2\pi 40t - \pi/4)$ (αριστερά), και του $y(t) = \sin(2\pi 40t - \pi/4)$ (δεξιά)



Από την τριγωνομετρία είναι γνωστό πως τα ημίτονα μπορούν να γραφτούν σαν συνημίτονα με υστέρηση κατά $\pi/2$ σύμφωνα με την ταυτότητα $\sin(\theta) = \cos(\theta - \pi/2)$. Επομένως το προηγούμενο ημίτονο μπορεί να γραφτεί με την μορφή συνημίτονου ως $\cos(2\pi 40t - \pi/4 - \pi/2) = \cos(2\pi 40t - 3\pi/4)$. Πράγματι από τα φάσματα της φάσης (Σχήμα 2.4.7) των δύο μπορεί αυτή η διαφορά να εντοπιστεί καθώς το φάσμα φάσης του ημιτόνου παρουσιάζει κορυφή με τιμή -0.75 στις θετικές συχνότητες.

Σχήμα 2.4.7: Φάσματα φάσης του $x(t) = \cos(2\pi 40t - \pi/4)$ (αριστερά), και του $y(t) = \sin(2\pi 40t - \pi/4)$ (δεξιά)

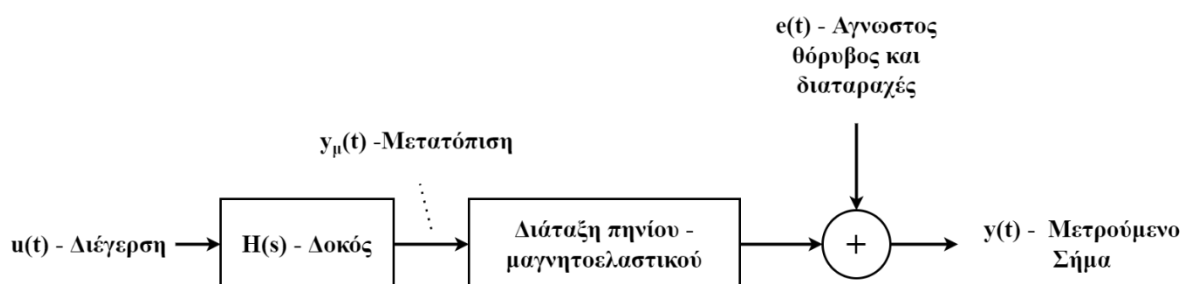


2.5 Αυτοσυσχέτιση Χρονοσειρών

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από ακολουθίες διαδοχικών παρατηρήσεων διατεταγμένες σε ίσα χρονικά διαστήματα ονομάζονται χρονοσειρές (Λιώκη-Λειβαδά & Ασημακόπουλος, 2010). Τα σήματα που λήφθηκαν από τον παλμογράφο επομένως μπορούν να χαρακτηριστούν χρονοσειρές. Στον κάθετο άξονα είναι οι τιμές της τάσης στα τυλίγματα του πηνίου (το σήμα που λήφθηκε από τον παλμογράφο), και στον οριζόντιο άξονα οι τιμές του χρόνου που αντιστοιχούν στο κάθε δείγμα, οι οποίες είναι γνωστές εφόσον είναι γνωστό το πλήθος των δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο και το μέγεθος κάθε σήματος.

Οι χρονοσειρές αυτές αποτελούν την πρώτη απεικόνιση των κυματομορφών εξόδου του συστήματος της πειραματικής διάταξης. Είναι ήδη γνωστό πως αυτά τα σήματα διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από αυτά που προκύπτουν από θεωρητικά μοντέλα που έχουν κατασκευαστεί για την δοκό σε προηγούμενη μελέτη (Σουλτάνα, 2022). Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της περιπλοκότητας ενός πραγματικού συστήματος, στο οποίο σε κάθε περίπτωση υπάρχουν δυναμικές στο σύστημα και εσωτερικά σήματα που δεν υπάρχει η δυνατότητα να μοντελοποιηθούν. Σε συνδυασμό με τον θόρυβο ο οποίος υπάρχει πάντα στην λήψη μετρήσεων από πραγματικά συστήματα και του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι άγνωστα, δεν υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας ενός μοντέλου που να ανταποκρίνεται ακριβώς στην πειραματική διάταξη. Το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος μπορεί να αναπαρασταθεί με τον τρόπο που δίνεται παρακάτω. Σε αυτό έχει προστεθεί ο θόρυβος αγνώστων χαρακτηριστικών και η διάταξη του αισθητηρίου των οποίων οι λειτουργία δεν είχε προσομοιωθεί στο θεωρητικό μοντέλο.

Σχήμα 2.5.1: Διάγραμμα βαθμίδων της πειραματικής διάταξης της δοκού, όπου η μετατόπιση της δοκού μετατρέπεται σε μετρούμενο σήμα με την χρήση της υποδιάταξης του αισθητηρίου



Σημείωση: Από “Ανίχνευση μεταβολής δομικών χαρακτηριστικών δοκού με τη χρήση αλγοριθμικών μη-καταστροφικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών επί πειραματικών δεδομένων από αισθητήρια μη-επαφής” του Ρομπερτ Γ. Σουλτάνα, Διπλωματική Διατριβή. Copyright Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής 2022

Επομένως αυτές οι άγνωστοι παράμετροι εισάγουν άγνωστες δυναμικές οι οποίες δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια. Σε αυτό το πρόβλημα δίνει λύση η αναπαράσταση της λειτουργίας του συστήματος με χρήση στοχαστικών μοντέλων. Στοχαστικές διεργασίες

(stochastic process) ονομάζονται οι διεργασίες που μπορούν να αναλυθούν μόνο με τους νόμους των πιθανοτήτων, και περιγράφονται από ένα σύνολο συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Σε αντιπαράβολή, οι ντετερμινιστικές διεργασίες είναι αυτές που μπορούν να καθοριστούν μοναδικά από έναν μαθηματικό τύπο, ή γενικότερα από κανόνα κάποιου είδους (Oppenheim & Schaffer, 2013).

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα σήματα που προέρχονται από την διέγερση την δοκού δεν μπορούν να εξηγηθούν πλήρως από αιτιοκρατικά (deterministic) μαθηματικά μοντέλα, και το γεγονός ότι αναπαρίστανται καλύτερα με την χρήση στοχαστικών διεργασιών αποτελεί ένδειξη ότι χαρακτηρίζονται από ορισμένο παράγοντα τυχαιότητας. Αυτός ο παράγοντας στην αναπαράσταση των στοχαστικών μοντέλων εκφράζεται συνήθως με την προσθήκη ακολουθίας λευκού θορύβου σε μια εξίσωση. Ο λευκός θόρυβος αποτελείται από τιμές που είναι όμοια κατανομημένες και ανεξάρτητες μεταξύ τους επομένως δεν υπάρχει δυνατότητα να προβλεφθούν οι μελλοντικές τιμές της ακολουθίας αυτής από τις προηγούμενες.

Αυτό όμως δεν ισχύει και για τα σήματα που λαμβάνονται από την διάταξη, εφόσον μπορεί να γίνει ικανοποιητική περιγραφή της λειτουργίας τους με την χρήση στοχαστικών μοντέλων και τεχνικές εκτίμησης των παραμέτρων αυτών, όπως έχει γίνει επιτυχώς στην μελέτη που προηγήθηκε πάνω στο αντικείμενο (Σουλτάνα, 2022). Επομένως αυτό μαρτυρά ότι υπάρχουν κάποιες σχέσεις εξάρτησης (dependencies) στις χρονοσειρές που λαμβάνονται, οι οποίες οφείλονται στις υποκείμενες διεργασίες που έχουν δημιουργήσει τα σήματα αυτά, ήτοι τους φυσικούς νόμους και εξισώσεις που χαρακτηρίζουν εν μέρη την λειτουργία της διάταξης.

Ένας τρόπος να ποσοτικοποιηθεί η ύπαρξη αυτών των σχέσεων εξάρτησης στις τιμές μίας χρονοσειράς, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθούν εκ πρώτης όψεως, είναι με την χρήση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Αυτή αποτελεί την συσχέτιση των τιμών μιας $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ χρονοσειράς με τον εαυτό τους ύστερα από ένα χρονικό διάστημα k . Το διάστημα χρόνου k ονομάζεται υστέρηση (lag) και παίρνει τιμές $0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Η ένταση της συσχέτισης δίνεται από τον συντελεστή αυτοσυσχέτισης r_k ο οποίος ορίζεται μέσω της σχέσης (Chatfield, 1995):

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x}) \cdot (x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \quad (2.10)$$

Οι συντελεστές αυτοί προκύπτουν μέσω της διαίρεσης της συνδιασποράς (covariance) μεταξύ των δύο παρατηρήσεων που χωρίζονται για k υστερήσεις (c_k) διά την τυπική απόκλιση των δύο αυτών παρατηρήσεων (c_0) (The Concise Encyclopedia of Statistics, 2008):

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (2.11)$$

$$c_0 = \frac{1}{N} \sum_t (x_t - \bar{x})^2 \quad (2.12)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t \quad (2.13)$$

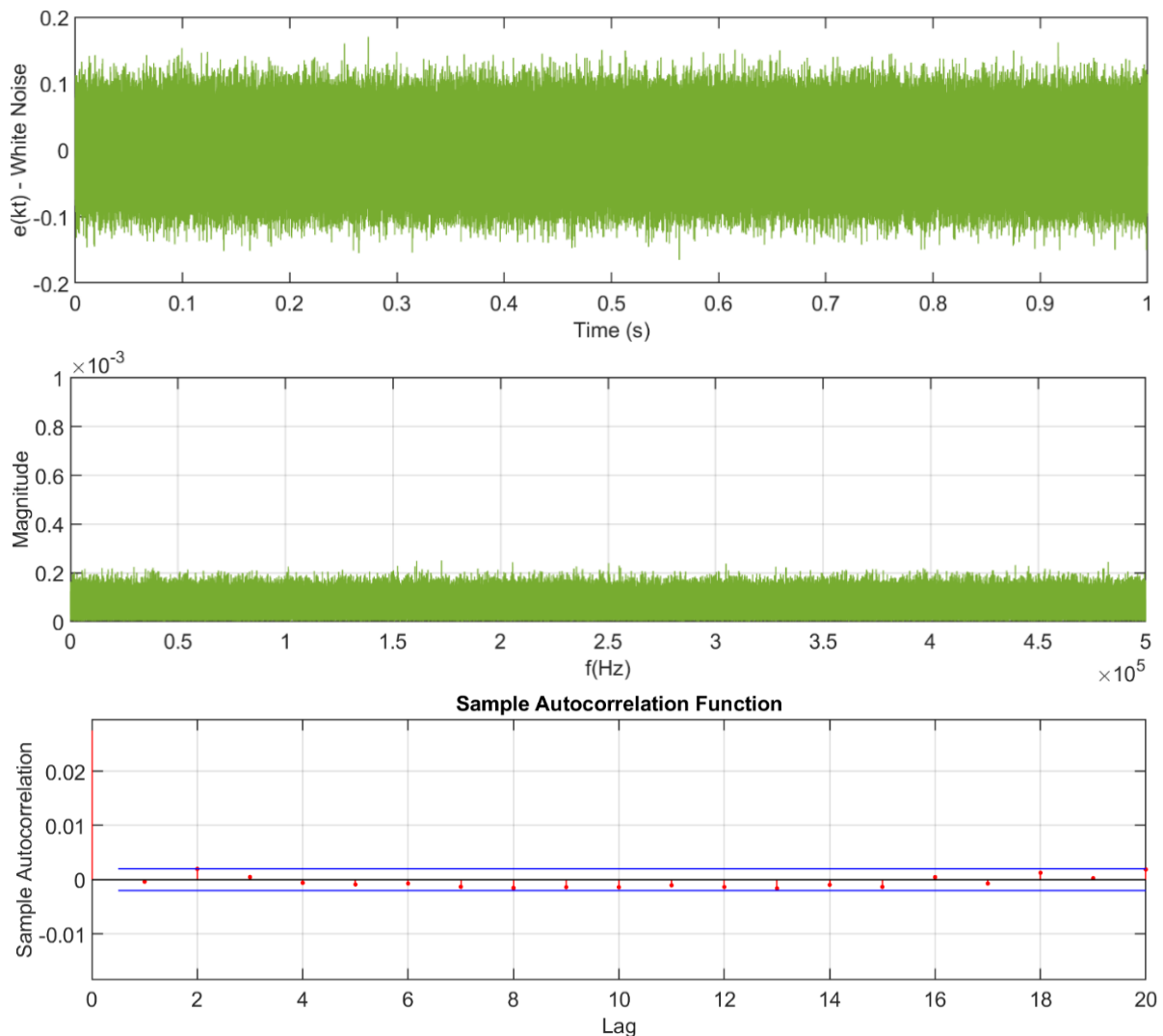
Οι συσχετίσεις υπολογίζονται μόνο για το θετικό κομμάτι των υστερήσεων αφού η συνάρτηση αυτή είναι συμμετρική ως προς τον οριζόντιο άξονα και αυτομάτως γίνονται γνωστές και οι αρνητικές τιμές ($r_k = r_{k-}$). Επίσης ισχύει πάντα ότι το μηδενικό lag, ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης ισούται $r_0 = 1$. Το γράφημα που περιέχει τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης στον κάθετο άξονα για έναν συγκεκριμένο αριθμό υστερήσεων στον οριζόντιο άξονα ονομάζεται συσχετόγραμμα (correlogram), και είναι αυτό που χρησιμοποιείται για να εξαχθούν συμπεράσματα για τις ιδιότητες μιας χρονοσειράς.

Ο έλεγχος αυτοσυσχέτισης πραγματοποιείται σε μία στάθμη σημαντικότητας (συνήθως $\alpha = 0.05$), με βάση την οποία ορίζονται όρια εμπιστοσύνης. Το άνω και κάτω όριο εμπιστοσύνης υπολογίζεται με βάση την σχέση $r_k = 0 \pm t_{\alpha/2} \cdot 1/\sqrt{N}$ (όταν $\alpha = 0.05$, τότε το $t_{\alpha/2} = 1.96$). Αν ο συντελεστής r_k για κάποια υστέρηση ξεπερνά τα όρια εμπιστοσύνης και έχει είτε θετική είτε αρνητική συσχέτιση, τότε υπάρχει κάποιου είδους εξάρτηση μεταξύ των τιμών. Αντίθετα όταν δεν ξεπερνούν οι υστερήσεις τα όρια εμπιστοσύνης τότε μπορεί να υποστηριχθεί ότι τα δεδομένα είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους. (The Concise Encyclopedia of Statistics, 2008)

Ενδιαφέρον παράδειγμα ασυσχέτιστων δεδομένων αποτελούν οι ακολουθίες λευκού θορύβου. Ο λευκός θόρυβος αποτελείται από μια ακολουθία τυχαίων τιμών, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και όλες ανήκουν στην ίδια κατανομή. Θεωρείται πως έχει μέση τιμή μηδέν και διασπορά η οποία ισούται με σ^2 . Όταν επιπλέον η κατανομή που ακολουθούν οι τιμές είναι η κανονική (Normal/Gaussian distribution) τότε αυτός ο θόρυβος ονομάζεται και γκαουσιανός. Βρίσκει εφαρμογές στην προσομοίωση θορύβου σε συστήματα τηλεπικοινωνιών, όπως επίσης και στην αναγνώριση των συστημάτων με τεχνικές που χρησιμοποιούν στοχαστικά μοντέλα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια ακολουθία λευκού θορύβου υποθέτοντας ότι λήφθηκαν 1.000.000 δείγματα στον χρόνο, με την βοήθεια του MATLAB®. Παρουσιάζεται επίσης το μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT της ακολουθίας, και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της. Είναι φανερό πως οι συντελεστές δεν ξεπερνούν τα όρια εμπιστοσύνης, για όλα τα $k \neq 0$. Αν για κάποια lags παρατηρείται να ξεπερνούν οριακά τα όρια εμπιστοσύνης αυτό οφείλεται στο ότι τα όρια αυτά είναι ενδεικτικά, οπότε δεν θεωρείται πως υπάρχει συσχέτιση.

Στο φάσμα πλάτους της ακολουθίας στην συχνότητα παρατηρείται ότι ο λευκός θόρυβος παρουσιάζει μια ομοιόμορφη εικόνα, αφού εκ κατασκευής έχει προσεγγιστικά την ίδια συνεισφορά σε όλες τις συχνότητες χωρίς να υπάρχει κάποια που να συνεισφέρει σημαντικά περισσότερο.

Σχήμα 2.5.2: Ακολουθία λευκού θορύβου: (1) Η χρονοσειρά δεδομένων της ακολουθίας (2) Μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT (3) Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της ακολουθίας



2.6 Μέθοδος σύγκρισης των σημάτων

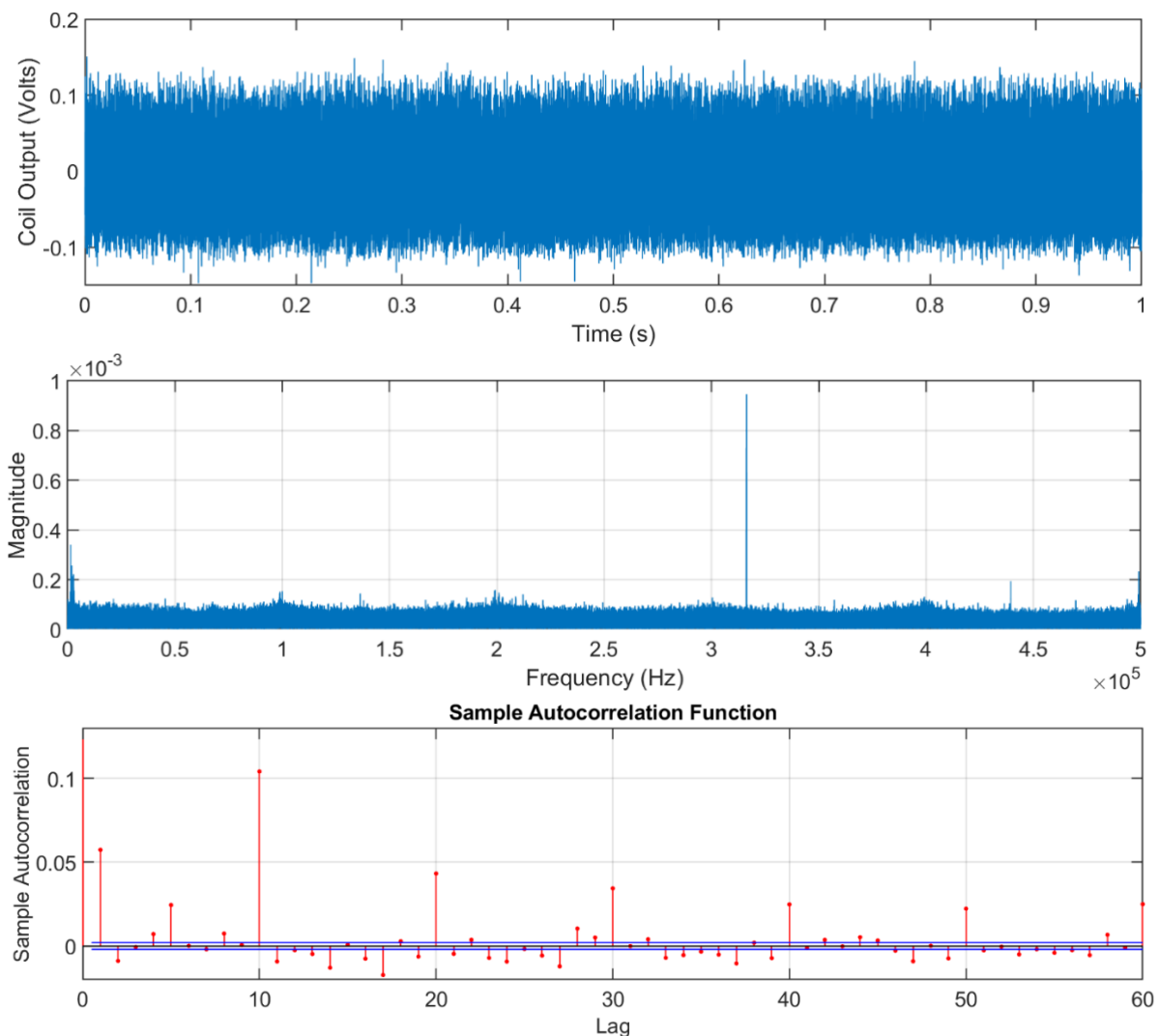
Η μελέτη της ευαισθησίας ανίχνευσης του αισθητηρίου βασίζεται στον εντοπισμό των διαφορών που υπάρχουν στα σήματα που λαμβάνονται από τις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης της δοκού. Τα σήματα που παράγει η παλμογεννήτρια και είναι υπεύθυνα για την φόρτιση της δοκού, έχουν τρεις παραμέτρους οι οποίες μπορούν να επιλεγθούν και στο σύνολο τους εκφράζουν το προφίλ διέγερσης ή αλλιώς τις συνθήκες φόρτισης στις οποίες υποβάλλεται η δοκός. Αυτές είναι η συχνότητα, το πλάτος, και η μορφή της κυματομορφής που παράγεται. Ενδεχόμενες αλλαγές σε έναν από τους παράγοντες προκαλούν αλλαγές στην συμπεριφορά των σημάτων που λαμβάνονται από το αισθητήριο. Τα χαρακτηριστικά των αλλαγών είναι που διερευνώνται κατά την ανάλυση των σημάτων.

Επιπλέον το αισθητήριο εκτός από τα σήματα που προέρχονται από την παλμογεννήτρια δέχεται περιβαλλοντικό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο στον οποίο είναι ευαίσθητο εξαιτίας της παθητικής ανίχνευσης που χρησιμοποιείται στην διάταξη, του οποίου έγινε η περιγραφή στην

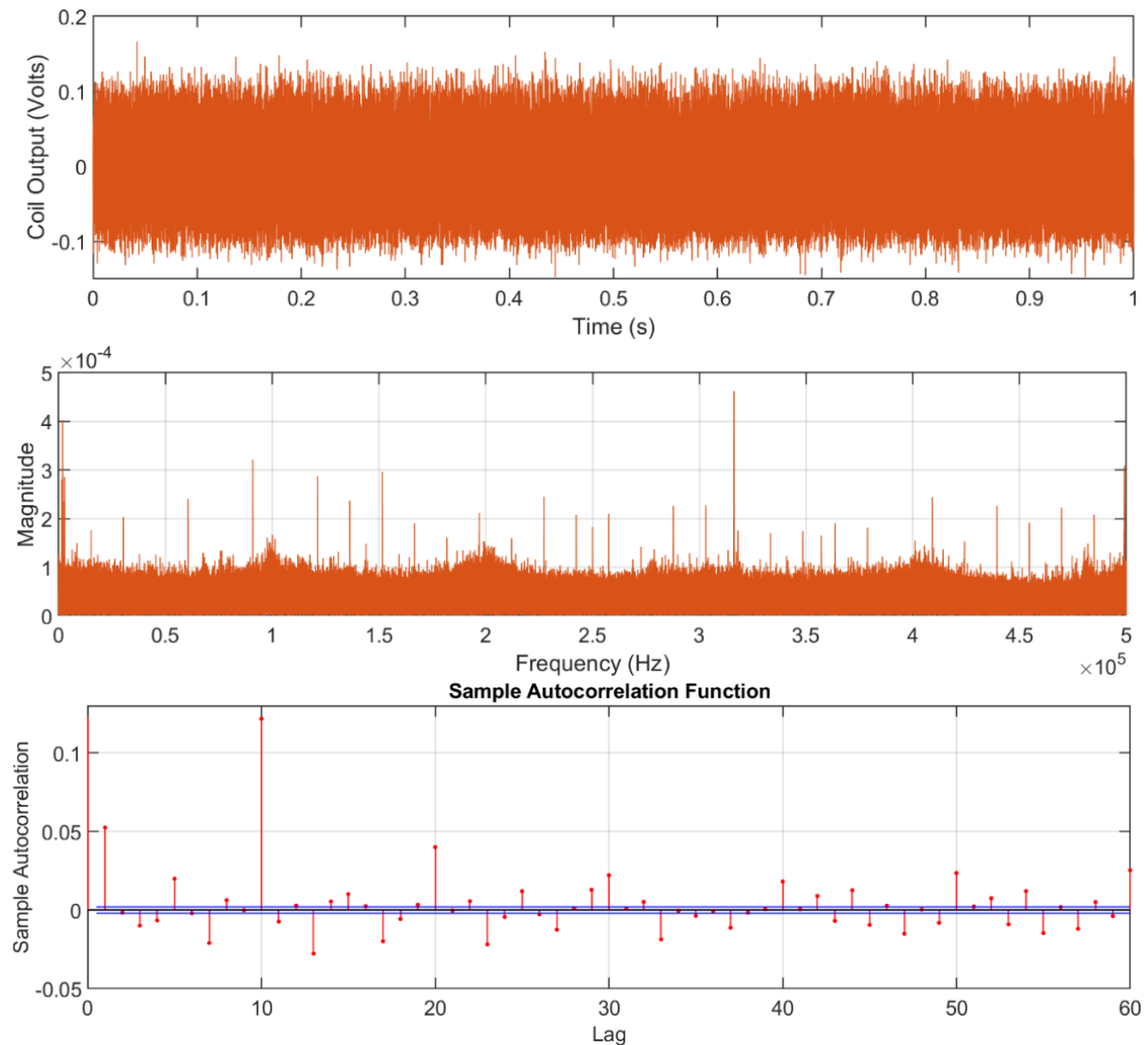
αντίστοιχη ενότητα. Επομένως μπορούν να καταγραφούν και σήματα χωρίς να παρέχεται κάποια διέγερση από την παλμογεννήτρια. Στην συνέχεια παρατίθενται σήματα αυτές οι δύο βασικές κατηγορίες, για να παρατηρηθούν οι αλλαγές μεταξύ σημάτων που προέρχονται από διέγερση και σημάτων που οφείλονται στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο που προέρχεται από το περιβάλλον της διάταξης.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τρία διαφορετικά διαγράμματα των σημάτων αυτών. Πρώτα δίνεται η πληροφορία του σήματος στο πεδίο του χρόνου, με προεργασία που έχει γίνει στο σήμα (αφαίρεση του μέσου) που αναλύθηκε στην σχετική ενότητα. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το περιεχόμενο του ίδιου σήματος στην συχνότητα, με την μέθοδο λήψης μονόπλευρου φάσματος πλάτους του FFT, και στο τέλος παρουσιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των δεδομένων στο πεδίο χρόνου. Αυτή η διαδικασία γίνεται με τον ίδιο τρόπο για τα δύο διαφορετικά σήματα που παρουσιάζονται, την μέτρηση θορύβου (μπλε χρώμα) και την μέτρηση που προέρχεται από κάποιο προφίλ διέγερσης (πορτοκαλί χρώμα).

Σχήμα 2.6.1: Μέτρηση θορύβου: (1) Η χρονοσειρά δεδομένων της μέτρησης (2) Μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT (3) Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς



Σχήμα 2.6.2: Μέτρηση διέγερσης: (1) Η χρονοσειρά δεδομένων της μέτρησης (2) Μονόπλευρο φάσμα πλάτους FFT (3) Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς



Παρατηρείται πως τα δύο σήματα μοιάζουν αρκετά στο πεδίο του χρόνου και δεν παρατηρείται κάποια συγκρίσιμη διαφορά μεταξύ των δύο. Οι χρονοσειρές αυτές μάλιστα δεν διαφοροποιούνται με κάποιον τρόπο με το αντίστοιχο διάγραμμα της ακολουθίας λευκού θορύβου που έχει παρόμοια διασπορά και ίδιο πλήθος δειγμάτων.

Αυτό συμβαίνει διότι η μετάδοση της εξωτερικής μηχανικής φόρτισης μέσω του μαγνητοελαστικού φαινομένου σε συστήματα που εφαρμόζεται παθητική διέγερση του πηνίου, παράγει αδύναμα ηλεκτρικά σήματα συγκριτικά με τον θόρυβο ο οποίος υπάρχει στο περιβάλλον. Οπότε δεν υπάρχει η δυνατότητα διάκρισης του περιεχομένου που προέρχεται από την μετάδοση αυτή, με το περιεχόμενο που οφείλεται σε ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο που εισέρχεται στην διάταξη στο πεδίο του χρόνου. (Dimogianopoulos & Mouzakis, 2021). Αυτή η ευαισθησία των σημάτων στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο συνεπάγεται και ευαισθησία στις

μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασία, θερμοκρασία), οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την συμπεριφορά του σήματος.

Παρατηρώντας όμως την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των σημάτων εμφανίζεται διαφορά με την αντίστοιχη συνάρτηση για την ακολουθία λευκού θορύβου. Υπάρχουν αρκετά lags με αρνητική είτε θετική συσχέτιση, και για την μέτρηση που προέρχεται από θόρυβο αλλά και για την μέτρηση που προέρχεται από διέγερση. Οπότε δεν είναι ασυσχέτιστα τα δεδομένα μεταξύ τους όπως στην περίπτωση της ακολουθίας λευκού θορύβου. Επομένως υπάρχουν σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των δεδομένων των δύο μετρήσεων, οι οποίες δεν μπορούν να παρατηρηθούν στα διαγράμματα του χρόνου εξαιτίας του σημαντικού περιεχομένου θορύβου.

Αυτό φυσικά δεν αποτελεί κάποιο μέτρο σύγκρισης μεταξύ των δύο σημάτων. Τα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν μια πολύ διαφορετική εικόνα μεταξύ των δύο είναι αυτά των φασμάτων πλάτους FFT. Οπότε έχει νόημα να διερευνηθούν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας. Παρατηρώντας τα δύο φάσματα ξεχωριστά παρατηρούνται περισσότερες κορυφές στην μέτρηση που δίνεται από διέγερση. Επίσης παρατηρείται πως και στις δύο μετρήσεις η μεγαλύτερη κορυφή είναι λίγο μετά τα 3 kHz. Από τα φάσματα σε όλο το εύρος των συχνοτήτων δεν είναι δυνατό να παρατηρηθεί πως συγκρίνονται οι κορυφές των σημάτων στις χαμηλές συχνότητες, παρά μόνο φαίνεται πως έχουν και οι δύο μετρήσεις περιεχόμενο με σημαντική συνεισφορά. Επομένως προκύπτει η ανάγκη να συγκριθούν με μεγαλύτερη προσοχή σε όλο το εύρος συχνοτήτων.

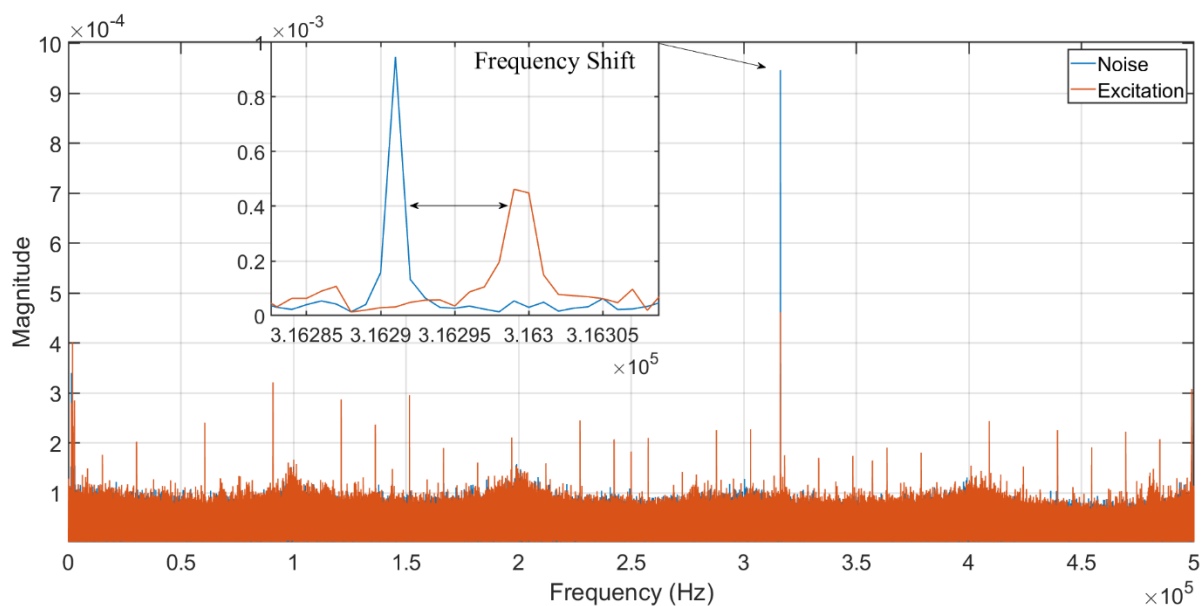
Στο Σχήμα 2.6.3 που ακολουθεί αυτή η σύγκριση γίνεται τοποθετώντας τα φάσματα των μετρήσεων σε έναν κοινό σύστημα αξόνων. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα να παρατηρηθούν πως συγκρίνονται οι κορυφές των δύο σημάτων. Επίσης γίνεται η χρήση ένθετων διαγραμμάτων (inset plots) για την παρουσίαση σημείων ενδιαφέροντος μέσα στο κύριο διάγραμμα.

Σε αυτό το διάγραμμα είναι δυνατόν να παρατηρηθεί πως υπάρχουν ορισμένες κορυφές στην συχνότητα που υπάρχουν και στις δύο μετρήσεις, στην ίδια ζώνη συχνότητας, με μικρή απόσταση μεταξύ τους. Αυτό το φαινόμενο, που ονομάζεται μετατόπιση συχνότητας (frequency shift), αποτελεί την πρώτη ένδειξη που δίνεται για μια διαφοροποίηση μεταξύ των δύο σημάτων η οποία δίνει την δυνατότητα να συγκριθούν μεταξύ τους. Η ανάλυση των φασματικών χαρακτηριστικών ξεκινά από τις κορυφές που έχουν την μεγαλύτερη συνεισφορά στην συχνότητα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται ότι αυτή η κορυφή είναι και για τα δύο σήματα στην ίδια περιοχή με αυτό το φαινόμενο μετατόπισης. Επομένως φαίνεται να υπάρχει διαφοροποίηση των σημάτων στην περιοχή που και οι δύο παρουσιάζουν την κορυφή αυτή. Το επόμενο βήμα είναι να αναζητηθούν άλλες περιοχές που να παρατηρείται αυτό το φαινόμενο οι οποίες να περιέχουν κορυφές με σημαντική συνεισφορά πλάτους.

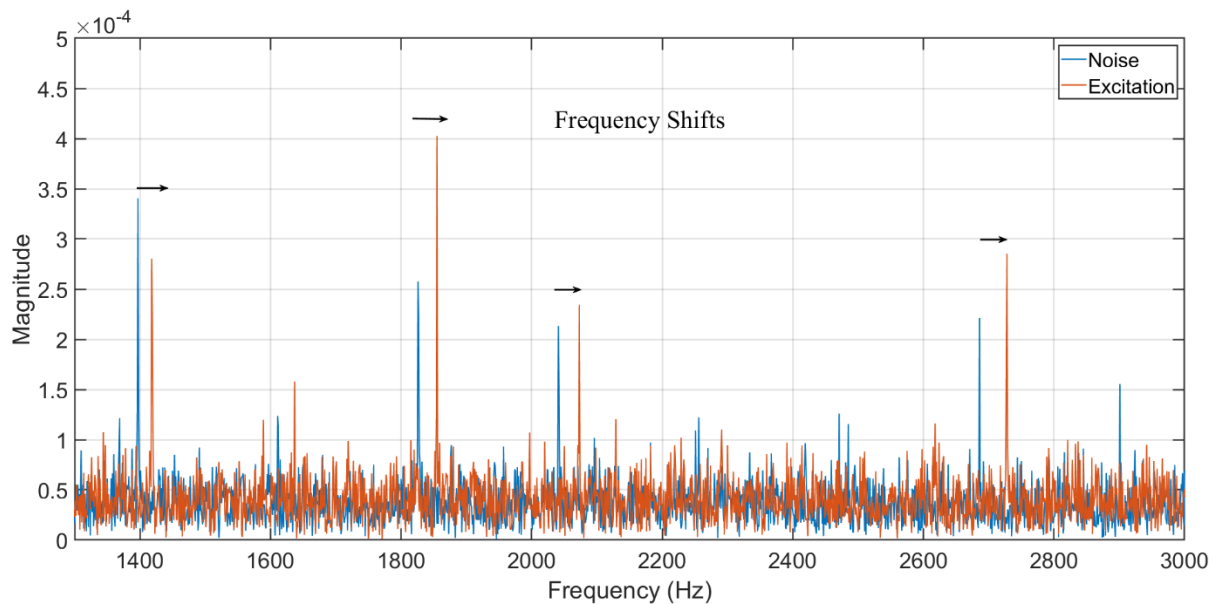
Στην συνέχεια, το φαινόμενο μετατόπισης παρατηρείται και σε κάποιες περιοχές στις χαμηλότερες συχνότητες στο εύρος 1300 – 3000 όπως αυτές φαίνονται στο Σχήμα 2.6.4. Και σε αυτές τις περιοχές οι κορυφές έχουν σημαντική συνεισφορά και στα δύο σήματα. Επομένως η ανάλυση της συμπεριφοράς θα πρέπει να βασιστεί σε αυτές τις δύο κύριες περιοχές στην συχνότητα.

Προφανώς αυτά τα αποτελέσματα για να αποτελούν έγκυρες ενδείξεις πρέπει να επιβεβαιώνονται από την συνολική εικόνα που παρουσιάζουν τα φάσματα των μετρήσεων για κάθε διαφορετική διέγερση που βρίσκεται υπό διερεύνηση. Αυτό σημαίνει πως δεν μπορεί να υποστηριχθεί πως αυτές οι παρατηρήσεις αποτελούν βάσιμες ενδείξεις εφόσον εξετάζονται τα φάσματα μόνο μίας μέτρησης. Για να διαχωριστούν οι κορυφές σημασίας από αυτές του θορύβου, πρέπει να συγκριθεί ένα πλήθος μετρήσεων που να προέρχεται από κάποιο προφίλ διέγερσης με ένα ίσο πλήθος μετρήσεων που προέρχονται από κάποιο άλλο προφίλ διέγερσης. Με αυτόν τον τρόπο τυχαία φαινόμενα θορύβου που είναι πολύ πιθανό να εμφανίζονται στα σήματα μπορούν να μην λαμβάνονται υπόψιν. Επομένως για να προκύπτει ότι αυτό το φαινόμενο μετατόπισης είναι αξιόπιστη ένδειξη πρέπει να εξεταστούν όλες οι μετρήσεις για μια σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών συνθηκών φόρτισης.

Σχήμα 2.6.3: Μονόπλευρο φάσμα πάτους FFT των δύο μετρήσεων (θόρυβος και διέγερση) σε κοινό σύστημα αξόνων, με εμφανές το φαινόμενο μετατόπισης στην συχνότητα



Σχήμα 2.6.4: Μονόπλευρο φάσμα πάτους FFT των δύο μετρήσεων (θόρυβος και διέγερση) σε κοινό σύστημα αξόνων, με εμφανές το φαινόμενο μετατόπισης στην συχνότητα στις χαμηλές συχνότητες



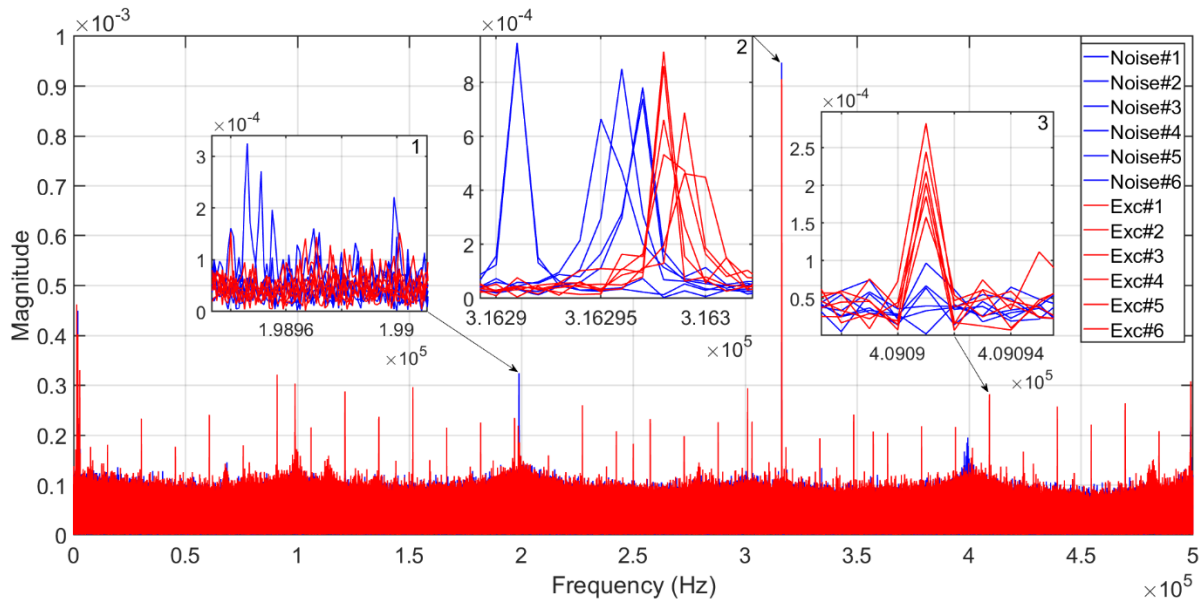
Στο επόμενο σχήματα ακολουθεί η σύγκριση μεταξύ έξι μετρήσεων θορύβου και έξι μετρήσεων με διέγερση, δηλαδή τα φάσματα πλάτους όλων των μετρήσεων για τις δυο διαφορετικές συνθήκες (θόρυβος και διέγερση) που εξετάστηκαν και παραπάνω. Σε αυτά παρουσιάζονται με μπλε οι μετρήσεις του θορύβου και οι μετρήσεις της διέγερσης με κόκκινο.

Με την σύγκριση των σετ στο σύνολο τους δίνεται μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για την συμπεριφορά των σημάτων αναφορικά με την συνθήκη προέλευσης τους. Στο Σχήμα 2.6.5 (inset 2) παρατηρείται πως για την περιοχή με την μεγαλύτερη συνεισφορά πλάτους στα 316 kHz τα φαινόμενα μετατόπισης ακολουθούν ένα μοτίβο που συμφωνεί με όσα παρατηρήθηκαν στα προηγούμενα διαγράμματα. Οι μετρήσεις που προέρχονται από διέγερση έχουν μετατοπιστεί προς αυξημένες συχνότητες. Μάλιστα το εύρος στο οποίο εμφανίζονται οι κορυφές αυτές απέχει από αυτές του θορύβου, οπότε δεν εμφανίζεται αλληλοεπικάλυψή μεταξύ των δύο. Αυτό το χαρακτηριστικό, στην περίπτωση που προκύπτει για όλες τις κορυφές των μετρήσεων σε μια δεδομένη περιοχή αποτελεί μια βάσιμη ένδειξη αλλαγής της συμπεριφοράς των σημάτων που σχετίζεται στην αλλαγή προφίλ διέγερσης.

Στα σήματα εμφανίζεται και αρκετό περιεχόμενο για το οποίο δεν υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ των δύο σετ. Ενδεικτικά στις μετρήσεις που οφείλονται σε διέγερση παρατηρούνται αρκετές κορυφές οι οποίες δεν εμφανίζουν μεταβολές από μέτρηση σε μέτρηση στην συχνότητα όπως στο inset 3. Ακόμα και αν αποτελούν καινούργιες κορυφές στην συχνότητα που θα μπορούσαν να οφείλονται στην αλλαγή προφίλ διέγερσης, το γεγονός ότι δεν έχουν διαφοροποίηση στην τιμή της συχνότητας δεν αποτελεί καλή ένδειξη για την χρησιμότητά τους ως προς την σύγκριση με μετρήσεις προερχόμενες από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Ομοίως παρατηρούνται φαινόμενα εμφάνισης κορυφών μόνο για μια μέτρηση, οι οποίες σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή

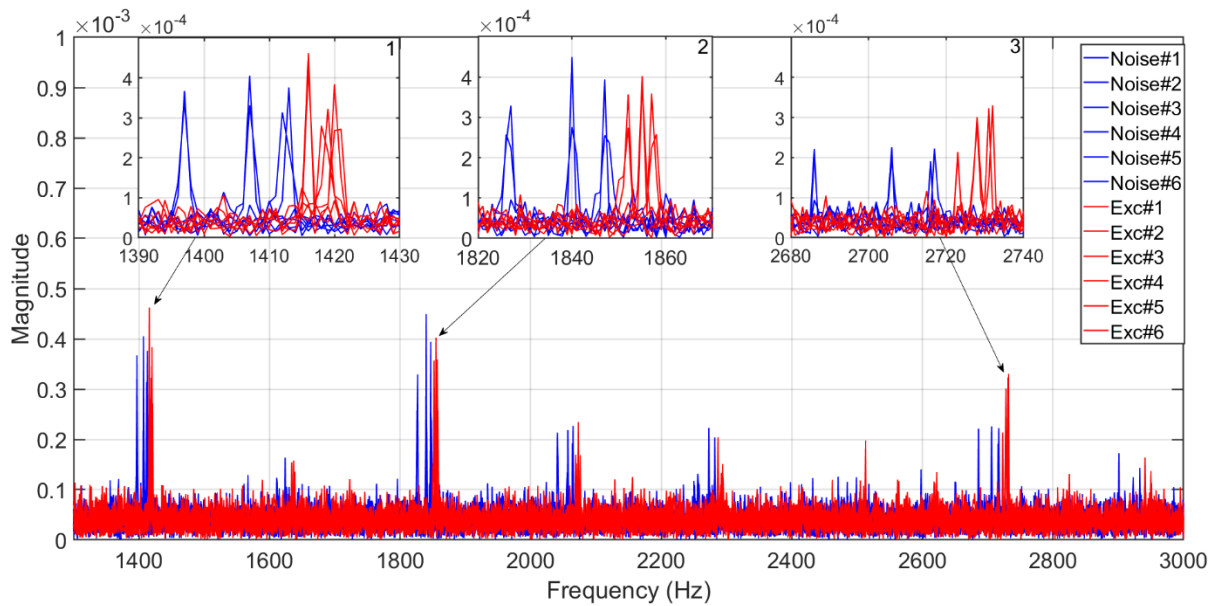
συμπερασμάτων, καθώς δεν υπάρχει συνέπεια για το δεδομένο σετ από το οποίο προέρχονται. Αυτές θεωρείται ότι οφείλονται σε τυχαία φαινόμενα θορύβου που προκύπτουν στα σήματα. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται και στο inset 1.

Σχήμα 2.6.5: Φάσματα πλάτους των δύο σετ μετρήσεων (θορύβου και διέγερσης)



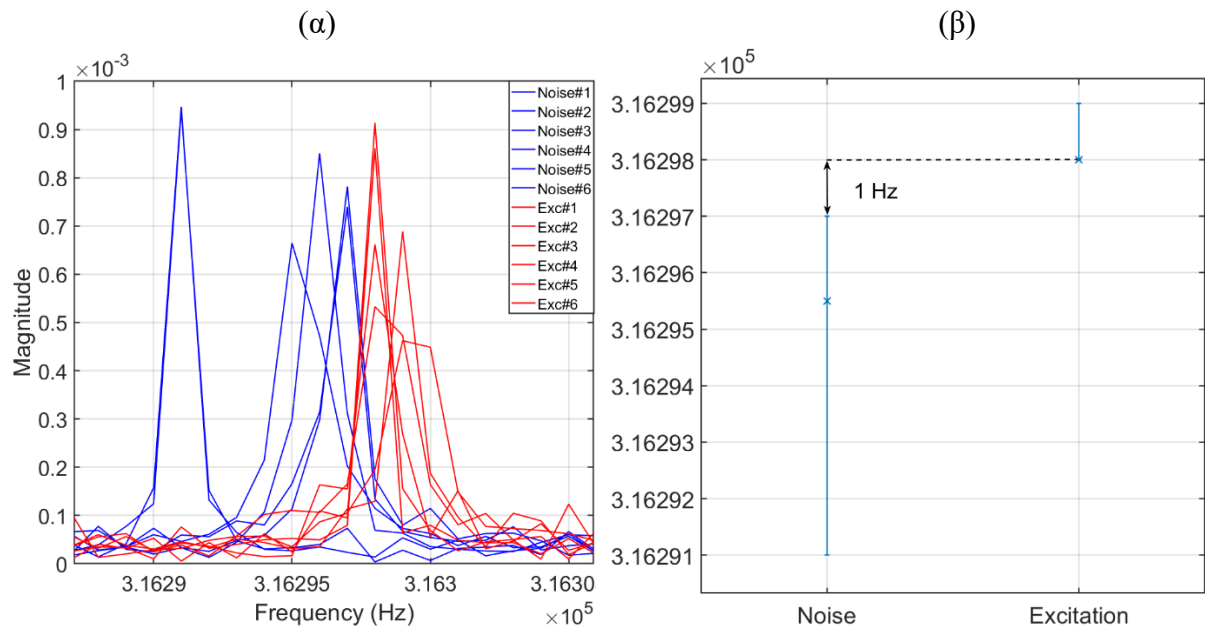
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι ομάδες κορυφών αυτής της σύγκρισης στις χαμηλές συχνότητες, στο Σχήμα 2.6.6. Σε αυτή την μικρή, συγκριτικά με το εύρος του FFT, ζώνη στην συχνότητα παρατηρούνται τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικές ομάδες κορυφών που έχουν τα χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν στην περιοχή 316 kHz. Υπάρχει μετατόπιση στην συχνότητα, που παρατηρείται με συνέπεια σε όλες τις μετρήσεις. Επίσης είναι σημαντικό ότι η μετατόπιση αυτή έχει τον ίδιο προσανατολισμό προς αυξημένες συχνότητες. Αυτό σε συνδυασμό με το ότι όλες αυτές οι περιοχές είναι αυτές με τις μεγαλύτερες συνεισφορές στο πλάτος και για τα δύο σετ, ισχυροποιεί τις ενδείξεις που παρέχονται για την αλλαγή συμπεριφοράς των σημάτων που σχετίζεται με την αλλαγή διέγερσης. Συγκεκριμένα η ομάδα κορυφών στην περιοχή 1400 φαίνεται πως είναι η δεύτερη μεγαλύτερη σε συνεισφορά πλάτους ενώ η περιοχή στα 1800 είναι η τρίτη μεγαλύτερη σε συνεισφορά.

Σχήμα 2.6.6: Φάσματα πλάτους των δύο σετ μετρήσεων (θορύβου και διέγερσης), στις χαμηλές συχνότητες

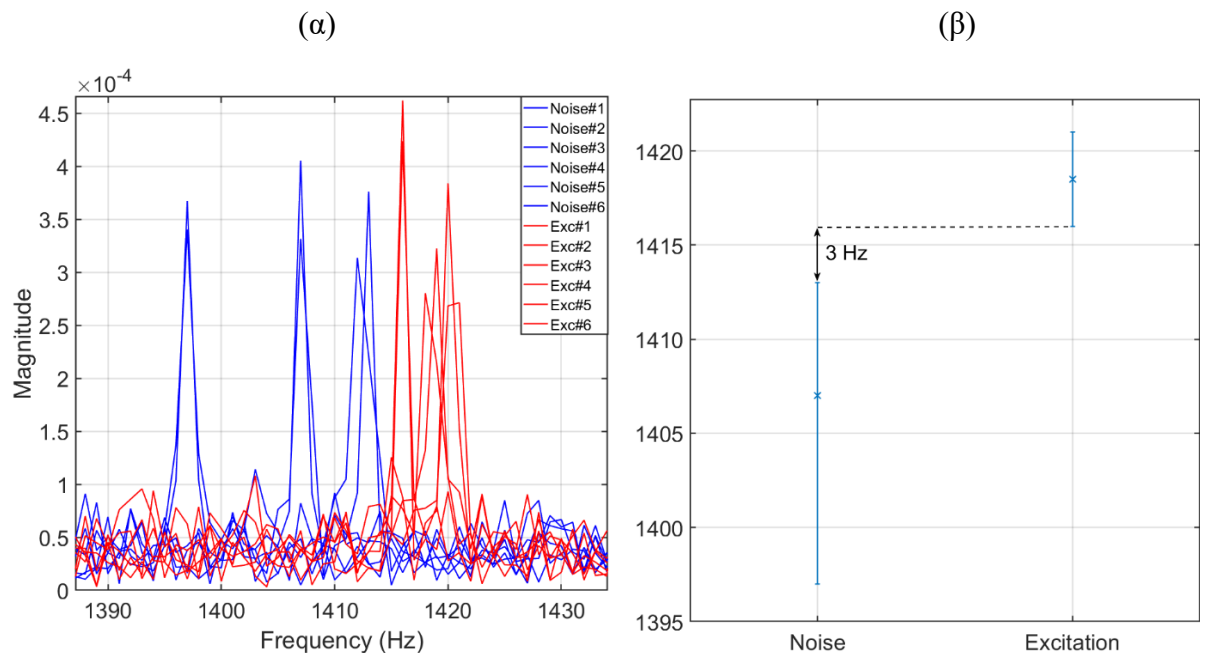


Αυτό το εύρος κορυφών στην συχνότητα μπορεί να παρουσιαστεί και με την μορφή διαστημάτων στην συχνότητα με την χρήση των διαγραμμάτων errorbars του MATLAB. Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για τα δυο διαφορετικά προφίλ που συγκρίνονται παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.7 και στο Σχήμα 2.6.8. Στα δύο σχήματα έχουν ληφθεί οι τιμές των κορυφών όλων των μετρήσεων που παρουσιάζονται στις περιοχές ενδιαφέροντος 316 kHz και 1400 Hz. Οι μεσαίες τιμές αποτελούν τις διάμεσες (median) τιμές του κάθε διαστήματος ενώ τα άνω και κάτω άκρα είναι η μεγαλύτερη και η μικρότερη αντίστοιχα τιμή συχνότητας στην οποία παρατηρείται κορυφή για κάθε δεδομένο προφίλ. Όπως φαίνεται και στα σχήματα είναι πιο εμφανής η διαφορά μεταξύ των διαστημάτων εμφάνισης κορυφών. Και στις δυο περιπτώσεις που παρουσιάζονται μπορούν να διακριθούν τα διαφορετικά διαστήματα λόγω της απόστασης μεταξύ της μεγαλύτερης σε τιμή συχνότητας μέτρηση του θορύβου και της μικρότερης σε τιμή συχνότητας μέτρηση της διέγερσης.

Σχήμα 2.6.7: (α) Οι κορυφές των μετρήσεων των δύο προφίλ στην συχνότητα (περιοχή 316 kHz) (β) Διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για την συγκεκριμένη περιοχή στην συχνότητα



Σχήμα 2.6.8: (α) Οι κορυφές των μετρήσεων των δύο προφίλ στην συχνότητα (περιοχή 1400Hz) (β) Διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για την συγκεκριμένη περιοχή στην συχνότητα

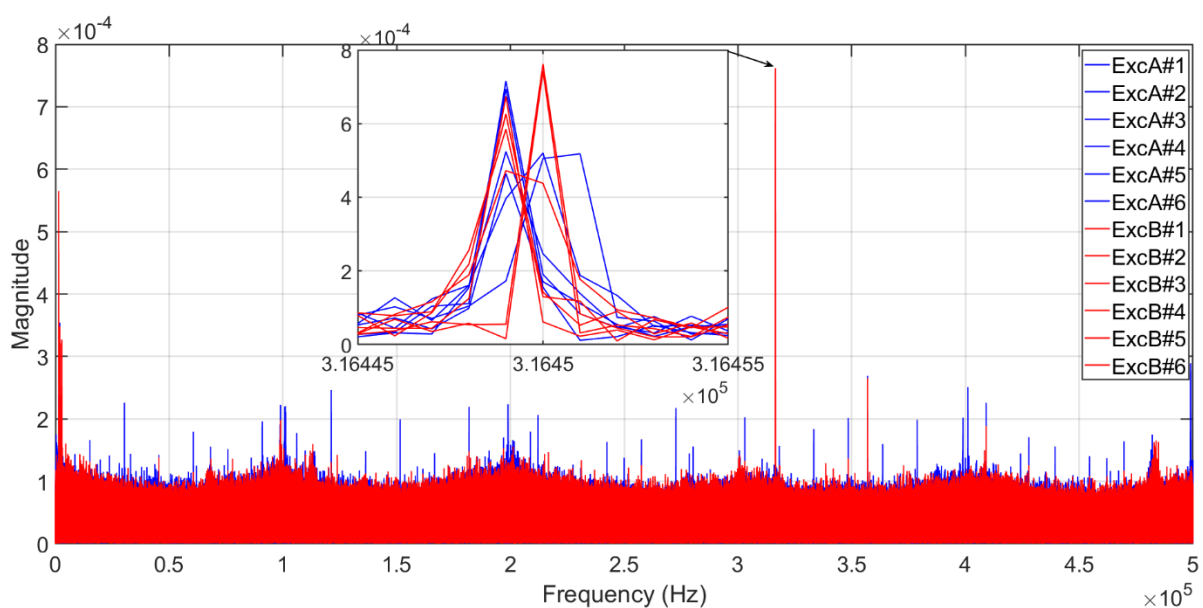


Σε αυτό το σημείο ορίζεται πλέον ένας τρόπος να συγκριθούν τα σήματα μέσω της συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα φάσματα τους. Αρχικά γίνεται σύγκριση των φασμάτων μεταξύ του συνόλου των μετρήσεων των δύο διαφορετικών συνθηκών προέλευσης. Στην

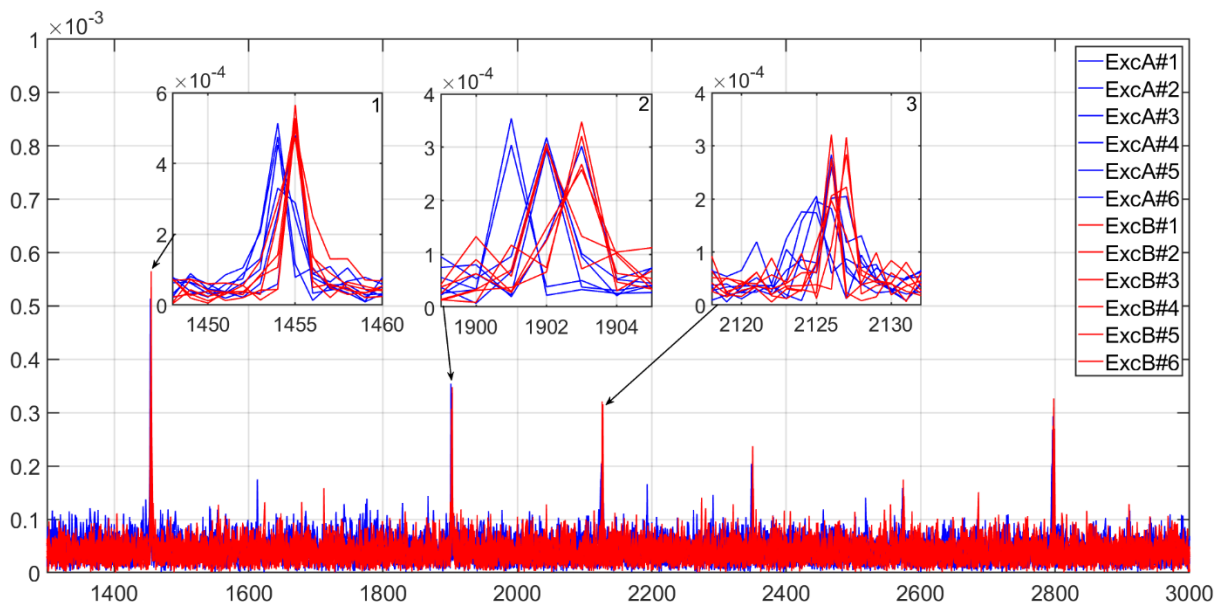
συνέχεια η ένδειξη που παρέχεται για διαφοροποίηση μεταξύ των δύο (μετατοπίσεις κορυφών στην συχνότητα), εκφράζεται με την μορφή διαστημάτων εύρους μεταβολής κορυφών για να αποσαφηνίζεται αν οι κορυφές των σημάτων διαφορετικής προέλευσης ανήκουν σε ένα ξεχωριστό εύρος στην συχνότητα και δεν επικαλύπτονται μεταξύ τους. Εφόσον οι περιοχές ενδιαφέροντος στην συχνότητα που παρατηρήθηκε το φαινόμενο παρουσιάζουν κορυφές για κάθε δεδομένη συνθήκη διέγερσης που διερευνάται, υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ τους. Θα πρέπει λοιπόν το καινούργιο περιεχόμενο τους στην συχνότητα να μπορεί να συγκριθεί με τις προηγούμενες παρατηρήσεις. Σε περίπτωση που αυτό είναι δυνατό, με αυτές τις συγκρίσεις δίνεται μια πρώτη η εικόνα της ικανότητας ανίχνευσης του αισθητηρίου, ανάλογα με το αν επικαλύπτονται τα διαστήματα κορυφών από μετρήσεις διαφορετικής προέλευσης η όχι.

Είναι αντιληπτό ότι σε ορισμένες συγκρίσεις μεταξύ σημάτων διαφορετικής προέλευσης δεν συμβαίνει τα πράγματα να είναι κάθε φορά τόσο ξεκάθαρα. Όπως για παράδειγμα στις συγκρίσεις που γίνονται παρακάτω μεταξύ μετρήσεων δυο διαφορετικών διεγέρσεων που λήφθηκαν που έχουν πιο μεγάλες συχνότητες διέγερσης. Παρατηρείται ότι υπάρχει συνέπεια για τα φαινόμενα μετατόπισης που παρατηρήθηκαν, καθώς οι μετρήσεις με πιο μικρή συχνότητα διέγερσης (μπλε χρώμα) δείχνουν μια γενική τάση να παρουσιάζουν κορυφές λίγο πιο χαμηλά στην συχνότητα από αυτές που αποτελούνται από προφίλ με μεγαλύτερη συχνότητα (κόκκινο χρώμα). Δεν φαίνεται όμως ξεκάθαρα αυτή η μετατόπιση ούτε μπορεί να υποστηριχθεί ότι υπάρχει σε όλες τις περιοχές. Στις μεγαλύτερες κορυφές, στην περιοχή 316 kHz, παρατηρείται ότι οι κορυφές των προφίλ αλληλεπικαλύπτονται στο ίδιο περίπου εύρος συχνότητας. Στις πιο χαμηλές συχνότητες πάλι δεν είναι ξεκάθαρο αν υπάρχει διάκριση μεταξύ των κορυφών των δύο προφίλ. Αυτή η σύγχυση οφείλεται εν μέρη και στο φαινόμενο φασματικής διαρροής (spectral leakage) που προκαλείται από τον διαμοιρασμό του πλάτους σε κοντινές τιμές στην συχνότητα εξαιτίας των στρογγυλοποιήσεων που γίνονται εξαιτίας της ανάλυσης συχνότητας (frequency resolution) του FFT.

Σχήμα 2.6.9: Φάσματα πλάτους δύο διαφορετικών διεγέρσεων στα οποία δεν είναι εμφανής η διάκριση μεταξύ των κορυφών



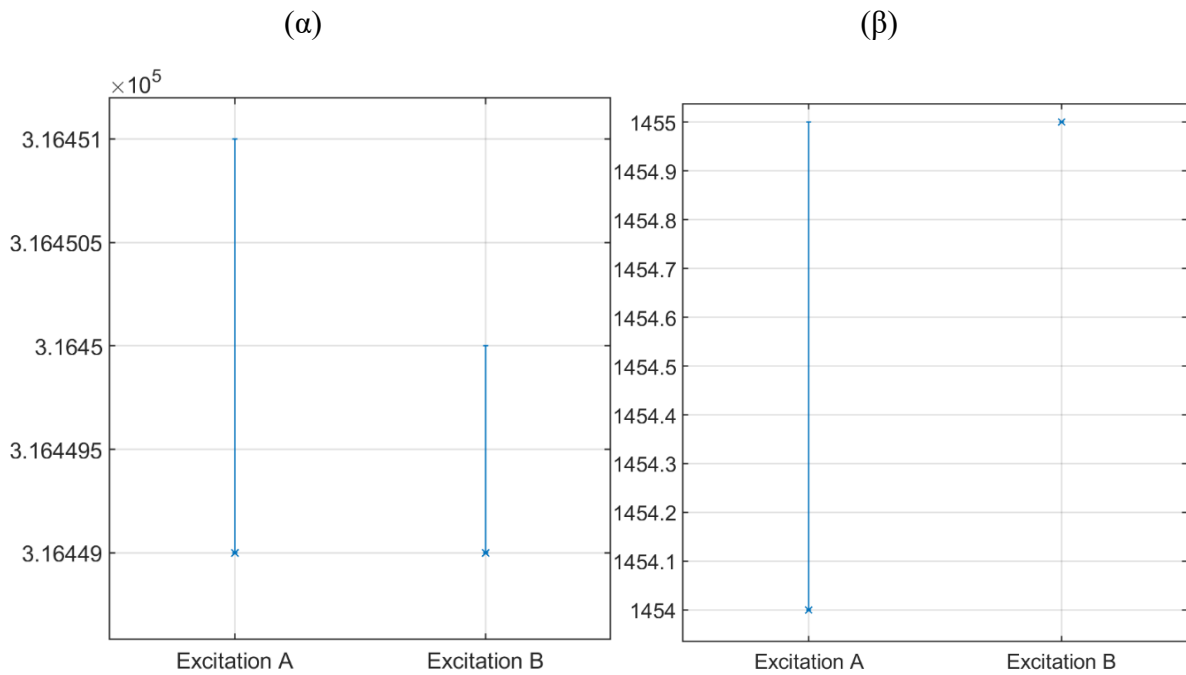
Σχήμα 2.6.10: Φάσματα πλάτους δύο διαφορετικών διεγέρσεων στα οποία δεν είναι εμφανής η διάκριση μεταξύ των κορυφών (χαμηλές συχνότητες)



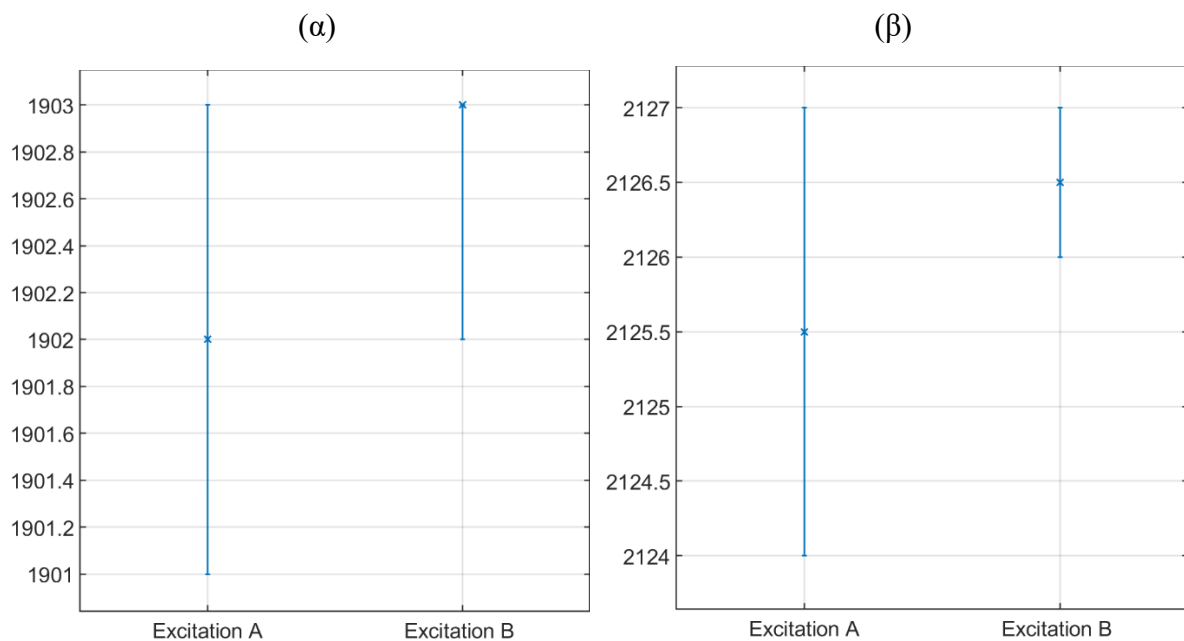
Αυτά τα συμπεράσματα ενισχύονται με την παρατήρηση των διαγραμμάτων μεταβολής εύρους κορυφών που παρουσιάζονται στην συνέχεια. Φαίνεται πως στην περιοχή 316 kHz εκτός από την απουσία μετατόπισης προς αυξημένες συχνότητες και την αλληλοεπικάλυψη των διαστημάτων φαίνεται πως το διάστημα της διέγερσης με μεγαλύτερη συχνότητα είναι πιο χαμηλά από το διάστημα της διέγερσης με μικρότερη συχνότητα. Φυσικά δεν μπορεί να στηριχθεί με βεβαιότητα πως πηγαίνει σε χαμηλότερες συχνότητες με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης, αφού είναι φανερό πως τα διαστήματα έχουν μειωθεί πολύ και έχουν φτάσει στο ελάχιστο όριο ανάλυσης (Frequency Resolution) του FFT (1 Hz), οπότε αυτή η μικρή μετατόπιση μπορεί να είναι προϊόν στρογγυλοποιήσεων. Και στις υπόλοιπες περιοχές υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των διαστημάτων, ενώ στην περιοχή 1400 Hz φαίνεται πως στην δεύτερη διέγερση όλες οι κορυφές πέφτουν επάνω στην ίδια τιμή στην συχνότητα, φαινόμενο που οφείλεται σε αυτές τις στρογγυλοποιήσεις. Είναι εμφανές πάντως ότι οι κορυφές έχουν φτάσει σε πολύ κοντινό σημείο μεταξύ τους και αυτό δυσχεραίνει την δυνατότητα διάκρισης που προκύπτει από την σύγκριση των φασμάτων πλάτους στην συχνότητα και από τα διαστήματα ευρών των κορυφών που λαμβάνονται.

Επιπλέον με την παρατήρηση των διαγραμμάτων αυτών δεν υπάρχει δυνατότητα ποσοτικοποίησης της ικανότητας διάκρισης διαφορετικών συνθηκών φόρτισης από το αισθητήριο, ακόμα και στις περιπτώσεις που παρέχεται ξεκάθαρη ένδειξη ότι τα διαστήματα κορυφών που προκύπτουν είναι διακριτά μεταξύ τους. Ενώ στις περιπτώσεις που δεν είναι διακριτά δεν δίνει την δυνατότητα να απορριφθεί η όχι η ύπαρξη διάκρισης. Για την ποσοτικοποίηση της, προκύπτει η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης και ανάλυσης των διαστημάτων αυτών που προέκυψαν από τα φάσματα των μετρήσεων.

Σχήμα 2.6.11: Διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για τις περιοχές ενδιαφέροντος (α) 316 kHz και (β) 1400 Hz



Σχήμα 2.6.12: Διαγράμματα μεταβολής εύρους εμφάνισης κορυφών για τις περιοχές ενδιαφέροντος (α) 1800 kHz και (β) 2100 Hz



2.6.1 Σύνοψη

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο τα εργαλεία που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες χρησιμοποιούνται για την σύγκριση μεταξύ των σημάτων. Τα δεδομένα δεν μπορούν να συγκριθούν στο πεδίο του χρόνου εξαιτίας του θορύβου που υπάρχει στα σήματα. Η αυτοσυσχέτιση δίνει μια ιδέα για την ύπαρξη των σχέσεων εξάρτησης μεταξύ των δειγμάτων κάθε χρονοσειράς, αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύγκριση διαφορετικών σημάτων. Τελικά συγκρίνονται τα φάσματα των μετρήσεων που παρουσιάζουν διαφορές όταν αυτά προέρχονται από θόρυβο και όταν αυτά προέρχονται από διέγερση. Αυτές οι διαφορές εκφράζονται με μετατοπίσεις στην συχνότητα που πραγματοποιούν ορισμένες κορυφές με σημαντική συνεισφορά πλάτους στα φάσματα των μετρήσεων, και αποτελούν την πιο βέβαιη ένδειξη για την ικανότητα διάκρισης του αισθητηρίου μεταξύ διαφορετικών προφίλ διέγερσης. Αυτές οι μετατοπίσεις μπορούν να εκφραστούν ως διαστήματα για το σύνολο των μετρήσεων μιας δεδομένης διέγερσης. Αυτά τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών συγκρίνουν τα διαστήματα των δυο διεγέρσεων, και ανάλογα με το αν υπάρχει επικάλυψη ή όχι στα διαστήματα κρίνεται αν μπορεί το αισθητήριο να διακρίνει τις δύο διεγέρσεις. Στις περιπτώσεις που υπάρχει επικάλυψη αυτή η σύγκριση δεν είναι αρκετή για να αποσαφηνίσει αν υπάρχει διάκριση ή όχι. Γενικά η μέθοδος σύγκρισης των διαγραμμάτων προσφέρει μια πρώτη ένδειξη για την συμπεριφορά των σημάτων, αλλά δεν επαρκεί για να βγει ένα ασφαλές συμπέρασμα για την ικανότητα διάκρισης του αισθητηρίου.

2.7 Ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων – Στατιστικοί έλεγχοι υποθέσεων

Τα δεδομένα που λήφθηκαν και εξετάστηκαν πρώτα με την απεικόνιση των φασμάτων πλάτους FFT στην συχνότητα, δίνουν ενδείξεις που υποστηρίζουν τα ευρήματα που έχουν προκύψει στην μελέτη που προηγήθηκε πάνω στην ίδια διάταξη (Σουλτάνα, 2022). Δηλαδή ότι με την αύξηση του προφίλ διέγερσης παρατηρείται μετατόπιση προς αυξημένες συχνότητες ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το εύρος στην συχνότητα που προκύπτουν οι κορυφές για κάθε δεδομένο προφίλ. Αυτό εκφράστηκε πιο απλά με την μεταβολή ευρών των κορυφών κάθε δεδομένης διέγερσης στην συχνότητα.

Η σύγκριση των φασμάτων πλάτους των μετρήσεων στην συχνότητα παρέχει τις ενδείξεις για διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών των σημάτων. Προφανώς όμως υπάρχουν περιορισμοί όπως αυτοί που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Εφόσον η μέθοδος ανάλυσης του φασματικού περιεχομένου δεν μπορεί να δώσει σαφείς απαντήσεις ως προς την επιτυχία ανίχνευσης των διαφορετικών προφίλ, προκύπτει η ανάγκη περαιτέρω συγκρίσεων με άλλες μεθόδους. Συγκεκριμένα προκύπτει η ανάγκη ποσοτικοποίησης της διαφοράς μεταξύ των προφίλ με έναν τρόπο που να εξασφαλίζει ότι οι ενδείξεις που λήφθηκαν έχουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο βεβαιότητας.

Για την ποσοτικοποίηση της διαφοράς μεταξύ των διαστημάτων των οποίων παρατηρήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα είναι απαραίτητη η χρήση στατιστικών εργαλείων. Με την επαλήθευση των ενδείξεων με στατιστικές μεθόδους επιτυγχάνεται παγίωση των αποτελεσμάτων και επομένως η χαρτογράφηση της ικανότητας ανίχνευσης του αισθητηρίου θα βασίζεται σε δεδομένα με ορισμένη στατιστική βεβαιότητα.

Θα παρουσιαστούν τα στατιστικά εργαλεία που λήφθηκαν υπόψιν και τα κριτήρια που οδήγησαν στην επιλογή.

2.7.1 Στατιστικοί Έλεγχοι Υποθέσεων

Για να διερευνηθεί η αλήθεια μιας υπόθεσης στην στατιστική χρησιμοποιούνται ορισμένες μεθοδολογίες που ονομάζονται στατιστικοί έλεγχοι και οι οποίοι χρησιμοποιούνται με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα να εξαχθούν λανθασμένα συμπεράσματα από μία μελέτη.

Στατιστικές αποφάσεις ορίζονται τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που προσδίδονται στον πληθυσμό μιας μεταβλητής και βασίζονται στην μελέτη ενός ή περισσότερων δειγμάτων. Για να είναι μία τέτοια απόφαση αληθής πρέπει το μέγεθος των δειγμάτων να είναι το μεγαλύτερο δυνατό και να εξετασθούν όσο περισσότερα δείγματα είναι δυνατόν για να μπορεί εφαρμοστεί το κεντρικό οριακό θεώρημα στο οποίο στηρίζονται οι στατιστικοί έλεγχοι υποθέσεων. Για να ελεγχθεί μια στατιστική απόφαση εισάγεται η έννοια της στατιστικής υπόθεσης (Λιώκη-Λειβαδά & Ασημακόπουλος, 2010).

Στατιστικές υποθέσεις ονομάζονται οι υποθέσεις σχετικά με τον πληθυσμό από τον οποίο θεωρείται ότι προήλθε μια μεταβλητή, ο πληθυσμός και προέρχονται από την μελέτη ενός δείγματος της μεταβλητής αυτής. Οι συγκρίσεις μεταξύ των στατιστικών παραμέτρων του δείγματος και των αντίστοιχων παραμέτρων του πληθυσμού, οι συγκρίσεις στατιστικών παραμέτρων μεταξύ δειγμάτων είναι μερικές από τις υποθέσεις που μπορούν να γίνουν (Λιώκη-Λειβαδά & Ασημακόπουλος, 2010).

Για την διεξαγωγή ενός στατιστικού ελέγχου υπόθεσης είναι αναγκαίος ο ορισμός δυο υποθέσεων της H_0 και της H_1 . Η αρχική υπόθεση συμβολίζεται με H_0 , ονομάζεται μηδενική υπόθεση (null hypothesis). Αντίστοιχα ορίζεται μια εναλλακτική υπόθεση (alternative hypothesis) που συμβολίζεται με H_1 η οποία είναι πάντα αντίθετη από την αρχική. Αυτές οι υποθέσεις είναι απαραίτητες για την διεξαγωγή ενός στατιστικού ελέγχου και πριν εξετασθεί το δείγμα της μεταβλητής του δείγματος αυτές πρέπει να είναι σαφώς ορισμένες. (Λιώκη-Λειβαδά & Ασημακόπουλος, 2010)

Κατά την διεξαγωγή στατιστικών ελέγχων, ενδεχόμενα είναι τα σφάλματα που μπορεί να υπάρξουν στην απάντηση που δίνεται στην στατιστική υπόθεση, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα σφάλματα τύπου I, τα οποία αναφέρονται στο ενδεχόμενο να απορριφθεί η H_0 ενώ είναι αληθής, και σφάλματα τύπου II που αφορούν το ενδεχόμενο να γίνει δεκτή η H_0 ενώ είναι ψευδής.

Η στάθμη σημαντικότητας α αντιπροσωπεύει την μέγιστη πιθανότητα να γίνει απορριφθεί η H_0 , ενώ είναι αληθής. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τιμή είναι $\alpha = 0.05$. Όσο μικρότερη τιμή λαμβάνει η στάθμη σημαντικότητας τόσο ελαχιστοποιείται η πιθανότητα σφάλματος τύπου II

αφού οι υποθέσεις H_0 και H_1 είναι αντίθετα ενδεχόμενα. (Λιώκη-Λειβαδά & Ασημακόπουλος, 2010)

Οι έλεγχοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους παραμετρικούς και τους μη-παραμετρικούς ελέγχους, ανάλογα με το αν προϋποθέτουν ότι τα δείγματα προέρχονται από πληθυσμούς με κανονική κατανομή ή όχι. Σε περιπτώσεις που δεν είναι γνωστό, ή δεν προέρχονται από κανονικές κατανομές τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν μη-παραμετρικοί έλεγχοι. Αυτοί δεν κάνουν υποθέσεις για την κατανομή από την οποία προέρχονται τα δείγματα, αλλά πρέπει να χρησιμοποιηθούν μόνο σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η χρήση παραμετρικών ελέγχων καθώς εισάγουν μεγαλύτερη πιθανότητα σφάλματος τύπου II. (Λιώκη-Λειβαδά & Ασημακόπουλος, 2010)

Στην περίπτωση της στατιστικής ανάλυσης για τα συγκεκριμένα δεδομένα, λόγω του μικρού αριθμού δειγμάτων των οποίων είναι διαθέσιμα, δεν είναι δυνατό να καθοριστεί αν τα δεδομένα ακολουθούν κανονικές κατανομές. Γι' αυτό είναι αναγκαία η χρήση κάποιου μη-παραμετρικού ελέγχου, ο οποίος να εξετάζει αν τα δείγματα που εισάγονται σε αυτόν προέρχονται από ανεξάρτητες κατανομές ή αν προέρχονται από την ίδια κατανομή.

Αυτός ο έλεγχος θα εφαρμοσθεί στα διαστήματα των κορυφών στην συχνότητα που προέκυψαν από την εξέταση των φασμάτων πλάτους του FFT των σημάτων. Καθώς οι διεγέρσεις με αυξημένο προφίλ δεν παρουσίασαν καινούργιο περιεχόμενο στην συχνότητα, η διερεύνηση της διαφοροποίησης μεταξύ των μετρήσεων διαφορετικών συνθηκών, μέσω των διαστημάτων κορυφών που αυτά παρουσιάζουν σε ορισμένες περιοχές στην συχνότητα, είναι η μόνη επιλογή για την στατιστική εδραίωση των ενδείξεων που παρουσιάστηκαν με τις οπτικές συγκρίσεις και για την επιβεβαίωση λειτουργίας του αισθητηρίου σε διεγέρσεις με τα συγκεκριμένα προφίλ.

Υπάρχουν διάφοροι μη-παραμετρικοί έλεγχοι οι οποίοι εξετάζουν αν δύο δείγματα προκύπτουν από τον ίδιο πληθυσμό. Οι έλεγχοι καλής προσαρμογής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση μεταξύ των κατανομών δύο δειγμάτων. Ο μη-παραμετρικός έλεγχος καλής προσαρμογής που αντιστοιχεί στον έλεγχο χ^2 είναι ο έλεγχος των Kolmogorov-Smirnov, ο οποίος μπορεί να εφαρμοσθεί για την σύγκριση της κατανομής ενός δείγματος με μια θεωρητική κατανομή, αλλά και για την σύγκριση μεταξύ των κατανομών δύο δειγμάτων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μικρά δείγματα, όπως και στην συγκεκριμένη περίπτωση. Αυτός ο έλεγχος υπολογίζει την μέγιστη απόλυτη διαφορά μεταξύ των αθροιστικών συχνοτήτων των δειγμάτων. Η αρχική υπόθεση είναι ότι τα δείγματα προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό και η εναλλακτική ότι προέρχονται από διαφορετικούς πληθυσμούς. (Λιώκη-Λειβαδά & Ασημακόπουλος, 2010)

Οι μη παραμετρικοί έλεγχοι των Mann - Whitney και των Kruskal-Wallis εφαρμόζονται σε δείγματα τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Ο έλεγχος των Mann-Whitney

χρησιμοποιείται για την σύγκριση δυο δειγμάτων ενώ ο έλεγχος των Kruskal-Wallis μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση δύο ή και περισσότερων δειγμάτων. (Λιώκη-Λειβαδά & Ασημακόπουλος, 2010)

2.7.2 Έλεγχος Kruskal-Wallis

Λόγω της ικανότητας του ελέγχου Kruskal-Wallis να συγκρίνει παραπάνω από δύο δείγματα κάθε φορά, επιλέχθηκε αυτός ο έλεγχος. Ο έλεγχος Kruskal-Wallis χρησιμοποιείται ως εναλλακτική του παραμετρικού ελέγχου ANOVA (τεστ ανάλυσης της διασποράς). Αντί να χρησιμοποιηθούν οι τιμές των δεδομένων, σε αυτόν τον έλεγχο όλα τα δεδομένα από όλα τα δείγματα τοποθετούνται σε αύξουσα σειρά και κάθε ένα αντιστοιχείται με τον αριθμό κατάταξης του. Με αυτόν τον τρόπο δεν γίνονται υποθέσεις για τις στατιστικές παραμέτρους των δεδομένων και έτσι ο έλεγχος αυτός δεν προϋποθέτει ότι οι πληθυσμοί των δειγμάτων ακολουθούν κανονική κατανομή. Ο έλεγχος αυτός ουσιαστικά διερευνά αν οι ομάδες που συγκρίνονται μεταξύ τους έχουν τον ίδιο διάμεσο (median), χωρίζοντας τους αριθμούς κατάταξη των δειγμάτων κάθε διαφορετικής ομάδας σε διαστήματα και υπολογίζοντας την στατιστική του ελέγχου H . (Lomuscio, 2021)

Χρησιμοποιείται για την σύγκριση μεταξύ τριών ή περισσότερων ανεξάρτητων ομάδων δεδομένων αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την σύγκριση μεταξύ δύο ομάδων, με το κάθε ένα να έχει παραπάνω από 5 δείγματα. Ειδικά όταν κάθε ομάδα έχει παραπάνω από 5 δείγματα η στατιστική H του τεστ προσδιορίζει ένα σημείο πάνω στην καμπύλη της χ^2 -κατανομής οπότε ο έλεγχος πραγματοποιείται με την βοήθεια των πινάκων των κρίσιμων τιμών της χ^2 -κατανομής. Η τιμή του τεστ χρησιμοποιεί τους αριθμούς κατάταξης με βάση την παρακάτω σχέση:

$$H = \frac{11}{N \cdot (N+1)} \sum_{i=1}^k \left(\frac{R_i^2}{N_i} \right) - 3 \cdot (N + 1) \quad (2.14)$$

Με N το συνολικό μέγεθος όλων των δειγμάτων, k τον αριθμό των ομάδων που συγκρίνονται και N_i είναι το μέγεθος της ομάδας i .

Αυτή η στατιστική H χρησιμοποιείται και συγκρίνεται με μια κρίσιμη τιμή που καθορίζεται από την χ^2 -κατανομή. Αν η τιμή της H είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή τότε απορρίπτεται η H_0 , αλλιώς αν η H είναι μικρότερη από την κρίσιμη τότε γίνεται αποδεκτή.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε συγκρίσεις με περισσότερες από δύο ομάδες δειγμάτων το τεστ μπορεί να απορρίψει την αρχική υπόθεση, αλλά δεν καθορίζει ποια ήταν η ομάδα που προέρχεται από διαφορετική κατανομή.

Στο παράδειγμα που δίνεται παρακάτω εξετάζονται τρία διαφορετικά εμβόλια ως προς τα αντισώματα που τους δημιούργησαν σε ομάδες ατόμων. Δίνονται οι τιμές των αντισωμάτων που παρήγαγε κάθε άτομο. Αντικείμενο του ελέγχου είναι να βρεθεί αν κάποιο από τα τρία διαφορετικά εμβόλια προκαλεί διαφορετικό αριθμό αντισωμάτων από τα άλλα. (Lomuscio, 2021)

Έχουμε τις τρεις ομάδες που δέχτηκαν τα διαφορετικά εμβόλια:

Εμβόλιο Α	Εμβόλιο Β	Εμβόλιο Γ
1242	849	312
761	352	67
349	483	531
858	1138	288
457	252	186
552	485	211

Διατυπώνεται η αρχική υπόθεση και η εναλλακτική υπόθεση του ελέγχου.

H₀: Και τα τρία εμβόλια δημιουργούν τον ίδιο αριθμό αντισωμάτων στους ασθενείς

H₁: Τουλάχιστον ένα εμβόλιο δημιουργεί διαφορετικό αριθμό αντισωμάτων

Ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά τα δείγματα όλων των ομάδων. Σε περίπτωση που υπήρχαν ίδιες τιμές στα δεδομένα, οι τιμές που ισούνται με άλλες λαμβάνει αριθμό κατάταξης που αποτελείται από το άθροισμα των αριθμών κατάταξης που θα έπαιρναν αν δεν ήταν ίσες, δια το πλήθος των συγκεκριμένων αριθμών. Π.χ. αν οι πρώτες δύο τιμές ήταν ίσες θα έπαιρναν ίδιο αριθμό κατάταξης που θα ήταν ίσος με $(1+2)/2$.

Η πρώτη εργασία για τον υπολογισμό της στατιστικής H είναι η κατάταξη των δειγμάτων σε αύξουσα σειρά με σκοπό την χρήση των αριθμών κατάταξης τους. Στον επόμενο πίνακα δίνεται η κατάταξη των δεδομένων του παραδείγματος.

Κατάταξη	Αντισώματα	Εμβόλιο
1	67	Γ
2	186	Γ
3	211	Γ
4	252	B
5	288	Γ
6	312	Γ
7	349	A
8	352	B
9	457	A
10	483	B
11	485	B
12	531	Γ
13	552	A
14	761	A
15	849	B
16	858	A
17	1138	B
18	1242	A

Ακολουθεί ο πίνακας με τις διαφορετικές ομάδες και τους αριθμούς κατάταξης με το άθροισμα αυτών για κάθε ομάδα στην τελευταία στήλη.

Εμβόλιο A	Εμβόλιο B	Εμβόλιο Γ
1242 (18)	849 (6)	312 (15)
761 (14)	352 (1)	67 (8)
349 (7)	483 (12)	531 (10)
858 (16)	1138 (5)	288 (17)
457 (9)	252 (2)	186 (4)
552 (13)	485 (3)	211 (11)
77	65	29

Για τον υπολογισμό της τιμής H εισάγουμε τα δεδομένα στην σχέση 2.5, όπου $N = 18$, $k = 3$, $R_i = 77, 65, 29$ $N_i = 6, 6, 6$

$$H = \frac{12}{18(18+1)} \cdot \left[\frac{77^2}{6} + \frac{65^2}{6} + \frac{29^2}{6} \right] - 3(18-1) \Rightarrow$$

$$H = 7.29$$

Συγκρίνουμε αυτήν την τιμή με την κρίσιμη τιμή της καμπύλης χ^2 για βαθμούς ελευθερίας $df = k - 1 = 3 - 1 = 2$. Στον αντίστοιχο πίνακα η κρίσιμη τιμή του χ^2 είναι $\chi^2(2) = 5.99$, οπότε $H > \chi^2(2)$, άρα μπορούμε να απορρίψουμε την αρχική υπόθεση.

Επομένως τουλάχιστον μια ομάδα προέρχεται από διαφορετικό πληθυσμό από τις υπόλοιπες.

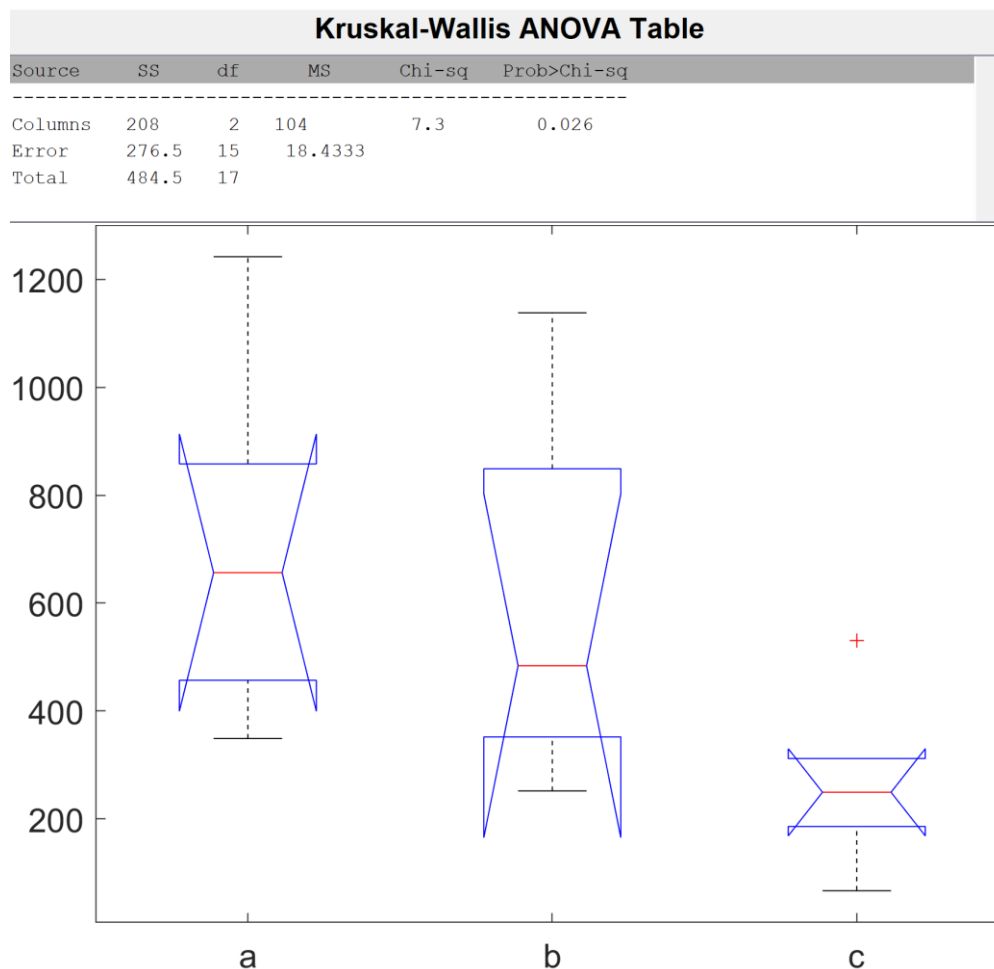
Στο MATLAB® η αντίστοιχη διαδικασία γίνεται αυτόματα για την σύγκριση μεταξύ δύο η περισσότερων ομάδων με την εντολή `kruskalwallis`. Επιπλέον δίνεται αυτόματα η τιμή

σημαντικότητας p . Αυτή η τιμή εκφράζει την πιθανότητα να παρατηρηθούν τιμές τουλάχιστον τόσο ακραίες όσο αυτή που παρατηρήθηκε όταν είναι αληθής η αρχική υπόθεση.

Πολύ μικρές τιμές p (μικρότερες από την τιμή σημαντικότητας που επιλέγεται κάθε φορά) υποδηλώνουν ότι η τιμή που παρατηρήθηκε είναι πολύ δύσκολο να παρατηρηθεί σε περίπτωση που ισχύει η αρχική υπόθεση. Οπότε η σύγκριση και η απόρριψη η αποδοχή της αρχικής υπόθεσης γίνεται πιο απλή αφού συγκρίνεται κατευθείαν η τιμή σημαντικότητας p με την στάθμη σημαντικότητας.

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα το MATLAB[®] δίνει τιμή $p = 0.026$, και τιμή στατιστικής $H=7.3$, τιμές οι οποίες συμφωνούν με τους υπολογισμούς που έγιναν μέσω της σχέσης 2.5.

Σχήμα 2.7.1: Πίνακας με στοιχεία και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων ελέγχου Kruskal-Wallis της σύγκρισης στο MATLAB[®]



2.7.3 Συντηρητικότητα του ελέγχου

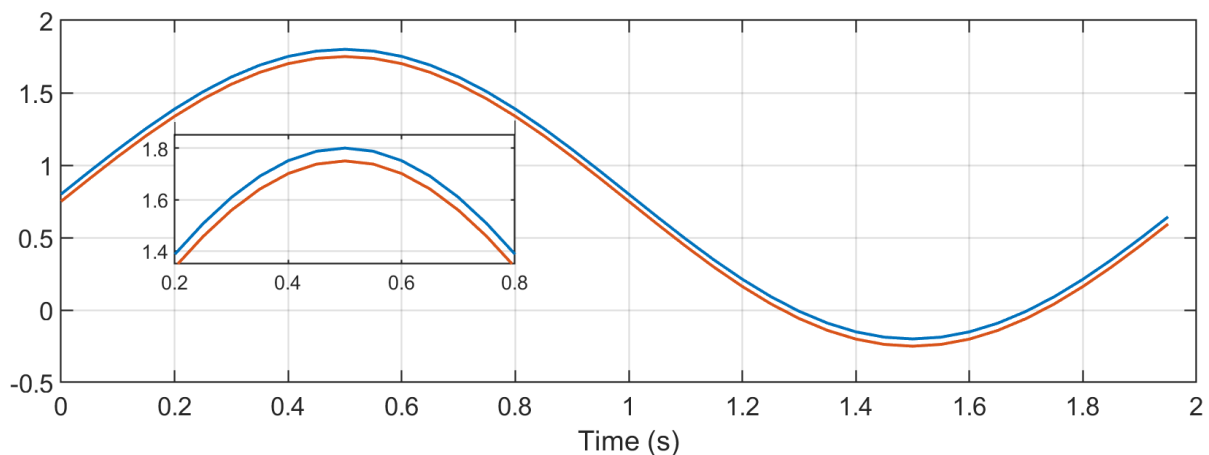
Όπως προαναφέρθηκε οι μη παραμετρικοί έλεγχοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην περίπτωση που δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η κατανομή από την οποία προέρχονται τα δείγματα, διότι ως εργαλεία έχουν το μειονέκτημα ότι δεν είναι τόσο ισχυροί όσο οι αντίστοιχοι

παραμετρικοί έλεγχοι. Αυτή η αδυναμία εκφράζεται με την εισαγωγή μεγαλύτερης πιθανότητας σφάλματος τύπου II, που σημαίνει ότι υπάρχει είναι πιο πιθανό να γίνει αποδεκτή η αρχική υπόθεση ενώ δεν είναι αληθής. Επομένως οι έλεγχοι αυτοί όσο μικραίνει το πλήθος των δειγμάτων που χρησιμοποιείται τόσο πιο συντηρητικοί είναι στην απόρριψη της αρχικής υπόθεσης.

Για να γίνει αντιληπτό αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται το παρακάτω παράδειγμα. Κατασκευάζονται δύο σήματα ημιτονικών κυματομορφών στις οποίες προστίθεται μια σταθερή τιμή και τα οποία λαμβάνονται με έναν ορισμένο αριθμό δειγμάτων, σύμφωνα με τις σχέσεις $x[n] = 0.8 + \sin(2\pi 0.5n)$ και $y[n] = 0.75 + \sin(2\pi 0.5n)$. Επομένως αυτά τα δύο σήματα διαφέρουν μόνο κατά 0.05 στην σταθερή τους τιμή και ενώ παρατηρείται δεν υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των δύο οι τιμές που λαμβάνουν είναι στα ίδια περίπου διαστήματα. Μεταξύ των δύο αυτών σημάτων εφαρμόζεται ο έλεγχος Kruskal-Wallis για να παρατηρηθεί πως αλλάζει η συμπεριφορά του με την αύξηση των δειγμάτων.

Σε πρώτη φάση λαμβάνονται τα δύο σήματα με συχνότητα δειγματοληψίας $f_s = 20\text{Hz}$ διάρκειας 2 δευτερολέπτων και απεικονίζονται στον χρόνο στο Σχήμα 2.7.2. Στην λεπτομέρεια που υπάρχει στο ένθετο του σχήματος, παρατηρείται η χαμηλή ανάλυση των κυματομορφών καθώς τα δείγματα είναι σχετικά μικρού πλήθους. Όταν στις τιμές αυτών των δύο σημάτων εφαρμοσθεί ο έλεγχος Kruskal – Wallis τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα ANOVA που δημιουργεί το MATLAB®, στο ίδιο σχήμα. Η τιμή του ελέγχου για αυτήν την σύγκριση είναι $p = 0.5966$ επομένως με αυτόν τον αριθμό δειγμάτων δεν απορρίπτεται η H_0 , δηλαδή δεν προκύπτει ότι οι τιμές από τα δύο ημίτονα προέρχονται από διαφορετικούς πληθυσμούς.

Σχήμα 2.7.2: Διάγραμμα των δύο ημιτόνων με 40 δείγματα στο χρόνο (πάνω). Πίνακας ANOVA για τον έλεγχο Kruskal-Wallis (κάτω)



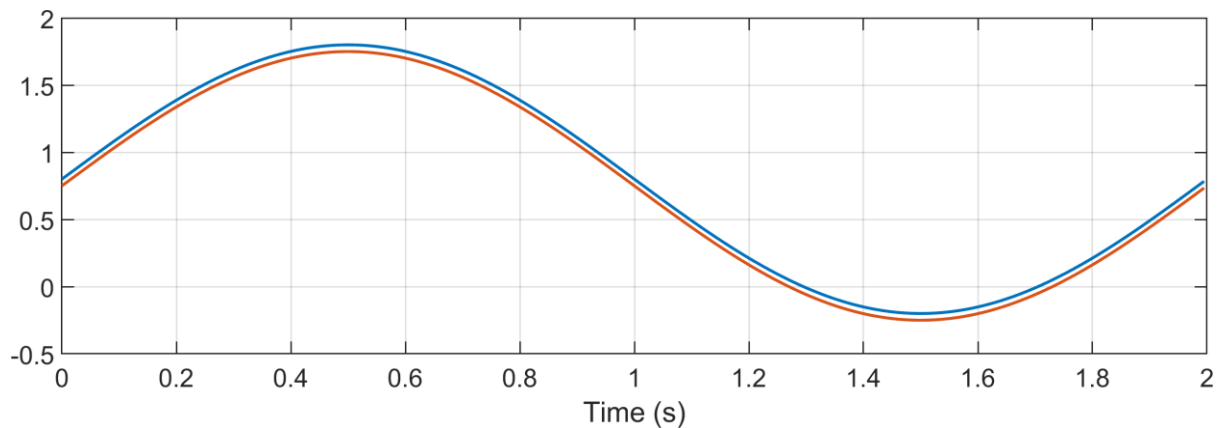
Kruskal-Wallis ANOVA Table

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	151.2	1	151.25	0.28	0.5966
Error	42503.8	78	544.92		
Total	42655	79			

Στην συνέχεια τα δείγματα αυξάνονται σε 100 φορές σε μέγεθος με την αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας σε $f_s = 200$ Hz για την ίδια χρονική διάρκεια. Απεικονίζονται στο πεδίο του χρόνου στο Σχήμα 2.7.3. Εδώ εξαιτίας της μεγάλης αύξησης των δειγμάτων από 40 που ήταν πριν σε 400 δεν παρατηρείται πρόβλημα στην ανάλυση των κυματομορφών.

Η εφαρμογή του ελέγχου Kruskal-Wallis παρουσιάζει μια αντίστοιχα μεγάλη μείωση στην τιμή σημαντικότητας η οποία παίρνει την τιμή $p = 0.1282$. Επομένως δίνεται μια ένδειξη ότι όσο αυξάνονται τα δείγματα των δύο σημάτων η σύγκριση τους με τον έλεγχο Kruskal-Wallis ισχυροποιείται.

Σχήμα 2.7.3: Διάγραμμα των δύο ημιτόνων με 400 δείγματα στο χρόνο (πάνω). Πίνακας ANOVA για τον έλεγχο Kruskal-Wallis (κάτω)



Kruskal-Wallis ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	123554.2	1	123554.2	2.31	0.1282
Error	42542969.8	798	53312		
Total	42666524	799			

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας και παρατηρείται με συνέπεια η μείωση της τιμής σημαντικότητας σε επίπεδα που μπορεί να απορριφθεί η αρχική υπόθεση με βεβαιότητα 0.95% (στάθμη σημαντικότητας $\alpha = 0.05$) αλλά και με βεβαιότητα 0.99% (στάθμη σημαντικότητας $\alpha = 0.01$). παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες του ελέγχου για πλήθος δειγμάτων 800, 1000 και 1600 (η συχνότητα δειγματοληψίας λαμβάνει τιμές $f_s = 400\text{Hz}$, $f_s = 1000\text{Hz}$, $f_s = 800\text{Hz}$).

Η αρχική υπόθεση απορρίπτεται με στάθμη σημαντικότητάς $\alpha = 0.05$ για τις περιπτώσεις με πλήθος δειγμάτων 800 και 1000 ενώ στην περίπτωση 1600 δειγμάτων απορρίπτεται και σε στάθμη σημαντικότητας $\alpha = 0.01$. Επομένως αποδεικνύεται ότι ο έλεγχος όντως είναι πιο ισχυρός με την αύξηση των δειγμάτων.

Σχήμα 2.7.4: Πίνακας ANOVA για τον έλεγχο Kruskal-Wallis για ημίτονα με πλήθος δειγμάτων: (1) 800 δείγματα, (2) 1000 δείγματα, (3) 1600 δείγματα

Kruskal-Wallis ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	970914.6	1	970914.6	4.55	0.033
Error	340362138.9	1598	212992.6		
Total	341333053.5	1599			

Kruskal-Wallis ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	1.89666e+06	1	1896664.1	5.69	0.0171
Error	6.6477e+08	1998	332717.5		
Total	6.66666e+08	1999			

Kruskal-Wallis ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	7.74585e+06	1	7745851.2	9.07	0.0026
Error	2.72292e+09	3198	851444.7		
Total	2.73067e+09	3199			

2.7.4 Σύνοψη

Παρουσιάστηκαν οι στατιστικοί έλεγχοι υπόθεσης, που αποτελούν το εργαλείο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση της ικανότητας ανίχνευσης του αισθητηρίου.

Δόθηκαν οι ορισμοί των απαραίτητων όρων που χρησιμοποιούνται στα τεστ υποθέσεων και παρουσιάστηκαν οι έλεγχοι που είναι κατάλληλοι για την συγκεκριμένη περίπτωση. Ανάμεσα στις επιλογές διαθέσιμων ελέγχων έγινε η επιλογή του ελέγχου Kruskal-Wallis εξαιτίας της δυνατότητας του να εξετάζει περισσότερες από δύο ομάδες δειγμάτων σε κάθε σύγκριση.

Παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η στατιστική του ελέγχου και επιπλέον έγινε μια επίδειξη της συντηρητικότητας του ελέγχου στις περιπτώσεις που είναι μικρό το πλήθος των δειγμάτων.

Κεφάλαιο 3 : Εφαρμογή της Μεθόδου Ανάλυσης στα Δεδομένα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται χρήση της μεθόδου ανάλυσης των δεδομένων που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, πάνω στα δεδομένα που λήφθηκαν για όλα τα διαφορετικά προφίλ διέγερσης της δοκού. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους και προκύπτουν συμπεράσματα για τον χαρακτηρισμό ευαισθησίας του αισθητηρίου.

Σε πρώτη φάση υλοποιήθηκαν 3 σετ δοκιμών, και σε κάθε σετ πραγματοποιούνταν 6 διαφορετικές δοκιμές. Για το πρώτο σετ πραγματοποιήθηκαν 6 δοκιμές χωρίς την παροχή διέγερσης από την γεννήτρια. Σκοπός αυτού του σετ είναι η μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στην διάταξη που θα χρησιμεύσει ως σημείο αναφοράς για την σύγκριση των αλλαγών που θα παρατηρηθούν στα σήματα που προέρχονται από την διέγερση της δοκού.

Στο δεύτερο σετ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την γεννήτρια να δίνει κυματομορφές πλάτους $A = 600 \text{ mV}_{pp}$ και συχνότητας $f = 10 \text{ Hz}$. Αυτή η επιλογή ήταν η ελάχιστη δυνατή συχνότητα που μπορούσε να προσδώσει η γεννήτρια και ήταν σημαντικό να παρατηρηθεί αν θα υπάρξουν αλλαγές στο περιεχόμενο των σημάτων μεταξύ των σετ θορύβου και 10 Hz.

Για το τρίτο σετ πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια να δίνει ίδιο πλάτος και συχνότητα διέγερσης $f = 40 \text{ Hz}$. Αυτή η συχνότητα επιλέχθηκε δοκιμαστικά για να παρατηρηθεί αν υπάρχουν διακριτές διαφορές με τα προηγούμενα σετ. Σκοπός ήταν να βρεθεί ένα βήμα το οποίο να λειτουργεί για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων διέγερσης έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια χαρτογράφηση της λειτουργίας στην συχνότητα.

Σε επόμενο στάδιο, κρίθηκε επιθυμητή η επέκταση των προφίλ διέγερσης, έτσι ώστε να περιλαμβάνουν ένα πιο ευρύ φάσμα συχνοτήτων διέγερσης. Έπειτα από τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις συγκρίσεις των μετρήσεων του πρώτου σετ, και με γνώμονα πάντα την διερεύνηση της ευαισθησίας του αισθητηρίου στην συχνότητα διέγερσης, αποφασίστηκε να ληφθούν περισσότερα σετ μετρήσεων με διαφορετικά προφίλ διέγερσης με αυξανόμενες συχνότητες. Η καλή επιλογή του βήματος 30Hz μεταξύ δεύτερου και τρίτου σετ μετρήσεων της πρώτης δοκιμής οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η επιλογή βήματος στην συχνότητα διέγερσης δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 30Hz ώστε τα διαστήματα που θα προκύψουν από τις ομάδες κορυφών να μην απέχουν πολύ μεταξύ τους, γεγονός που θα σήμαινε ότι υπήρχε χώρος μεταξύ των διαστημάτων κορυφών και ότι δεν έγινε καλή διερεύνηση της ευαισθησίας καθώς λήφθηκαν λίγα δεδομένα.

Γι' αυτούς τους λόγους επιλέχθηκε βήμα 15Hz ανά προφίλ διέγερσης, ξεκινώντας από τα 55Hz και φτάνοντας στα 160Hz. Με αυτό το εύρος συχνοτήτων δίνεται μια ικανοποιητική εικόνα

για την συμπεριφορά του αισθητηρίου σε σενάρια φόρτισης τα οποία αντιστοιχούν σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Αυτό το εύρος συχνότητας αντιστοιχείται τιμές στροφών ανά λεπτό σύμφωνα με την εξίσωση:

$$rpm = f(Hz) \times 60 \quad (3.1)$$

Οπότε το εύρος 0 – 160Hz μεταφράζεται στις στροφές 0 – 9600 ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης που θα μπορούσε να είναι η πηγή των δονήσεων σε ένα πραγματικό σενάριο φόρτισης, και το εύρος αυτό καλύπτει ένα ικανοποιητικό φάσμα στροφών και κατά συνέπεια δονήσεων που θα μπορούσε να παράγει. (Dimogianopoulos & Mouzakis, 2021)

Πίνακας 2.7.1: Τα προφίλ διέγερσης που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία

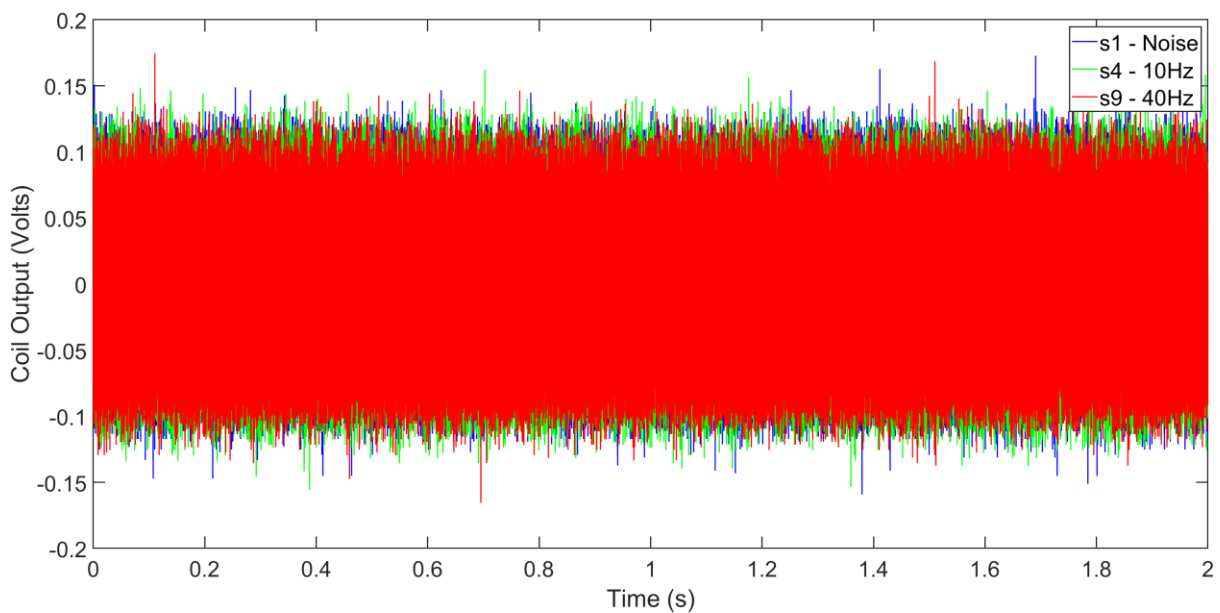
Συχνότητα Διέγερσης (Hz)	Μετρήσεις	Σειρά Προφίλ
0	6	S0
10	6	S1
40	6	S2
55	6	S3
70	6	S4
85	6	S5
100	6	S6
115	6	S7
130	6	S8
145	6	S9
160	6	S10

3.1 Διαγράμματα σύγκρισης των σημάτων

3.1.1 Σύγκριση των σημάτων στο πεδίο του χρόνου

Η σύγκριση των χρονοσειρών των σημάτων που λήφθηκαν δεν παρουσιάζει κάποια χρήσιμη πληροφορία. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς τα ηλεκτρικά σήματα που παράγονται στο πηνίο ως αποτέλεσμα της διέγερσης της δοκού μέσω του μαγνητοελαστικού φαινομένου, είναι αδύναμα σε σχέση με τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο του περιβάλλοντος, όπως εξηγήθηκε στην σχετική ενότητα. Δεν υπάρχει καμία δυνατότητα διάκρισης, λοιπόν, οποιασδήποτε μετρήσιμης διαφοράς των σημάτων στο πεδίο του χρόνου κάτι που είναι εμφανές και στην απεικόνιση σημάτων που προέρχονται από 3 διαφορετικές διεγέρσεις στο Σχήμα 3.1.1 παρακάτω. Επομένως δεν ξαναπαρουσιάζονται τα σήματα στον χρόνο.

Σχήμα 3.1.1: Χρονοσειρές των μετρήσεων για τα πρώτα τρία προφίλ διέγερσης



3.1.2 Σύγκριση των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας

Εφόσον τα σήματα δεν παρουσίασαν κάποια μετρήσιμη διαφορά στο πεδίο του χρόνου, σε επόμενο βήμα λήφθηκαν τα φάσματα πλάτους FFT με την χρήση του κατάλληλου αλγόριθμου στο MATLAB®. Πριν γίνει η απεικόνιση των φασμάτων, έγινε η κατάλληλη προεργασία (αφαίρεση του μέσου) για να αντισταθμιστεί το φαινόμενο DC offset που εκφράζεται με μια πολύ μεγάλη συνεισφορά στον FFT στα 0 Hz, με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στην σχετική ενότητα του Κεφαλαίου 2. Στο Σχήμα 3.1.2 παρουσιάζονται οι κορυφές επιλεγμένων μετρήσεων από όλα τα προφίλ διέγερσης που λήφθηκαν. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με προηγούμενες μελέτες πάνω στην διάταξη του αισθητηρίου (Σουλτάνα, 2022). Δεν παρατηρείται καινούργιο περιεχόμενο στην συχνότητα, με κορυφές που να προκύπτουν με συνέπεια σε όλες τις μετρήσεις για κάποιο από τα προφίλ διέγερσης. Αντ' αυτού παρατηρείται ότι από τα πρώτα προφίλ εδραιώνονται κορυφές σε μερικές ζώνες ενδιαφέροντος στην συχνότητα. Αυτές προκύπτουν περί τα 316 kHz, και στην περιοχή των μικρών συχνοτήτων ανά ορισμένες διακριτές ομάδες, περί τα 1300 – 3000 Hz.

Σε αυτές τις περιοχές προκύπτουν οι κορυφές που παρουσιάζονται με συνέπεια για όλες τις μετρήσεις κάθε δεδομένου προφίλ, οπότε σε αυτές αναζητήθηκαν ενδείξεις για συσχέτιση την φασμάτων με την αλλαγή της συχνότητας διέγερσης των διαφορετικών προφίλ. Το φαινόμενο που παρατηρήθηκε με την αύξηση της συχνότητας διέγερσης και παρατηρήθηκε με συνέπεια για σχεδόν όλα τα προφίλ που λήφθηκαν, ήταν η μετατόπιση των κορυφών προς αυξημένες συχνότητες (frequency shift) σε συνδυασμό με την μείωση εύρους που αυτές προκύπτουν. Επομένως, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα της μεθόδου ανάλυσης των σημάτων υπήρχε η δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ των προφίλ χρησιμοποιώντας τις κορυφές αυτών των περιοχών ενδιαφέροντος.

Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε σε όλες της περιοχές ενδιαφέροντος στην συχνότητα και είναι η ισχυρότερη ένδειξη που λαμβάνεται για μεταβολή των φασμάτων που οφείλεται στον παράγοντα της συχνότητας διέγερσης, αφού οι υπόλοιποι παράγοντες δεν άλλαξαν για το σύνολο των δεδομένων που λήφθηκαν από την διάταξη. Στο Σχήμα 3.1.2 φαίνεται αυτό το μοτίβο από τα σήματα θορύβου (s0 – ψυχρά χρώματα) μέχρι και τα σήματα που προήλθαν από διέγερση 160 Hz (s10 – θερμά χρώματα).

Όσον αφορά την συνεισφορά πλάτους των μετρήσεων δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια συσχέτιση με την αλλαγή συχνότητας διέγερσης. Την μεγαλύτερη συνεισφορά σε πλάτος την έχουν οι κορυφές στην περιοχή των 316 kHz για τις περισσότερες μετρήσεις, και ακολουθούν κατά σειρά η ομάδα κορυφών στα 1400 Hz, στα 1800Hz, και στα 2100 Hz. Υπάρχουν και άλλες δύο ομάδες κορυφών περί τα 2300 και 2700 Hz. Σε μερικές μετρήσεις στις ομάδες αυτές άνω των 2000 Hz παρατηρείται η μείωση αρκετά της συνεισφοράς τους στον FFT, χωρίς όμως να χάνεται το συνεπές φαινόμενο μετατόπισης των κορυφών στην συχνότητα.

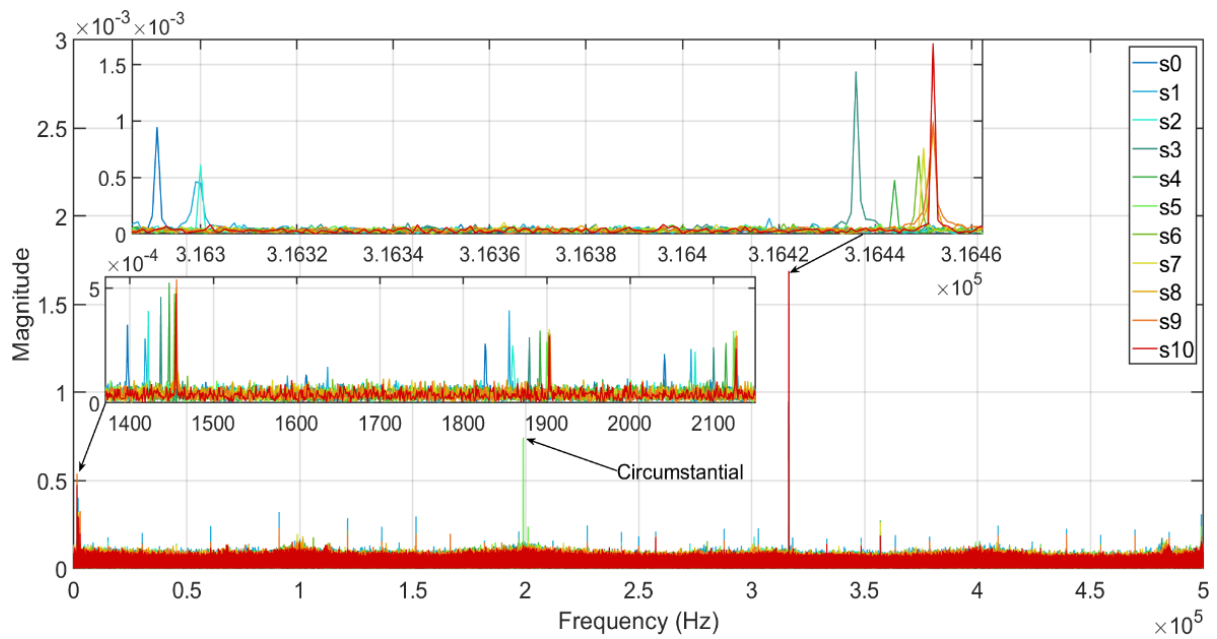
Στο ίδιο σχήμα είναι φανερά και τα μεγάλα ανοίγματα που συνέβησαν μεταξύ μετρήσεων με συχνότητα διέγερσης 40Hz και 55Hz. Αυτή η διαφορά είναι έκδηλη στην περιοχή των 316 kHz (s2-s3) που οι κορυφές απέχουν μια απόσταση των 100Hz μεταξύ προφίλ. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι τα τρία πρώτα σετ λήφθηκαν σε διαφορετική ημέρα πειράματος από τα επόμενα. Αυτή η διαφορά στις περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ικανή να επηρεάσει το περιεχόμενο των σημάτων στην συχνότητα. Προφανώς η περιοχή ενδιαφέροντος των 316 kHz, είναι πιο ευαίσθητη σε αυτές τις αλλαγές καθώς το φαινόμενο δεν επηρέασε στον ίδιο βαθμό και τις υπόλοιπες περιοχές. Κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ότι οι περιοχές μικρών συχνοτήτων είναι πιο εύλικτες από αυτήν παρόλο που αυτή έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά σε πλάτος για τις περισσότερες μετρήσεις.

Ενδιαφέρουσα εξαίρεση αποτελεί το φαινόμενο μετατόπισης που παρατηρήθηκε στην κορυφή των 357 kHz στην οποία παρουσιαζόταν παρόμοιο μοτίβο για κάποια από τα προφίλ αλλά με την αντίστοιχη μετατόπιση των κορυφών να γίνεται προς τις μικρότερες συχνότητες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1.3.

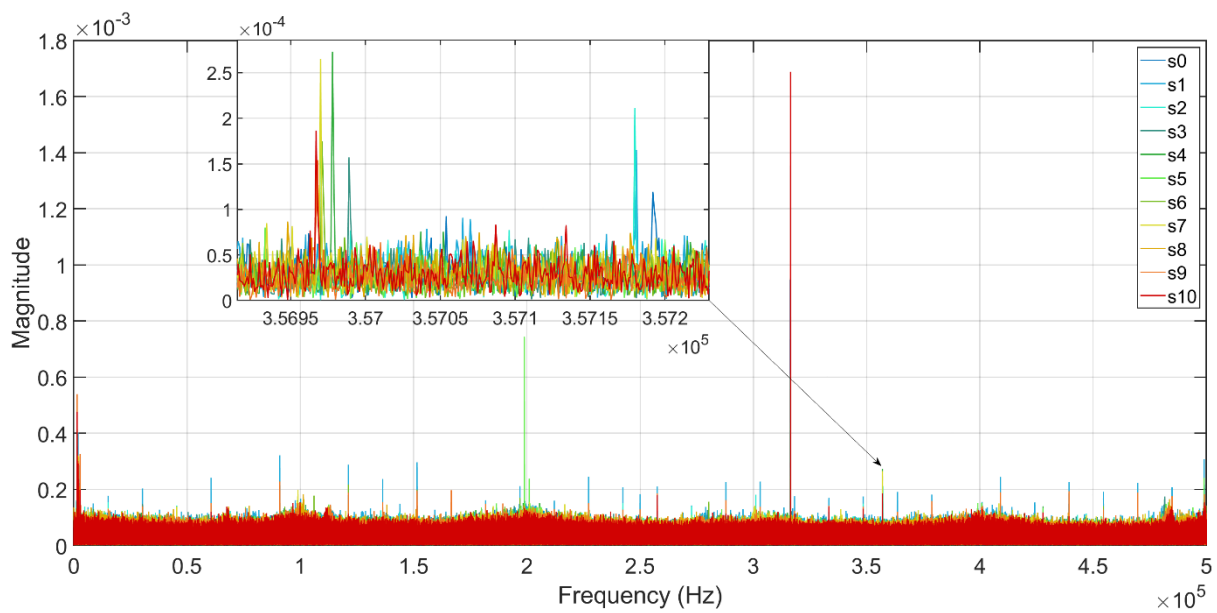
Στις υπόλοιπες περιοχές εκτός των περιοχών ενδιαφέροντος παρατηρήθηκαν κορυφές χωρίς απόλυτη συνέπεια για όλες τις μετρήσεις του αντίστοιχου προφίλ από το οποίο προέρχονταν, αλλά και με την ίδια τιμή στην συχνότητα οπότε δεν μπορούσε να εξαχθεί κάποια χρήσιμη πληροφορία από αυτές. Τέτοιες κορυφές παρουσιάζονται και στο Σχήμα 3.1.4.

Εξετάζοντας τα φάσματα, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ότι προκύπτουν προβλήματα στην διάκριση μεταξύ των προφίλ τα οποία οφείλονται σε επικαλύψεις μεταξύ των κορυφών αφού η μετατόπιση τους σταδιακά μειώνεται και το εύρος που προκύπτουν στην συχνότητα φτάνει στην κρίσιμη τιμή του 1 Hz, που είναι η ανάλυση του μετασχηματισμού Fourier.

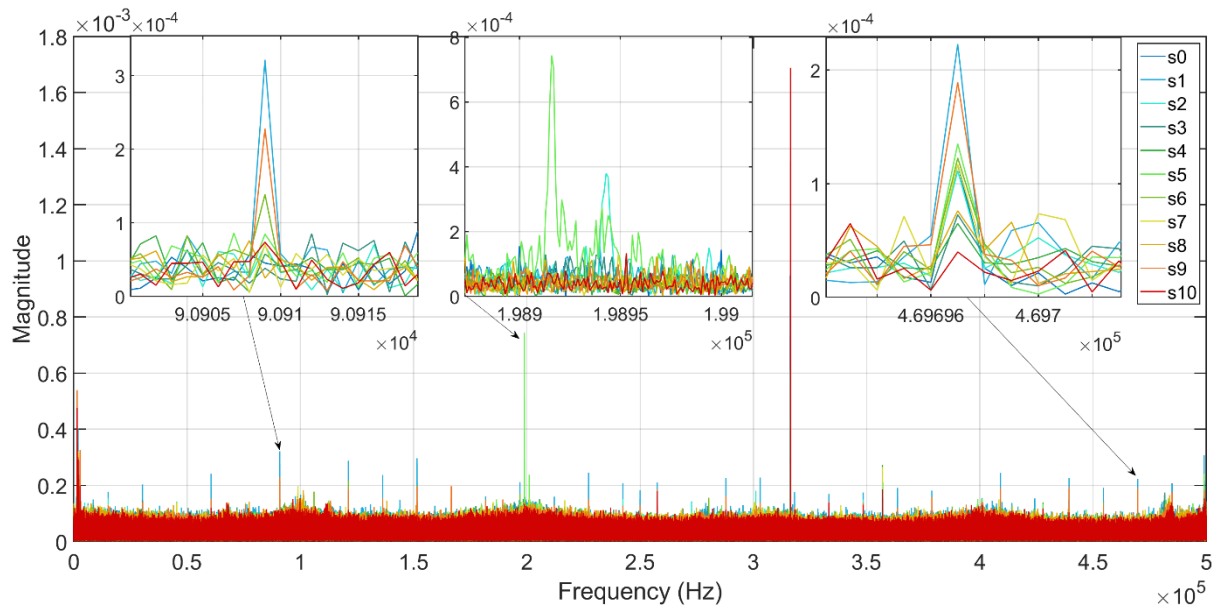
Σχήμα 3.1.2: Φάσματα πλατών συγκεκριμένων μετρήσεων για όλα τα προφίλ διέγερσης



Σχήμα 3.1.3: Η ομάδα κορυφών στην περιοχή 357kHz



Σχήμα 3.1.4: Φαινόμενα θορύβου στα σήματα που προήλθαν από την διέγερση της δοκού



3.1.3 Σύγκριση των διαστημάτων εύρους κορυφών στην συχνότητα

Όπως παρατηρήθηκε με την βοήθεια των φασμάτων πλάτους του FFT των σημάτων, η πιο σημαντική πληροφορία που δίνεται σχετικά με την ανίχνευση διαφορετικών συχνοτήτων διέγερσης από το αισθητήριο κρύβεται στο φαινόμενο της μετατόπισης των κορυφών σημασίας στην συχνότητα. Σύμφωνα με την μέθοδο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτές οι μετατοπίσεις μπορούν να εκφραστούν με την μορφή διαστημάτων εύρους μεταβολής κορυφών στην συχνότητα, για να παρατηρηθεί με μεγαλύτερη ευκολία πως συγκρίνονται τα σύνολα των μετρήσεων όλων των διαφορετικών προφίλ μεταξύ τους.

Αυτά τα διαγράμματα, που φαίνονται στα σχήματα Σχήμα 3.1.5, Σχήμα 3.1.6, Σχήμα 3.1.7 και Σχήμα 3.1.8, παρουσιάζουν τα διαστήματα που καταλαμβάνουν οι κορυφές των μετρήσεων στην συχνότητα για κάθε δεδομένο προφίλ διέγερσης. Με αυτήν την οπτική σύγκριση είναι δυνατό να βγουν συμπεράσματα για τις επικαλύψεις των διαστημάτων και για τα προβλήματα διάκρισης μεταξύ των προφίλ. Κάθε ένα διάγραμμα αποτελείται από τα διαστήματα κορυφών όλων των προφίλ που λήφθηκαν, για μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος.

Εξετάζοντας τα σχήματα παρακάτω συνολικά διαπιστώνεται ότι προβλήματα διάκρισης μεταξύ των προφίλ παρατηρούνται στις αυξημένες συχνότητες διέγερσης. Συγκεκριμένα στην περιοχή 316 kHz, πέρα από το άνοιγμα στην συχνότητα για όλες τις μετρήσεις μεταξύ των προφίλ 40 και 55 Hz, παρατηρείται ότι επικάλυψη μεταξύ προφίλ προκύπτει μεταξύ των συγκρίσεων 85 και 100 Hz. Οι αντίστοιχες πρώτες επικαλύψεις μεταξύ προφίλ για τις περιοχές ενδιαφέροντος στις χαμηλές συχνότητες προκύπτουν μεταξύ των συγκρίσεων 100 -115 Hz και 115 – 130 Hz. Αυτή είναι μία παραπάνω ένδειξη ότι οι περιοχές των χαμηλών συχνοτήτων ανταποκρίνονται καλύτερα στις μεταβολές.

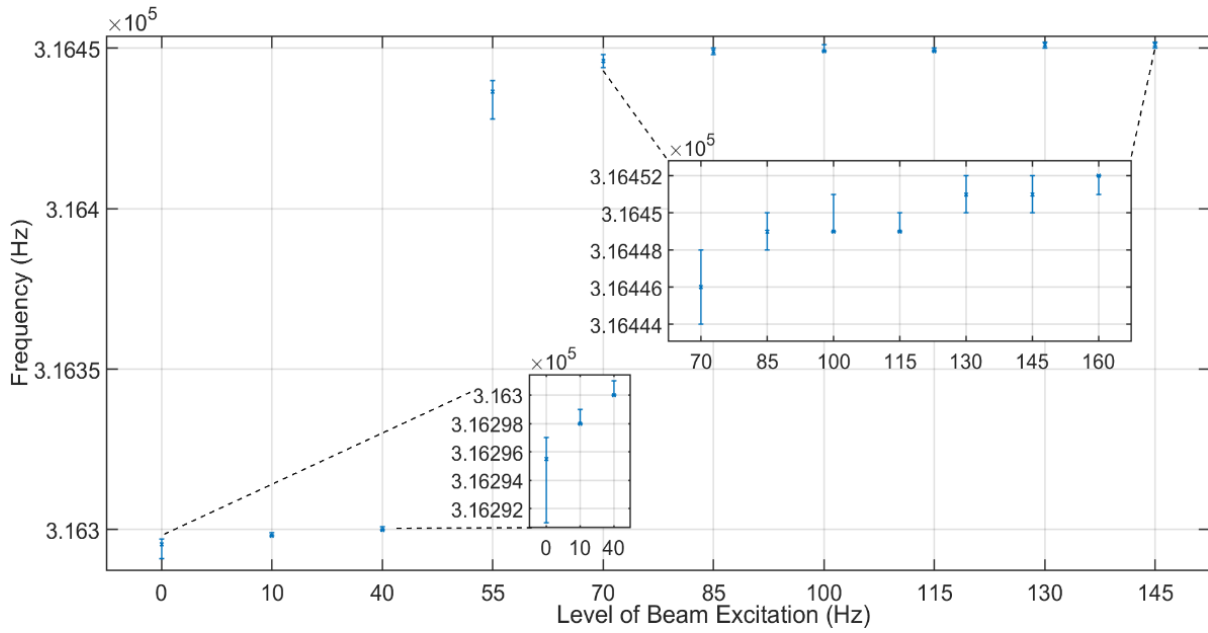
Ωστόσο παρατηρείται ότι τόσο στις υψηλές συχνότητες τόσο στις χαμηλές δυσχεραίνεται έντονα η διάκριση των προφίλ στα τελευταία 4 προφίλ διέγερσης. Η μείωση του εύρους που προκύπτουν οι κορυφές σε συνδυασμό με την μείωση της μετατόπισης προς αυξημένες συχνότητες, δημιουργεί επικαλύψεις στα διαστήματα και πολλές από τις κορυφές προκύπτουν στην ίδια τιμή της συχνότητας. Αυτό οφείλεται στην ανάλυση της συχνότητας (Frequency Resolution) του μετασχηματισμού που δεν μπορεί να εντοπίσει διαφορές στις κορυφές μικρότερες από 1 Hz.

Επιπλέον παρατηρείται ότι στο προφίλ διέγερσης με συχνότητα 160 Hz υπάρχει μια τάση επιστροφής σε μειωμένες συχνότητες, όπως μαρτυρά ο διάμεσος των διαστημάτων (κυκλικό σημείο), ειδικά στις χαμηλές συχνότητες.

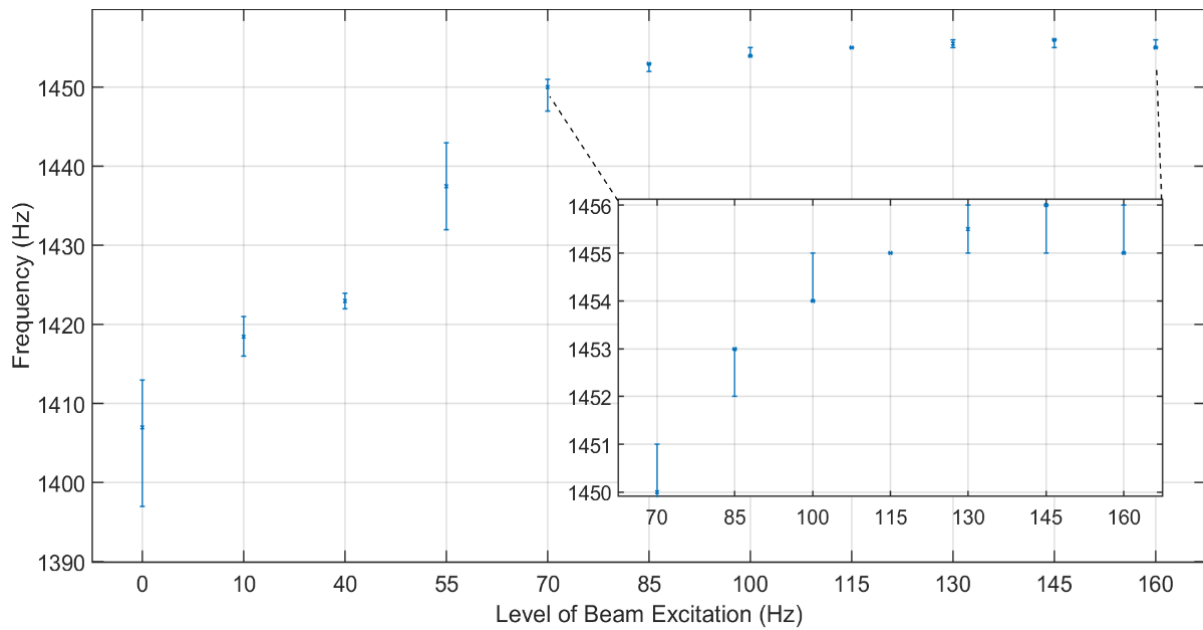
Με την έκφραση των διαστημάτων κορυφών σε διαγράμματα δίνεται μια πιο ξεκάθαρη και πιο συνολική εικόνα της συμπεριφοράς των φασμάτων το σύνολο των μετρήσεων όλων των διαφορετικών προφίλ. Επιπλέον δεν υπάρχει ο θόρυβος που υπάρχει στα φάσματα και δεν υπάρχει και το φαινόμενο φασματικής διαρροής (spectral leakage) που παρουσιάζεται στα φάσματα των σημάτων. Από αυτά τα διαγράμματα βγαίνει το συμπέρασμα ότι υπάρχει διάκριση για τα προφίλ με χαμηλές συχνότητες διέγερσης, ενώ για τις υψηλές συχνότητες δεν φαίνεται ξεκάθαρα από τις οπτικές συγκρίσεις αν είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ των προφίλ.

Όπως αναφέρθηκε και στην σχετική ενότητα από τον συνδυασμό των διαγραμμάτων που προκύπτουν από τα φάσματα των μετρήσεων μπορεί να δοθεί η πρώτη εικόνα για την συμπεριφορά του αισθητηρίου με την αλλαγή του προφίλ διέγερσης. Στις περιπτώσεις που κάθε ξεχωριστή διέγερση έχει εύρος κορυφών στις περιοχές ενδιαφέροντος που δεν επικαλύπτεται από εύρος κορυφών άλλων διεγέρσεων τότε υπάρχει ένδειξη δυνατότητας ανίχνευσης του συγκεκριμένου προφίλ. Αυτή είναι μια πληροφορία που λαμβάνεται από τα διαγράμματα αυτά. Στις περιπτώσεις όμως που υπάρχουν επικαλύψεις δεν μπορεί να δοθεί σαφής απάντηση για την ικανότητα ανίχνευσης του αισθητηρίου. Επιπλέον σε όλες τις συγκρίσεις το συμπέρασμα είναι ποιοτικό και όχι ποσοτικό οπότε δεν υπάρχει η δυνατότητα βαθμονόμησης της ικανότητας με την αποκλειστική χρήση των διαγραμμάτων αυτών.

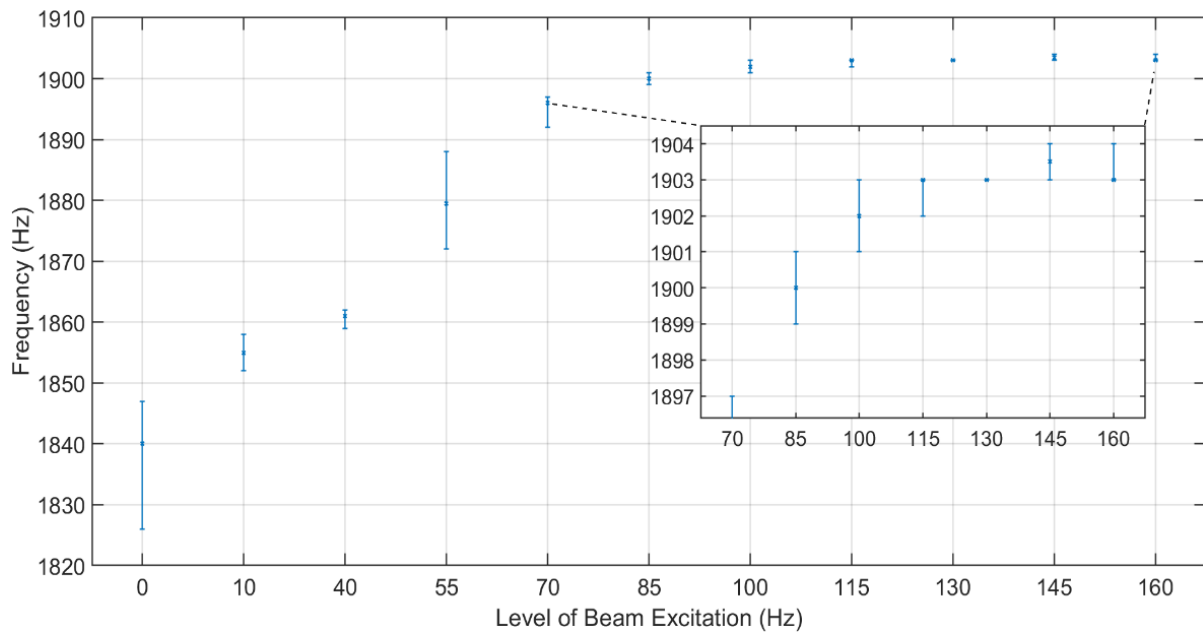
Σχήμα 3.1.5: Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για την περιοχή ενδιαφέροντος 316 kHz



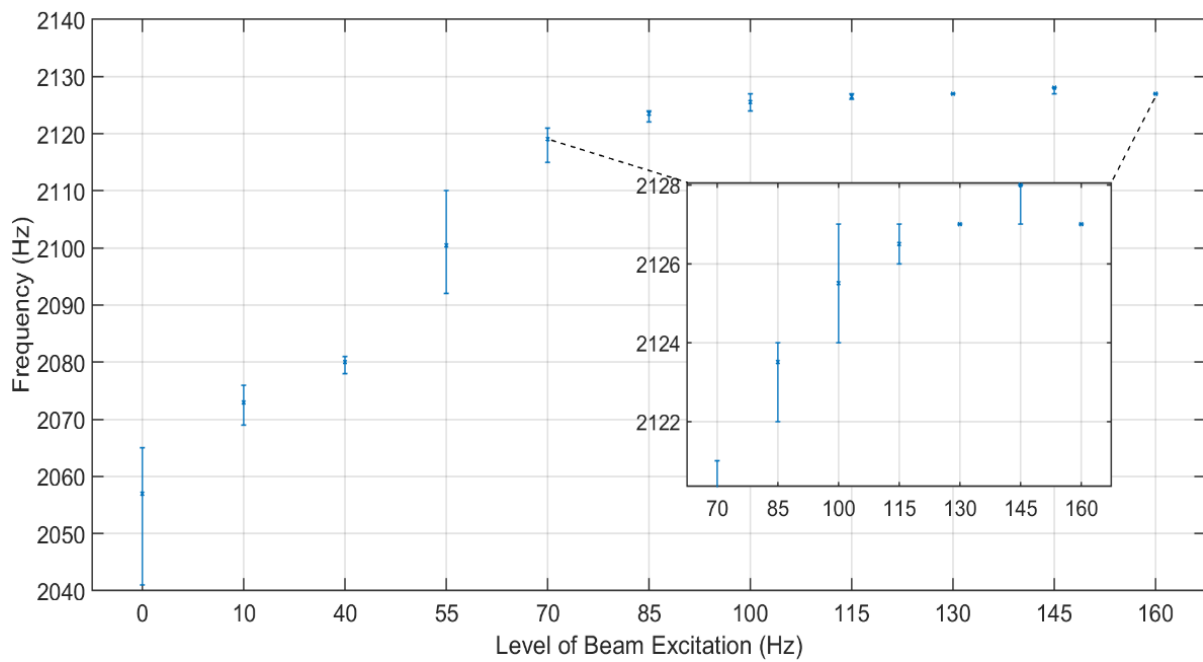
Σχήμα 3.1.6: Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για την περιοχή ενδιαφέροντος 1400 Hz



Σχήμα 3.1.7: Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για την περιοχή ενδιαφέροντος 1800 Hz



Σχήμα 3.1.8: Τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για την περιοχή ενδιαφέροντος 2100 Hz



3.2 Εφαρμογή του ελέγχου Kruskal-Wallis στα δεδομένα

Σε αυτήν την ενότητα θα εφαρμοσθεί ο μη παραμετρικός έλεγχος υπόθεσης Kruskal-Wallis στα δεδομένα που λήφθηκαν από την διέγερση της δοκού. Όπως αναφέρθηκε στην σχετική ενότητα του κεφαλαίου 2, ο στατιστικός έλεγχος υποθέσεων διεξάγεται όταν προκύπτει η ανάγκη διερεύνησης της αλήθειας μιας υπόθεσης. Αρχικά πρέπει να οριστούν η αρχική και η εναλλακτική υπόθεση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση θέλουμε να γίνει ποσοτικοποίηση της διαφοράς μεταξύ διαστημάτων κορυφών που προέρχονται από διαφορετικά προφίλ διεγέρσεων. Η αρχική υπόθεση H_0 θα εκφράζει την πιθανότητα τα δείγματα να προήλθαν από την ίδια κατανομή ενώ η εναλλακτική υπόθεση θα εκφράζει την αντίθετη πιθανότητα, δηλαδή να προέρχονται από διαφορετική κατανομή. Διαφορετικές κατανομές ουσιαστικά αναφέρονται σε διαφορετικά διαστήματα κορυφών και επομένως σε διαφορετικά προφίλ διεγέρσης. Επομένως απόρριψη της αρχικής υπόθεσης σε σύγκριση μεταξύ γκρουπ διαφορετικού προφίλ διεγέρσης, θα συνεπάγεται επιτυχή διακριτική ικανότητα του αισθητηρίου μεταξύ των συγκεκριμένων προφίλ. Ομοίως αναμένεται συγκρίσεις μεταξύ προφίλ που δεν μπορούσαν να διακριθούν να μην απορρίπτουν την αρχική υπόθεση.

Με τον τρόπο που εκφράστηκε παραπάνω η διερεύνηση της ευαισθησίας ανίχνευσης του αισθητηρίου μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα στατιστικής ανάλυσης στο οποίο μπορούν να δοθούν πρακτικές απαντήσεις. Ακολουθούν οι εκφράσεις των υποθέσεων:

H_0 : Οι τιμές της συχνότητας μεταξύ των δειγμάτων υπό εξέταση προέρχονται από την ίδια κατανομή

H_1 : Οι τιμές της συχνότητας μεταξύ των δειγμάτων υπό εξέταση προέρχονται από διαφορετικές κατανομές

Όπως αναφέρθηκε στην αντίστοιχη ενότητα, η εφαρμογή του μη παραμετρικού ελέγχου έχει το μειονέκτημα ότι σε αντίθεση με τους παραμετρικούς ελέγχους υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα σφάλματος τύπου II. Σε συνδυασμό με τα λίγα δείγματα που έχουν ληφθεί, το γεγονός αυτό καθιστά την εφαρμογή του ελέγχου πιο συντηρητική στην απόρριψη της αρχικής υπόθεσης. Αυτό σημαίνει ότι δυσχεραίνεται η επιτυχής διάκριση μεταξύ ανεξάρτητων διαστημάτων σε έναν βαθμό, αλλά σε αντιπαροβολή, αν παρά την συντηρητικότητα που παρουσιάζει ο έλεγχος απορριφθεί η αρχική υπόθεση, τότε ισχυροποιείται η ένδειξη πως τα εξεταζόμενα γκρουπ προέρχονται από ανεξάρτητες κατανομές.

Στους πίνακες που ακολουθούν υπάρχουν οι τιμές σημαντικότητας p-values που υπολογίστηκαν με την χρήση του Kruskal-Wallis στο MATLAB[®]. Το κελί μεταξύ ν-οστής γραμμής και μ-οστής στήλης αντιστοιχεί στην τιμή p-value που προκύπτει από την σύγκριση των δύο γκρουπ, με προφίλ διεγέρσης το οποίο δίνεται στην αντίστοιχη γραμμή και στήλη. Τα

κελιά που δεν είναι σκιασμένα αντιπροσωπεύουν τις τιμές που απορρίπτεται η αρχική υπόθεση H_0 , οπότε τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικές κατανομές. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι υπάρχει διακριτότητα μεταξύ των αντίστοιχων προφίλ στην επιλεγμένη στάθμη σημαντικότητας ($\alpha = 0.05$). Από την άλλη τα κελιά με σκίαση αντιπροσωπεύουν τις τιμές που δεν απορρίπτουν την H_0 και επομένως δεν μπορεί να υπάρξει διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αντίστοιχων προφίλ στην επιλεγμένη στάθμη σημαντικότητας. Επιπλέον στα σκιασμένα κελιά ανήκουν και οι περιπτώσεις σύγκρισης κάθε προφίλ με τον εαυτό του (N/A – Not Applicable) που δεν ήταν δυνατές αφού δεν μπορούσε να συγκριθεί το γκρουπ με τον εαυτό του στο συγκεκριμένο πακέτο λογισμικού. Αν υπήρχε η δυνατότητα, οι τιμές αυτές θα ήταν μονάδα μιας και οι κατανομές είναι ίδιες.

Οι τιμές των πινάκων επιβεβαιώνουν τις ενδείξεις που παρείχαν τα διαγράμματα μέσω της οπτικής σύγκρισης των διαστημάτων. Παρατηρείται ότι σε όλους τους πίνακες τα προβλήματα στην διάκριση μεταξύ προφίλ ξεκινούν στις συγκρίσεις με προφίλ διέγερσης 85 Hz -100 Hz στην περιοχή 316 kHz και στις υπόλοιπες περιοχές από την σύγκριση 100 Hz – 115 Hz και έπειτα. Μεγαλύτερη ευελιξία εμφανίζει η περιοχή των 1400 Hz όπου η αρχική υπόθεση απορρίπτεται μέχρι και την σύγκριση 115-130Hz για όλα τα προηγούμενα προφίλ.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι σε ορισμένα κελιά η τιμή της σύγκρισης δεν απορρίπτει την αρχική υπόθεση, αλλά βρίσκεται πολύ κοντά στην στάθμη σημαντικότητας (όπως πχ στην σύγκριση μεταξύ προφίλ 100-115 Hz και 130-145 Hz στην περιοχή ενδιαφέροντος 2100Hz όπου η τιμή είναι αντίστοιχα 0.057 και 0.055). Αυτό είναι ενδεικτικό ότι σε αυτά τα γκρουπ υπάρχει μια στατιστική τάση να απορριφθεί η αρχική υπόθεση, που δεν επιτυγχάνεται λόγω της συντηρητικότητας του ελέγχου που προαναφέρθηκε.

Πίνακας 3.2.1: Τιμές σημαντικότητας (p-values) για την σύγκριση μεταξύ δύο γκρουπ στην ζώνη ενδιαφέροντος 316 kHz

Διέγερση	0 Hz	10 Hz	40 Hz	55 Hz	70 Hz	85 Hz	100 Hz	115 Hz	130 Hz	145 Hz	160 Hz
0 Hz	N/A	0.0032	0.0032	0.0038	0.0036	0.0036	0.0032	0.0032	0.0036	0.0036	0.0032
10 Hz	0.0032	N/A	0.0027	0.0032	0.0031	0.0031	0.0028	0.0027	0.0031	0.0031	0.0027
40 Hz	0.0032	0.0027	N/A	0.0032	0.0031	0.0031	0.0028	0.0027	0.0031	0.0031	0.0027
55 Hz	0.0038	0.0032	0.0032	N/A	0.0037	0.0037	0.0033	0.0032	0.0037	0.0037	0.0032
70 Hz	0.0036	0.0031	0.0031	0.0037	N/A	0.0086	0.0032	0.0031	0.0036	0.0036	0.0031
85 Hz	0.0036	0.0031	0.0031	0.0037	0.0086	N/A	0.3880	0.4844	0.0086	0.0086	0.0031
100 Hz	0.0032	0.0028	0.0028	0.0033	0.0032	0.3880	N/A	0.8474	0.0203	0.0203	0.0045
115 Hz	0.0032	0.0027	0.0027	0.0032	0.0031	0.4844	0.8474	N/A	0.0077	0.0077	0.0027
130 Hz	0.0036	0.0031	0.0031	0.0037	0.0036	0.0086	0.0203	0.0077	N/A	1.0000	0.1620
145 Hz	0.0036	0.0031	0.0031	0.0037	0.0036	0.0086	0.0203	0.0077	1.0000	N/A	0.1620
160 Hz	0.0032	0.0027	0.0027	0.0032	0.0031	0.0031	0.0045	0.0027	0.1620	0.1620	N/A

Πίνακας 3.2.2: Τιμές σημαντικότητας (p-values) για την σύγκριση μεταξύ δύο γκρουπ στην ζώνη ενδιαφέροντος 1400 Hz

Διέγερση	0 Hz	10 Hz	40 Hz	55 Hz	70 Hz	85 Hz	100 Hz	115 Hz	130 Hz	145 Hz	160 Hz
0 Hz	N/A	0.0038	0.0036	0.0037	0.0036	0.0032	0.0032	0.0020	0.0033	0.0027	0.0032
10 Hz	0.0038	N/A	0.0037	0.0038	0.0037	0.0032	0.0032	0.0021	0.0034	0.0028	0.0032
40 Hz	0.0036	0.0037	N/A	0.0036	0.0036	0.0031	0.0031	0.0020	0.0033	0.0026	0.0031
55 Hz	0.0037	0.0038	0.0036	N/A	0.0036	0.0032	0.0032	0.0020	0.0033	0.0027	0.0032
70 Hz	0.0036	0.0037	0.0036	0.0036	N/A	0.0031	0.0031	0.0020	0.0033	0.0026	0.0031
85 Hz	0.0032	0.0032	0.0031	0.0032	0.0031	N/A	0.0027	0.0017	0.0029	0.0023	0.0027
100 Hz	0.0032	0.0032	0.0031	0.0032	0.0031	0.0027	N/A	0.0190	0.0105	0.0037	0.0144
115 Hz	0.0020	0.0021	0.0020	0.0020	0.0020	0.0017	0.0190	N/A	0.0555	0.0051	0.1380
130 Hz	0.0033	0.0034	0.0033	0.0033	0.0033	0.0029	0.0105	0.0555	N/A	0.2410	0.5751
145 Hz	0.0027	0.0028	0.0026	0.0027	0.0026	0.0023	0.0037	0.0051	0.2410	N/A	0.0926
160 Hz	0.0032	0.0032	0.0031	0.0032	0.0031	0.0027	0.0144	0.1380	0.5751	0.0926	N/A

Πίνακας 3.2.3: Τιμές σημαντικότητας (p-values) για την σύγκριση μεταξύ δύο γκρουπ στην ζώνη ενδιαφέροντος 1800 Hz

Διέγερση	0 Hz	10 Hz	40 Hz	55 Hz	70 Hz	85 Hz	100 Hz	115 Hz	130 Hz	145 Hz	160 Hz
0 Hz	N/A	0.0037	0.0036	0.0038	0.0036	0.0036	0.0035	0.0032	0.0020	0.0033	0.0027
10 Hz	0.0037	N/A	0.0036	0.0038	0.0036	0.0036	0.0035	0.0032	0.0020	0.0033	0.0027
40 Hz	0.0036	0.0036	N/A	0.0037	0.0036	0.0036	0.0035	0.0031	0.0020	0.0033	0.0026
55 Hz	0.0038	0.0038	0.0037	N/A	0.0037	0.0037	0.0036	0.0032	0.0021	0.0034	0.0028
70 Hz	0.0036	0.0036	0.0036	0.0037	N/A	0.0036	0.0035	0.0031	0.0020	0.0033	0.0026
85 Hz	0.0036	0.0036	0.0036	0.0037	0.0036	N/A	0.0084	0.0031	0.0020	0.0033	0.0026
100 Hz	0.0035	0.0035	0.0035	0.0036	0.0035	0.0084	N/A	0.0570	0.0068	0.0062	0.0074
115 Hz	0.0032	0.0032	0.0031	0.0032	0.0031	0.0031	0.0570	N/A	0.1380	0.0303	0.0917
130 Hz	0.0020	0.0020	0.0020	0.0021	0.0020	0.0020	0.0068	0.1380	N/A	0.0555	0.3173
145 Hz	0.0033	0.0033	0.0033	0.0034	0.0033	0.0033	0.0062	0.0303	0.0555	N/A	0.2410
160 Hz	0.0027	0.0027	0.0026	0.0028	0.0026	0.0026	0.0074	0.0917	0.3173	0.2410	N/A

Πίνακας 3.2.4: Τιμές σημαντικότητας (p-values) για την σύγκριση μεταξύ δύο γκρουπ στην ζώνη ενδιαφέροντος 2100 Hz

Διέγερση	0 Hz	10 Hz	40 Hz	55 Hz	70 Hz	85 Hz	100 Hz	115 Hz	130 Hz	145 Hz	160 Hz
0 Hz	N/A	0.0037	0.0036	0.0038	0.0036	0.0035	0.0037	0.0033	0.0020	0.0032	0.0020
10 Hz	0.0037	N/A	0.0036	0.0038	0.0036	0.0035	0.0037	0.0033	0.0020	0.0032	0.0020
40 Hz	0.0036	0.0036	N/A	0.0038	0.0036	0.0035	0.0036	0.0033	0.0020	0.0031	0.0020
55 Hz	0.0038	0.0038	0.0038	N/A	0.0038	0.0036	0.0038	0.0035	0.0021	0.0033	0.0021
70 Hz	0.0036	0.0036	0.0036	0.0038	N/A	0.0035	0.0036	0.0033	0.0020	0.0031	0.0020
85 Hz	0.0035	0.0035	0.0035	0.0036	0.0035	N/A	0.0068	0.0032	0.0019	0.0030	0.0019
100 Hz	0.0037	0.0037	0.0036	0.0038	0.0036	0.0068	N/A	0.0750	0.0071	0.0051	0.0071
115 Hz	0.0033	0.0033	0.0033	0.0035	0.0033	0.0032	0.0750	N/A	0.0555	0.0105	0.0555
130 Hz	0.0020	0.0020	0.0020	0.0021	0.0020	0.0019	0.0071	0.0555	N/A	0.0190	1
145 Hz	0.0032	0.0032	0.0031	0.0033	0.0031	0.0030	0.0051	0.0105	0.0190	N/A	0.0190
160 Hz	0.0020	0.0020	0.0020	0.0021	0.0020	0.0019	0.0071	0.0555	1	0.0190	N/A

Αυτές οι τιμές επιβεβαιώνουν την λειτουργία του αισθητηρίου για την ανίχνευση και διάκριση προφίλ διέγερσης με διαφορετικές συχνότητες διέγερσης. Μέσω της στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων είναι τώρα δυνατή η χαρτογράφηση της λειτουργίας στην συχνότητα λαμβάνοντας υπόψιν τους πίνακες παραπάνω.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ευελιξία της περιοχής 1400 Hz είναι αξιοσημείωτη, και αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διάκριση ανίχνευση προφίλ διέγερσης με συχνότητα διέγερσης μέχρι και τα 115 Hz με επιτυχία.

Στην επόμενη σύγκριση, δηλαδή 115 – 130 Hz στην περιοχή αυτή δεν απορρίπτεται η αρχική υπόθεση, αλλά παρατηρείται το φαινόμενο που αναφέρθηκε παραπάνω, ότι η τιμή είναι πολύ κοντά στην στάθμη σημαντικότητας. Εξαιτίας λοιπόν της τάσης να απορριφθεί η αρχική υπόθεση υπάρχει νόημα να διερευνηθεί σε συνδυασμό με άλλες περιοχές για την πιθανότητα να υπάρχει διάκριση μεταξύ των δύο προφίλ. Και πράγματι στην περιοχή 316 kHz στην σύγκριση μεταξύ των δύο συγκεκριμένων προφίλ απορρίπτεται η αρχική υπόθεση που σημαίνει επιτυχία διάκρισης για αυτά τα δύο προφίλ.

Η διάκριση μεταξύ των προφίλ 130-145 Hz με την ίδια λογική επιτυγχάνεται μόνο στην περιοχή 2100 Hz όπου η τιμή της σύγκρισης αυτής είναι κάτω από την στάθμη σημαντικότητας ($p = 0.0190$), καθώς στις υπόλοιπες περιοχές ενδιαφέροντος η τιμή σημαντικότητας δεν απορρίπτει την αρχική υπόθεση και μόνο στην περιοχή των 1800 Hz αυτή βρίσκεται κοντά στην στάθμη σημαντικότητας.

Η σύγκριση μεταξύ των προφίλ 145-160 Hz δεν διακρίνεται σε καμία από τις περιοχές ενδιαφέροντος στην συχνότητα. Στην περιοχή 2100 Hz απορρίπτεται η αρχική υπόθεση, αλλά αυτό οφείλεται στην αντίθετη μετατόπιση των κορυφών της ομάδας s10, οπότε δεν μπορεί να αξιοποιηθεί. Επιπλέον μόνο σε αυτήν την περιοχή διαχωρίζονται οι κορυφές μεταξύ των δύο αυτών προφίλ, ενώ στην υπόλοιπες δεν διαφαίνεται κάποια τάση να απορριφθεί η αρχική υπόθεση. Γενικά σε όλες τις ζώνες ενδιαφέροντος, το προφίλ των 160 παρουσιάζει μια μετατόπιση προς μικρότερη συχνότητα σε σχέση με αυτό των 145, οπότε δεν μπορεί να διακριθεί ούτε από το προηγούμενο προφίλ με διέγερση 130 Hz.

Με βάση αυτά τα συμπεράσματα που εξάγονται από του πίνακες, σε αυτό το σημείο είναι δυνατή η παρουσίαση της χαρτογράφησης της λειτουργίας του αισθητηρίου σε σχέση με την συχνότητα διέγερσης των κυματομορφών εισόδου της διάταξης. Στον πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα δεδομένα για την χαρτογράφηση του αισθητηρίου με βάση την διάκριση των προφίλ στις περιοχές ενδιαφέροντος στην συχνότητα.

Πίνακας 3.2.5: Η χαρτογράφηση λειτουργίας του αισθητηρίου στην συχνότητα

Συγκρίσεις Προφίλ Διέγερσης (Hz)	Επιτυχία Διάκρισης	Περιοχή διάκρισης (Hz)
0-10	Ναι	Όλες/1400
10-40	Ναι	Όλες/ 1400
40 -55	Ναι	Όλες/1400
55-75	Ναι	Όλες/1400
70-85	Ναι	Όλες/1400
85-100	Ναι	Όλες/1400
100-115	Ναι	Όλες/1400
115-130	Ναι	316 k
130-145	Ναι	2100

3.3 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η πειραματική διαδικασία που έλαβε μέρος με σκοπό την χαρτογράφηση του αισθητηρίου. Παρουσιάστηκαν στο σύνολο τους τα προφίλ διέγερσης και στην συνέχεια έγιναν οι απαραίτητες συγκρίσεις των φασμάτων επιλεγμένων μετρήσεων από το σύνολο των προφίλ. Από τα φάσματα όλων των μετρήσεων προέκυψαν τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών που δίνεται μια γενική εικόνα για την συμπεριφορά των μετρήσεων όλων των προφίλ και πως αυτά συγκρίνονται μεταξύ τους. Παρατηρήθηκε και στις δύο αυτές αναλύσεις ότι η διακριτική ικανότητα του αισθητηρίου που εκφράζεται με την μετατόπιση προς αυξημένες συχνότητες των κορυφών όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, δυσχεραίνεται μετά από τα 100 Hz. Για την εξακρίβωση ύπαρξης ή όχι διάκριση στις περιοχές αυτές αλλά και για την ποσοτικοποίηση της διαφοράς μεταξύ των προφίλ διέγερσης, εφαρμόστηκε ο έλεγχος Kruskal-Wallis στα διαστήματα των κορυφών κάθε προφίλ στις περιοχές σημαντικότητας. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για όλα τα προφίλ στις περιοχές σημαντικότητας παρουσιάστηκαν υπό μορφή πινάκων με κάθε πίνακα να αποτελεί τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για κάθε μια από τις περιοχές 1400Hz, 1800Hz, 2100Hz, 316kHz. Από αυτές τις συγκρίσεις εξήχθησαν συμπεράσματα για την διακριτική ικανότητα του αισθητηρίου. Το αισθητήριο επιτυγχάνει ανίχνευση διέγερση με συχνότητα έως και 145 Hz με συνδυασμό των αποτελεσμάτων των πινάκων. Με βάση τα συμπεράσματα αυτά και προτάθηκε μια χαρτογράφηση της λειτουργίας του αισθητηρίου.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα, Μελλοντικές Ευκαιρίες για Εργασία και Περιορισμοί

4.1 Συμπεράσματα

Στο **Κεφάλαιο 1** πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας και έγινε ανάλυση του τρόπου διάρθρωσης των υπόλοιπων κεφαλαίων.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια ανάλυση των βασικών εννοιών που αφορούν τις θεωρητικές γνώσεις οι οποίες ήταν αναγκαίες για την εκπόνηση της διατριβής. Έγινε ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του αισθητηρίου με την μαγνητοελαστική αρχή. Παρουσιάστηκε η πειραματική διάταξη και το σύνολο επιμέρους στοιχείων που την απαρτίζουν.

Επιπλέον αναφορικά με τα σήματα που λήφθηκαν παρουσιάστηκαν οι τεχνικές προεργασίας και τα εργαλεία με τα οποία έγινε επεξεργασία στον χρόνο και την συχνότητα. Δημιουργήθηκαν διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών σημάτων που αξιοποιούσαν τα αποτελέσματα από τα εργαλεία αυτά και παρουσιάστηκαν οι ενδείξεις που αναδείχθηκαν σε αυτά για την επιτυχή ανίχνευση των διαφορετικών προφίλ από το αισθητήριο.

Έγινε μια εισαγωγή στους στατιστικούς ελέγχους υπόθεσης, και στον έλεγχο Kruskal-Wallis, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή στατιστικής βεβαιότητας στις ενδείξεις που λήφθηκαν, ειδικά σε περιπτώσεις που οι ενδείξεις διάκρισης δεν ήταν ξεκάθαρες από τα διαγράμματα, αλλά και για την παγίωση των αποτελεσμάτων γενικότερα.

Στο **Κεφάλαιο 3**, χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για την επεξεργασία του συνόλου των μετρήσεων που λήφθηκαν στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας. Γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών προφίλ στο πεδίο της συχνότητας. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν τα διαγράμματα μεταβολής εύρους συχνότητας, στα οποία η συγκρίνονται τα διαστήματα που καταλαμβάνουν οι κορυφές κάθε προφίλ στην συχνότητα.

Αυτά τα διαστήματα είναι και το αντικείμενο των ελέγχων Kruskal-Wallis ο οποίος εφαρμόζεται για όλες τις συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών προφίλ σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος στην συχνότητα. Παρουσιάζονται οι πίνακες με τις τιμές σημαντικότητας, οι οποίοι συνδυαστικά με τα διαγράμματα παρέχουν έναν οδηγό για την επιτυχή διάκριση των διαφορετικών προφίλ από το αισθητήριο.

Από αυτά τα αποτελέσματα προκύπτει η χαρτογράφηση του αισθητηρίου το οποίο ανιχνεύει με επιτυχία προφίλ με συχνότητες διέγερσης μέχρι 145 Hz.

4.2 Περιορισμοί και μελλοντική εργασία

Προφανώς δεν μπορούν να παραλειφθούν οι περιορισμοί οι οποίοι συναντήθηκαν κατά την διάρκεια της εργασίας. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από την διάταξη, αν και έχει γίνει βελτιστοποίηση τους σε προηγούμενη εργασία (Σουλτάνα, 2022), δεν μπορεί να παραλειφθεί το γεγονός ότι μεγάλο μέρος τους αποτελείται από θόρυβος και υπάρχουν μονάχα μικρές διαφορές ανάμεσα στα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με τις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν σε διαφορετικές ημέρες πειράματος περιορίζουν τον αριθμό πειραμάτων που μπορούν να διεξαχθούν. Επομένως ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων δεν είναι εύκολο να ληφθεί.

Στις υψηλές συχνότητες διέγερσης παρατηρείται το φαινόμενο συσπείρωσης των κορυφών γύρω από ένα πολύ μικρό η μηδενικό εύρος στην συχνότητα και οι μετατοπίσεις δεν είναι πολύ μεγάλης κλίμακας. Αυτά τα δύο φαινόμενα που αποτελούσαν την βασίμη ένδειξη για διάκριση όπως παρουσιάστηκε σταματούν να υφίστανται και επομένως η επίτευξη διάκρισης γίνεται ολοένα και πιο δύσκολη καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Μια ευκαιρία εργασίας είναι να ερευνηθεί κατά πόσο μπορεί να ανταποκριθεί το αισθητήριο σε μεγαλύτερες συχνότητες έτσι ώστε να αποσαφηνιστεί αν η συσπείρωση αυτή οφείλεται στο ότι τα πειράματα για διεγέρσεις 55-160 Hz λήφθηκαν όλα την ίδια μέρα, (όπως η συσπείρωση που παρατηρείται στην ομάδα των πρώτων προφίλ 0-40 Hz) ή αν από εκείνο το σημείο και έπειτα οι υψηλές συχνότητες συσπειρώνουν τις κορυφές κοντά στο ίδιο σημείο στην συχνότητα ανεξάρτητα από την ημέρα πειράματος. Γενικά η ικανότητα ανίχνευσης του αισθητηρίου χρειάζεται επιθεώρηση στις δονήσεις με υψηλές συχνότητες.

Ευκαιρίες παρουσιάζονται επίσης όσον αφορά την μελέτη εφαρμογής του αισθητηρίου σε πραγματικά σενάρια ανίχνευσης, και κατά πόσο αυτή η χαρτογράφηση θα επηρεαζόταν από μια τέτοια εφαρμογή. Το υλικό της δοκού δεν αποτελεί κοινό οικοδομικό υλικό που χρησιμοποιείται σε κτίρια, και έχει χαρακτηριστικά (πχ μέτρο ελαστικότητας) τα οποία είναι βελτιστοποιημένα με γνώμονα την ανίχνευση και διάγνωση σφαλμάτων. Οπότε υπάρχει δυνατότητα να ερευνηθεί η ικανότητα διάκρισης σε διαφορετικά υλικά που να χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα μεταλλικά υλικά (πχ χάλυβας).

Επιπλέον υπάρχει νόημα να ερευνηθεί η δυνατότητα λειτουργίας με την εφαρμογή πολλαπλών αισθητηρίων (sensor array) για σύντηξη των δεδομένων που θα λαμβάνονται, με σκοπό την μείωση του σφάλματος αξιολόγησης. Αυτή είναι μια πρακτική που χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές ελέγχου της δομικής ακεραιότητας κατασκευών με άλλου είδους αισθητήρια (Johnson, Brown, Adams, & Schiefer, 2004).

Τέλος υπάρχει η ανάγκη να ερευνηθούν οι αλλαγές στα σήματα που λαμβάνονται από την διέγερση της δοκού με διαφορετικά πλάτη διέγερσης. Η χαρτογράφηση λοιπόν χρησιμοποιώντας ίδια προφίλ συχνότητας διέγερσης όπως στην παρούσα εργασία και αλλάζοντας το πλάτος θα οδηγούσε σε συμπεράσματα για τις αλλαγές που προκαλεί το πλάτος της διέγερσης στα σήματα. Με την σύντηξη των δεδομένων αυτών με τα ήδη υπάρχοντα θα δίνεται μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς του αισθητηρίου σε διαφορετικά προφίλ διέγερσης.

Αναφορές

- Smith, S. W. (1997). *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishings. Ανάκτηση από <https://www.dspguide.com>
- Chatfield, C. (1995). *The Analysis of Time Series: An Introduction* (5th εκδ.). Chapman & Hall.
- Dimogianopoulos, D. G. (2012, January). Sensors and Energy Harvesters Utilizing the Magnetoelastic Principle: Review of Characteristic Applications and Patents. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*, 5, 103-119. doi:10.2174/2213111611205020103
- Dimogianopoulos, D. G., & Mouzakis, D. E. (2021). A Versatile Interrogation-Free Magnetoelastic Resonator Design for Detecting Deterioration-Inducing Agents. Στο M. Abdel Wahab (Επιμ.), *Proceedings of 1st International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment* (σσ. 113-119). Singapore: Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-15-9121-1_9
- Dimogianopoulos, D. G., & Mouzakis, D. E. (2021). Nondestructive Contactless Monitoring of Damage in Joints between Composite Structural Components Incorporating Sensing Elements via 3D-Printing. *Applied Sciences*, 11(7), 3230. doi:<https://doi.org/10.3390/app11073230>
- Johnson, T. J., Brown, R. L., Adams, D. E., & Schiefer, M. (2004). Distributed structural health monitoring with a smart sensor array. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18(3), 555-572. doi:10.1016/S0888-3270(03)00002-5
- Lomuscio, S. (2021). *Getting Started with the Kruskal-Wallis Test*. University of Virginia Library. University of Virginia. Ανάκτηση από <https://library.virginia.edu/data/articles/getting-started-with-the-kruskal-wallis-test>
- Moncrieff, J., Clement, R., Finnigan, J., & Meyers, T. (2005). Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series. Στο X. Lee, W. Massman, & B. Law (Επιμ.), *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis* (σσ. 7-31). Springer Netherlands. doi:10.1007/1-4020-2265-4_2
- Oppenheim, A., & Schaffer, R. (2013). *Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος* (3η εκδ.). (Ε. Κάλφα, Χ. Βεργίνης, & Α. Δομέτιος, Μεταφρ.) Αθήνα: FountasBooks.
- The Concise Encyclopedia of Statistics. (2008). New York: Springer New York. doi:10.1007/978-0-387-32833-1_17
- Καραϊσκος, Χ. Γ., & Κάντζος, Δ. Κ. (2015). *Σήματα και Συστήματα Συνεχούς και Διακριτού Χρόνου*. Αθήνα: Σύγχρονη Εκδοτική.
- Λιώκη-Λειβαδά, Η., & Ασημακόπουλος, Δ. Ν. (2010). *Μαθήματα εφαρμοσμένης στατιστικής*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
- Σουλτάνα, Ρ. Γ. (2022, 07 12). *Ανίχνευση μεταβολής δομικών χαρακτηριστικών δοκού με τη χρήση αλγοριθμικών μη-καταστροφικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών επί πειραματικών δεδομένων από αισθητήρια μη-επαφής*. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Μηχανικών

Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
doi:10.26265/polyno-2338

Παράρτημα Α

Κώδικας και συναρτήσεις του MATLAB[®] που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων

Εξαγωγή των σημάτων από τα αρχεία .CSV

Αρχικά έπρεπε από τα αρχεία CSV να ληφθούν οι απαραίτητες πληροφορίες στο workspace του MATLAB[®]. Το αρχείο εκτός από τις τιμές τάσης και χρόνου περιέχει ορισμένες πληροφορίες για την κάθε μέτρηση που λαμβάνουν χώρο στις πρώτες 18 γραμμές του αρχείου στις στήλες Format και A. Το κομμάτι που είναι απαραίτητο από αυτά τα αρχεία είναι οι τιμές της τάσης, καθώς ο χρόνος μπορεί να ανασκευαστεί αφού γνωρίζουμε την διάρκεια του αρχείου (2 sec) και την περίοδο δειγματοληψίας ($T_s = 1\mu\text{sec}$). Οι στήλες είναι 2000018 σε μήκος οπότε μετά από τις πρώτες 18 σειρές των metadata ακολουθούν τα $2 \cdot 10^6$ δείγματα τάσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.1

Σχήμα (Π) Α.1: Η μορφή ενός αρχείου .CSV που περιέχει μέτρηση

	A	B
	DS0001	
	Format A	
	Number	Number
1	Format	2.0A
2	Memory Le...	2000000
3	Trigger Level	0.00V
4	Source	CH1
5	Label	
6	Probe Ratio	1.000E+00
7	Vertical Units	V
8	Vertical Scale	5.000E-02
9	Vertical Pos...	-2.000E-03
10	Horizontal ...	S
11	Horizontal S...	2.000E-01
12	Horizontal ...	0.000E+00
13	Horizontal ...	Roll Mode
14	Sampling P...	1.000E-06
15	Firmware	V1.19
16	Time	23-Jun-23 1...
17	Mode	Detail
18	Waveform ...	
19	-1.000000e...	-1.40e-02
20	-9.999990e...	-2.80e-02
21	-9.999980e...	-1.20e-02
22	-9.999970e...	-3.20e-02

} Πληροφορίες μέτρησης (metadata)
} Δεδομένα καταγραφής
} Δείγματα στον Μετρούμενη τάση χρόνο

Ακολουθεί η συνάρτηση που δημιουργήθηκε αυτόματα από το MATLAB® για την εισαγωγή των δεδομένων από το παράθυρο import, επιλέγοντας την στήλη της τάσης και πατώντας Generate Function στο εργαλείο Import Selection

```
function DS0001 = importfile1(filename, dataLines)
%IMPORTFILE1 Import data from a text file
% DS0001 = IMPORTFILE1(FILENAME) reads data from text file FILENAME for
% the default selection. Returns the numeric data.
%
% DS0001 = IMPORTFILE1(FILE, DATALINES) reads data for the specified
% row interval(s) of text file FILENAME. Specify DATALINES as a
% positive scalar integer or a N-by-2 array of positive scalar integers
% for dis-contiguous row intervals.
%
% Example:
% DS0001 = importfile1("DS0001.CSV", [19, 1000019]);
%
% See also READTABLE.
%
% Auto-generated by MATLAB on 20-Sep-2023 19:00:55

%% Input handling

% If dataLines is not specified, define defaults
if nargin < 2
    dataLines = [19, 1000019];
end

%% Set up the Import Options and import the data
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 2);

% Specify range and delimiter
opts.DataLines = dataLines;
opts.Delimiter = ",";

% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["Var1", "A"];
opts.SelectedVariableNames = "A";
opts.VariableTypes = ["string", "double"];

% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";

% Specify variable properties
opts = setvaropts(opts, "Var1", "WhitespaceRule", "preserve");
opts = setvaropts(opts, "Var1", "EmptyFieldRule", "auto");

% Import the data
DS0001 = readtable(filename, opts);

%% Convert to output type
DS0001 = table2array(DS0001);
end
```

Ακολουθεί ο κώδικας για την υλοποίηση του παραδείγματος συντηρητικότητας του ελέγχου Kruskal-Wallis που παρουσιάστηκε στην σχετική ενότητα.

```
% Παράδειγμα συντηρητικότητας ελέγχου Kruskal-Wallis
%
fs = 20;           % Συχνότητα δειγματοληψίας
t = 0:1/fs:2-1/fs; % Δείγματα στον χρόνο (διάρκεια 2 sec) άρα πλήθος
%δειγμάτων = 2*fs
% Με την αλλαγή της συχνότητας δειγματοληψίας επιτυγχάνεται αύξηση/μείωση
% του αριθμού δειγμάτων

X = 0.8 + sin(2*pi*0.5*t); % Ημίτονο f=0.5Hz με σταθερή τιμή 0.80
Y = 0.75 + sin(2*pi*0.5*t);% Ημίτονο f=0.5Hz με σταθερή τιμή 0.75

figure; plot(t,X,t,Y);%Διάγραμμα των δύο ημιτόνων στον χρόνο

signal_valuesxy = [X;Y]';% Μεταβλητή με δύο στήλες τις τιμές των ημιτόνων
% x και y

psample40_sinusoids = kruskalwallis(signal_valuesxy);%Εφαρμόζεται έλεγχος
% Kruskal-Wallis στην μεταβλητή signal_valuesxy, κάθε στήλη αποτελεί μια
% ξεχωριστή ομάδα δειγμάτων. Δημιουργείται διάγραμμα σύγκρισης, πίνακας
%ANOVA και η τιμή p εκχωρείται στην μεταβλητή psample40_sinusoids
```

Η συνάρτηση που υλοποιήθηκε για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier και η δημιουργία των διαγραμμάτων μονόπλευρου φάσματος πλάτους της συχνότητας που είναι το διάγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την προβολή του φασματικού περιεχόμενου των σημάτων και για την σύγκριση τους στην συχνότητα.

```
function [freqs,fft_amplitude] = FF_transform(signal,fs,A)

%οι μιγαδικές τιμές του μετασχηματισμού FFT
Y = fft(signal);

%samples: Το πλήθος δειγμάτων του σήματος
samples = length(signal);
%υπολογισμός του αμφίπλευρου πλάτους P2
P2 = abs(Y/samples);

%Ο υπολογισμός του μονόπλευρου πλάτους P1 βασίζεται στο πλάτος P2,
%παίρνοντας το πρώτο μισό του φάσματος και πολλαπλασιάζοντας όλες τις τιμές
%επί 2
P1 = P2(1:samples/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
%f είναι το εύρος συχνότητας του FFT (από DC μέχρι fs/2)
f = fs*(0:(samples/2))/samples;
%Επιστροφή αυτών των μεταβλητών απο την συνάρτηση
freqs = f;
fft_amplitude = P1;
%συνθήκη if που ελέγχει αν θα δημιουργούνται τα διαγράμματα
if A == 1
%Μονόπλευρο φάσματα πλάτους του FFT
figure
plot(f,P1);
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of Signal');
xlabel('f(Hz)');
ylabel('P1(f)');
fontsize(gcf, 13, 'points');
grid on;
%Μονόπλευρο φάσματα πλάτους του FFT στις χαμηλές συχνότητες
figure
plot(f,P1);
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of Signal');
xlabel('f(Hz)');
ylabel('P1(f)');
xlim([0 5000]);
fontsize(gcf, 13, 'points');
grid on;
else
end
end
```

Στην συνέχεια γίνεται παράθεση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την χειραγώγηση του συνόλου των μετρήσεων ως ενός ενιαίου πίνακα για να γίνεται παράλληλα επεξεργασία για όλες τις μετρήσεις. Καθώς ο διαχωρισμός των μετρήσεων σε δύο ίσα τμήματα διπλασίασε τις διαθέσιμες μετρήσεις έπρεπε να γίνουν υπολογισμοί και να βρεθούν διάφορες τιμές για $2*33 = 66$ διαφορετικές μετρήσεις κάτι που δεν θα ήταν δυνατόν να γίνει με την χειραγώγηση κάθε μέτρησης ως ξεχωριστή μεταβλητή. Στα σχόλια του κώδικα δίνεται η μέθοδος `preallocating` που ήταν πολύ χρήσιμη και οι λεπτομέρειες για τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται και τους υπολογισμούς που λαμβάνουν μέρος

```
function[s,sdetrend,P1,P1localmax,P1OI,f,...
    FreqsOI] = SignalExtraction(fs,forN,filename,data_start, ...
    data_end,slength,P1length,maxN)

% ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ
% s = signal_matrix
% sdetrend = signal_matrix detrended
% P1 = μονόπλευρα πλάτη
% P1OI = μονόπλευρα πλάτη περιοχών ενδιαφέροντος
% f = εύρος συχνότητας μετασχηματισμού
% FreqsOI = τιμές συχνότητας που προκύπτουν οι μεγαλύτερες κορυφές

%ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ
% fs: συχνότητα δειγματοληψίας
% forN: αριθμός επαναλήψεων στους βρόχους, ίσος με τον αριθμό των
% διαφορετικών σημάτων
% filename: cell array μεταβλητή που περιέχει τα ονόματα των αρχείων
% data_start: η αρχή της στήλης δεδομένων που λαμβάνεται απο την συνάρτηση
% importfile1
% data_end: το τέλος της στήλης δεδομένων που λαμβάνεται απο την συνάρτηση
% importfile1
% slength: το μήκος του σήματος
% P1length: το μήκος των μονόπλευρων πλατών FFT
% maxN

% ΜΕΘΟΔΟΣ PREALLOCATING: Η δημιουργία πινάκων-μεταβλητών με μηδενικά στις
% οποίες οι βρόγχοι for θα προσθέτουν τις τιμές. Αυτή η τεχνική κάνει πιο
% αποδοτικό τον υπολογισμό των πινάκων αυτών εφόσον γνωρίζουμε το μήκος
% τους απο πριν

s = zeros(slength, forN);
P1= zeros(P1length,forN);
P1_lm_freqs = zeros(P1length,forN);
P1_lmROI = zeros(P1length, forN);
P1_lm_ROI_values = zeros(P1length,forN);
P1OI = zeros(maxN,forN);
index_P1OI = zeros(maxN,forN);
FreqsOI = zeros(maxN,forN);
```

Ακολουθούν διάφοροι υπολογισμοί εντός της συνάρτησης στην επόμενη σελίδα

```

%βρόχος υπολογισμού του πίνακα σου περιέχει όλα τα σήματα s, όλα τα σήματα
%με αφαίρεση μέσου, τον πίνακα fft των σημάτων
%υπολογισμός του μήκους σήματος και του αμφίπλευρου πλάτους FFT P2
for i = 1:forN
    %όλα τα σήματα s import file συνάρτηση για μετατροπή του CSV αρχείου σε
    % 2*10^6 δείγματα τάσης
    s(:,i) = [importfile1(char(filename(i)),[data_start,data_end])];
    %όλα τα σήματα με αφαίρεση μέσου (sdetrend)
    sdetrend = s - mean(s);
    %τον πίνακα fft των σημάτων all_signals_fft
    all_signals_fft = fft(sdetrend);
    %υπολογισμός του μήκους σήματος
    vector_length = length(sdetrend);

    %υπολογισμός αμφίπλευρου πλάτους FFT P2
    P2values = abs(all_signals_fft./vector_length);
end
for i = 1:forN
    %υπολογισμός μονόπλευρου πλάτους FFT P1
    P1(:,i) = P2values(1:vector_length/2+1,i);
    P1(2:end-1,i) = 2*P1(2:end-1,i);
end
%υπολογισμός εύρους συχνότητας FFT
f = fs*(0:(vector_length/2))/vector_length;
%λογικό διάνυσμα που υπολογίζει ποιες τιμές στον πίνακα P1 είναι τοπικό
%μέγιστό
localmaxima_signals = islocalmax(P1);
% οι δυαδικές τιμές του προηγούμενου διανύσματος πολλαπλασιάζονται με τις
% τιμές του πίνακα πλατών FFT, δίνοντας έναν πίνακα με μόνες τιμές αυτές
% στα τοπικά μέγιστα
P1localmax = P1.*localmaxima_signals;

```

Ακολουθούν μερικοί ακόμη υπολογισμοί εντός της συνάρτησης στην επόμενη σελίδα

```

for i = 1:forN

% Οι τιμές στην συχνότητα που εντοπίζονται τα τοπικά μέγιστα στον
% πίνακα μονόπλευρων πλατών (κορυφές). Η συχνότητα FFT και τα
% μονόπλευρα πλάτη P1 είναι ίσα διανύσματα
P1_lm_freqs(:,i) = f'.*localmaxima_signals(:,i);

%Οι τιμές στην συχνότητα που εντοπίζονται τα τοπικά μέγιστα (κορυφές),
%στις συχνότητες ενδιαφέροντος, με την χρήση λογικών κανόνων
P1_lmROI(:,i) = (P1_lm_freqs(:,i) > 316250 & ...
P1_lm_freqs(:,i) < 316470) | (P1_lm_freqs(:,i) > 1350 & ...
P1_lm_freqs(:,i) < 1460) | (P1_lm_freqs(:,i) > 1800 & ...
P1_lm_freqs(:,i) < 1920) | (P1_lm_freqs(:,i) > 2000 & ...
P1_lm_freqs(:,i) < 2200);
% | (P1_localmax_freqs(:,i) > 2680 & P1_localmax_freqs(:,i) < 2805)%
% Οι τιμές των πλατών των κορυφών που βρίσκονται στις περιοχές
% ενδιαφέροντος
P1_lm_ROI_values(:,i) = P1localmax(:,i).*P1_lmROI(:,i);
%Ευρεση των maxN μεγαλύτερων τιμών απο τα πλάτη που βρίσκονται στις
%περιοχές ενδιαφέροντος. Οι μεγαλύτερες τιμές κάθε στήλης αναπαριστούν
%τις μεγαλύτερες κορυφές στις περιοχές ενδιαφέροντος στην συχνότητα
[P1OI(:,i),index_P1OI(:,i)] = maxk(P1_lm_ROI_values(:,i),maxN);
%ΟΙ τιμές στην συχνότητα που έχουν τις
% τις μεγαλύτερες κορυφές στις περιοχές ενδιαφέροντος
FreqsOI(:,i) = f(index_P1OI(:,i))';
end

%κατάταξη των δεδομένων με φθίνουσα σειρά
% τιμές συχνότητας με τις κορυφές των 4 περιοχών ενδιαφέροντος για όλες τις
% μετρήσεις
FreqsOI = sort(FreqsOI, 'descend')';
% τα πλάτη των κορυφών των 4 περιοχών ενδιαφέροντος για όλες τις
% μετρήσεις
P1OI = sort(P1OI, 'descend');

```

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η συνάρτηση SignalExtraction() χάρη στην οποία υπολογίζονται οι πολύ σημαντικοί πίνακες που περιέχουν τις τιμές συχνότητας στις περιοχές ενδιαφέροντος. Αυτοί χρησιμοποιούνται παρακάτω για να υπολογιστούν οι τιμές σημαντικότητας p-values του ελέγχου Kruskal-Wallis και για την δημιουργία διαγραμμάτων errorbars. Θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτοί οι πίνακες επαληθεύτηκαν σε συνδυασμό με τα διαγράμματα των φασμάτων των μετρήσεων.

Στα επόμενα κομμάτια κώδικα υπολογίζονται οι τιμές του ελέγχου Kruskal-Wallis καθώς και τα διαγράμματα μεταβολής εύρους για την περιοχή 316 kHz. Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να υπολογιστούν και για τις υπόλοιπες περιοχές.

```
% ΜΕΘΟΔΟΣ PREALLOCATING: Η δημιουργία πινάκων-μεταβλητών με μηδενικά στις
% οποίες οι βρόγχοι for θα προσθέτουν τις τιμές. Αυτή η τεχνική κάνει πιο
% αποδοτικό τον υπολογισμό των πινάκων αυτών εφόσον γνωρίζουμε το μήκος
% τους απο πριν
%Απο τους πίνακες με τις τιμές των κορυφών στην συχνότητα για τα δύο
%τιμήματα κάθε μέτρησης λαμβάνεται η πρώτη στήλη και ανασχηματίζονται σε
%πίνακες 3x11 και συνδέονται κάθετα. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένας
%πίνακας 6x11 με όλες τις τιμές κορυφών στην περιοχή 316με κάθε στήλη
%να αντιπροσωπεύει ένα σετ μετρήσεων
FreqsOI316 = [reshape(FreqsOIa(:,1),3);reshape(FreqsOIb(:,1),3)];
Pvalues316 = zeros(11,11);
% Εμφολευσμένος βρόχος για την δημιουργία τετραγωνικού πίνακα συγκρίσεων
% Kruskal-Wallis μεταξύ των τιμών των κορυφών στην συχνότητα για την
% περιοχή των 316 KHz
% categories: cell array που περιέχει τα 11 διαφορετικά προφίλ διέγερσης
for v = 1:11
for i = 1:11
Pvalues316(v,i) = kruskalwallis(FreqsOI316(:,[v i]),categories([v i]), ...
    'off');
end
end
%Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών στην συχνότητα, για όλα τα προφίλ στην
%περιοχή ενδιαφέροντος 316 kHz
errorbar(c,median(FreqsOI_all316), ...
    median(FreqsOI_all316) - min(FreqsOI_all316), ...
    max(FreqsOI_all316) - median(FreqsOI_all316),".");
```

Διάφορα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν

```
%Διάγραμμα μονόπλευρου φάσματος FFT των επιλεγμένων μετρήσεων
figure;
plot(f_segment,P1values_a(:,[1 11 24 31]), ...
     f_segment,P1values_b(:,[5 7 13 18 21 27 30]));
grid on
fontsize(gcf,26,"points");
grid on;

%Τυπικό διάγραμμα δύο διαδοχικών σει μετρήσεων μονόπλευρου φάσματος FFT
figure;
plot(f_segment,P1values_a(:,19:21),'b',f_segment, ...
     P1values_b(:,19:21),'b',f_segment,P1values_a(:,22:24),'r', ...
     f_segment,P1values_b(:,22:24),'r');
fontsize(gcf, 26, 'points');
grid on;

%Τυπικό διάγραμμα αυτοσυσχέτισης. Η δεύτερη τιμή είναι ο αριθμός των lags
%που προβάλλονται στο συσχετιόγραμμα
figure; autocorr(sdetrend(:,1),60);
```