



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής

Ανάπτυξη αισθητηρίου που λειτουργεί με την αρχή ανέπαφης
ανίχνευσης και καταγραφής δεδομένων: Διερεύνηση μορφών
(προφίλ) διέγερσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΛΥΒΑΣ

ΑΜ:19389276

Επιβλέπων:

Δημογιαννόπουλος Δημήτριος

Καθηγητής

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

Department of Industrial Design and Production Engineering

Development of contact-less sensing devices based on ambient
vibration: Exploring
possibilities of excitation sources and profiles.

Diploma Thesis

by

JOHN KALYVAS

AM:19389276

Advisor:

Dimitrios G. Dimogianopoulos

Professor

SEPTEMBER 2024

**Ανάπτυξη αισθητηρίου που λειτουργεί με την αρχή ανέπαφης
ανίχνευσης και καταγραφής δεδομένων: Διερεύνηση μορφών (προφίλ)
διέγερσης**

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	Επίκουρος Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ιωάννης Καλύβας του Σωτηρίου , με αριθμό μητρώου 19389276 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/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



Ιωάννης Καλύβας

Περιεχόμενα

Πίνακας εικόνων	- 7 -
Πίνακας πινάκων	- 11 -
Περίληψη	- 12 -
Abstract	- 13 -
Αναγνωρίσεις	- 14 -
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην διατριβή	- 15 -
Κεφάλαιο 2: Πειραματική διάταξη και σχεδιασμός σημάτων διέγερσης	- 21 -
2.1 Περιγραφή πειράματος.....	- 21 -
2.2 Εργαλεία και υλικά	- 23 -
2.3 Ο μικροελεγκτής “Atmega328”	- 28 -
2.4 Θεωρητική ανασκόπηση της διέγερσης του φίλμ.....	- 29 -
2.5 Κινητήρας δόνησης.....	- 30 -
2.6 Σχεδιασμός των σημάτων διέγερσης.....	- 31 -
2.7 Ανάλυση των κυκλωμάτων της διέγερσης.....	- 31 -
2.8 Θεωρητική ανάλυση της εύρεσης τιμών RC.....	- 36 -
2.9 Σχεδίαση κυκλωμάτων και αναπαράσταση των σημάτων με τον παλμογράφο .-	36 -
2.10 Χρονοσειρές.....	- 44 -
Κεφάλαιο 3: Εργαλεία στην προεργασία των σημάτων και στην επεξεργασία των δεδομένων	- 45 -
3.1 Καταγραφή των σημάτων	- 45 -
3.2 Σήματα στο πεδίο της συχνότητας –Μετασχηματισμός Fourier.....	- 46 -
3.3 Μετασχηματισμός Fourier στο Matlab	- 52 -
3.4 Μέθοδοι ελέγχου στατιστικών υποθέσεων	- 55 -
3.4.1 θεωρητικό υπόβαθρο στατιστικών ελέγχων	- 55 -
3.4.2 Στατιστικός έλεγχος υποθέσεων Kruskal-wallis	- 57 -
3.4.3 Στατιστικός έλεγχος υποθέσεων Kolmogorov-smirnov	- 60 -
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία σύγκρισης σημάτων και ανάλυση των αποτελεσμάτων -	63 -
4.1 Σύγκριση των σημάτων στο πεδίο του χρόνου	- 63 -
4.2 Σύγκριση των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας	- 64 -
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις	- 95 -
5.1 Συμπεράσματα	- 95 -

5.2 Μελλοντικές προτάσεις και προκλήσεις	- 98 -
Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία.....	- 99 -
Κεφάλαιο 7: Παραρτήματα και κώδικες.....	- 101 -
7.1 Κώδικας στο ARDUINO	- 101 -
7.2 Κώδικας στο MATLAB®	- 105 -

Πίνακας εικόνων

1Σχήμα 1.1:Μαγνητοσυστολή-Μαγνητοελαστικότητα	- 17 -
2Σχήμα 2.1.1:(α)Πειραματική διάταξη (β) Παλμογράφος	- 22 -
3Σχήμα 2.1.2:(α)Φορτίο στα 4 cm (β)Φορτίο στα 6 cm (γ)Φορτίο στα 8 cm	- 22 -
4Σχήμα 2.2.1:Χάρακας “EXAS PAPER”	- 23 -
5Σχήμα 2.2.2:Μικροελεγκτής “Atmega328”	- 23 -
6Σχήμα 2.2.3:Πηνίο	- 24 -
7Σχήμα 2.2.4:Το μαγνητοελαστικό φιλμ κολλημένο στον χάρακα επι της κόκκινης γραμμής (στο μισό του πλάτους)	- 24 -
8Σχήμα 2.2.5:Κινητήρας δόνησης τύπου νομίσματος με ενσωμάτωση σε “module”..	- 25 -
9Σχήμα 2.2.6:Καλώδια τύπου “alligator”	- 25 -
10Σχήμα 2.2.7:Καλώδια “Dupont male to male “	- 26 -
11Σχήμα 2.2.8:Καλώδιο με βύσμα 3-pin.....	- 26 -
12Σχήμα 2.2.9:“Breadboard –Full size”	- 26 -
13Σχήμα 2.2.10:Αντίσταση	- 27 -
14Σχήμα 2.2.11:Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής.....	- 27 -
15Σχήμα 2.2.12:“Probes” για παλμογράφο	- 27 -
16Σχήμα 2.2.13:Ψηφιακό παχύμετρο	- 27 -
17Σχήμα 2.4.1:Σχηματική διάταξη στρεπτικής δόνησης.....	- 29 -
18Σχήμα 2.5.1:Δομικά μέρη κινητήρα δόνησης τύπου νομίσματος.....	- 30 -
19Σχήμα 2.7.1:Γραφική παράστασή φόρτισης πυκνωτή.....	- 33 -
20Σχήμα 2.7.2:Γραφική παράστασή εκφόρτισης πυκνωτή	- 33 -
21Σχήμα 2.7.3:Σχηματική διάταξη του κυκλώματος RC	- 34 -
22Σχήμα 2.7.4:τετραγωνικός παλμός	- 34 -
23Σχήμα 2.7.5:Στάδιο φόρτισης-εκφόρτισης πυκνωτή με παράδειγμα μέσω του MATLAB.....	- 35 -
24Σχήμα 2.9.1:Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 30Hz-αναπαράσταση στο Kicad	- 37 -
25Σχήμα 2.9.2:Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου	- 37 -
26Σχήμα 2.9.3:Hardware μέρος για το προφίλ των 30 Hz	- 37 -
27Σχήμα 2.9.5:Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου	- 38 -
28Σχήμα 2.9.6:Hardware μέρος για το προφίλ των 60 Hz	- 38 -
29Σχήμα 2.9.7:Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 90Hz-αναπαράσταση στο Kicad	- 39 -
30Σχήμα 2.9.8:Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου	- 39 -
31Σχήμα 2.9.9:Hardware μέρος για το προφίλ των 90 Hz	- 39 -
32Σχήμα 2.9.10:Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 120Hz αναπαράσταση στο Kicad-	40 -
-	
33Σχήμα 2.9.11:Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου	- 40 -
34Σχήμα 2.9.12:Hardware μέρος για το προφίλ των 120 Hz	- 40 -
35Σχήμα 2.9.13:Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 150Hz αναπαράσταση στο Kicad-	41 -
-	
36Σχήμα 2.9.14:Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου	- 41 -
37Σχήμα 2.9.15:Hardware μέρος για το προφίλ των 150 Hz-	41 -

38 Σχήμα 2.9.16:Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 180Hz αναπαράσταση στο Kicad-	42
-	
39 Σχήμα 2.9.17:Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου	42 -
40 Σχήμα 2.9.18:Hardware μέρος για το προφίλ των 180 Hz	42 -
41 Σχήμα 2.9.19:Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος Sweep αναπαράσταση στο Kicad-	43
-	
42 Σχήμα 2.9.20:Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου	43 -
43 Σχήμα 2.9.21:Hardware μέρος για το προφίλ Sweep	43 -
44 Σχήμα 3.1.1:Σήμα τάσης από το πηνίο ανίχνευσης στον παλμογράφο	45 -
45 Σχήμα 3.2.1 :Παράδειγμα συνεχούς και μη περιοδικού σήματος	48 -
46 Σχήμα 3.2.2 :Ο μετασχηματισμός Fourier (FT) του σήματος στο σχήμα (3.2.1).....	49 -
47 Σχήμα 3.2.3 :Παράδειγμα διακριτού και μη περιοδικού σήματος.....	49 -
48 Σχήμα 3.2.4 :Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (DTFT) του σήματος στο σχήμα (3.2.3).....	50 -
49 Σχήμα 3.2.5 :Παράδειγμα Διακριτού και περιοδικού σήματος	50 -
50 Σχήμα 3.2.6 :Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) του σήματος στο σχήμα (3.2.5).....	51 -
51 Σχήμα 3.3.1:Παράδειγμα σήματος με την παρουσία θορύβου : $\sin(2\pi 50t) + \text{random}(\text{noise})$	52 -
52 Σχήμα 3.3.2:Αναπαράσταση FFT με τον αλγόριθμο του Matlab.....	53 -
53 Σχήμα 3.3.3:Αναπαράσταση FFT σήματος από τυχαία μέτρηση στο παλμογράφο και η παρουσία του DC offset.....	54 -
54 Σχήμα 3.4.1:Τύπικη κανονική κατανομή μέσω Matlab.....	56 -
55 Σχήμα 4.1.1:Αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στο πεδίο του χρόνου μέσω του MATLAB	63 -
56 Σχήμα 4.1.2:Αναπαράσταση του ληφθέντων σήματος κατόπιν διέγερσης στα 30 Hz στο πεδίο του χρόνου μέσω του MATLAB.....	63 -
57 Σχήμα 4.1.3:Αναπαράσταση των σημάτων σε κοινό διάγραμμα μέσω του MATLAB ..	64 -
58 Σχήμα 4.2.1:Αναπαράσταση του θορύβου από το πεδίο του χρόνου (α) στο πεδίο της συχνότητας (β) μέσω του MATLAB	65 -
59 Σχήμα 4.2.2:Αναπαράσταση του ληφθέντων σήματος κατόπιν διέγερσης 30 Hz από το πεδίο του χρόνου (α) στο πεδίο της συχνότητας (β) μέσω του MATLAB.....	66 -
60 Σχήμα 4.2.3:Αναπαράσταση του ληφθέντων σήματος κατόπιν διέγερσης 30Hz σε κοινό σύστημα αξόνων με τον θόρυβο στο πεδίο της συχνότητας μέσω του MATLAB.....	67 -
61 Σχήμα 4.2.4:Αναπαράσταση FFT διέγερσης –θορύβου προσεγγίζοντας την υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB	68 -
62 Σχήμα 4.2.5:Αναπαράσταση FFT διέγερσης – θορύβου προσεγγίζοντας την δεύτερη υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB	68 -
63 Σχήμα 4.2.6:Αναπαράσταση FFT διέγερσης – θορύβου προσεγγίζοντας την τρίτη υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB	69 -
64 Σχήμα 4.2.7:Αναπαράσταση FFT διέγερσης – θορύβου προσεγγίζοντας την τέταρτη υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB	69 -

65 Σχήμα 4.2.8:Αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης μέσω του MATLAB.....	- 70 -
66 Σχήμα 4.2.9:Αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης προσεγγίζοντας την υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB	- 70 -
67 Σχήμα 4.2.10:Αναπαράσταση του FFT όλων των προφίλ διέγερσης προσεγγίζοντας την δεύτερη ψηλότερη κορυφή των μέσω του MATLAB.....	- 71 -
68 Σχήμα 4.2.11:Αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης προσεγγίζοντας την τρίτη ψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB	- 71 -
69 Σχήμα 4.2.12 :Αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης προσεγγίζοντας την τέταρτη υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB	- 72 -
70 Σχήμα 4.2.13:Ποσοστιαία διαφορά πλάτους ως προς το μέγιστο πλάτος για τις κορυφές συχνοτήτων που επιλέχθηκαν με βάση την 2 ^η ημέρα μετρήσεων.	- 75 -
71 Σχήμα4.2.14:Αναπαράσταση ιστογράμματος σύγκρισης με την κανονική κατανομή- 75 -	- 75 -
72 Σχήμα 4.3.1:Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης στα 180 Hz για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 4 cm από το φιλμ(κόκκινο χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης των 180 Hz χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα)..	- 77 -
73 Σχήμα4.3.2:Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz.....	- 78 -
74 Σχήμα 4.3.3:Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής	- 78 -
75 Σχήμα 4.3.4:Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2660-2710) Hz.....	- 79 -
76 Σχήμα 4.3.5:Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.....	- 79 -
77 Σχήμα 4.3.6:Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης SWEEP για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 4 cm από το φιλμ(πορτοκαλί χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης SWEEP χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα)..	- 80 -
78 Σχήμα 4.3.7: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5330-5440) Hz.....	- 81 -
79 Σχήμα 4.3.8:Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.	- 81 -
80 Σχήμα 4.3.9: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2670-2715) Hz.	- 82 -
81 Σχήμα 4.3.10:Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.....	- 82 -
82 Σχήμα 4.3.11: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης στα 180 Hz για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 6 cm από το φιλμ(πετρολ χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης των 180 Hz χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα)..	- 83 -
83 Σχήμα 4.3.12: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz.....	- 84 -

84 Σχήμα 4.3.13: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.	- 84 -
85 Σχήμα 4.3.14: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2670-2720) Hz.	- 85 -
86 Σχήμα 4.3.15: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.	- 85 -
87 Σχήμα 4.3.16: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης SWEEP για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 6 cm από το φιλμ (μωβ χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης SWEEP χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα).	- 86 -
88 Σχήμα 4.3.17: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz.	- 87 -
89 Σχήμα 4.3.18: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.	- 87 -
90 Σχήμα 4.3.19: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2660-2715) Hz.	- 88 -
91 Σχήμα 4.3.20: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.	- 88 -
92 Σχήμα 4.3.21: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης στα 180 Hz για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 8 cm από το φιλμ (μπλε χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης των 180 Hz χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα).	- 89 -
93 Σχήμα 4.3.22: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz.	- 90 -
94 Σχήμα 4.3.23: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.	- 90 -
95 Σχήμα 4.3.24: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2660-2720) Hz.	- 91 -
96 Σχήμα 4.3.25: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.	- 91 -
97 Σχήμα 4.3.26: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης SWEEP για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 8 cm από το φιλμ (πράσινο χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης SWEEP χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα).	- 92 -
98 Σχήμα 4.3.27: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz.	- 93 -
99 Σχήμα 4.3.28: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.	- 93 -
100 Σχήμα 4.3.29: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2660-2720) Hz.	- 94 -
101 Σχήμα 4.3.30: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.	- 94 -
102 Σχήμα 4.3.31: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz για τις θέσεις των 6 και 8 cm σε κοινό διάγραμμα.	- 95 -

103 Σχήμα 4.3.32:Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής για τις θέσεις των 6 και 8 cm σε κοινό διάγραμμα.	- 96 -
104 Σχήμα 4.3.33: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (2660-2720) Hz για τις θέσεις των 6 και 8 cm σε κοινό διάγραμμα.	- 97 -
105 Σχήμα 4.3.34:Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής για τις θέσεις των 6 και 8 cm σε κοινό διάγραμμα.	- 97 -

Πίνακας πινάκων

1 Πίνακας 3.4.1:Παράδειγμα εφαρμογής του τεστ Kruskal wallis.....	- 57 -
2 Πίνακας 3.4.2:Αποτελέσματα έρευνας	- 58 -
3 Πίνακας 3.4.3:Κατατάξεις των δεδομένων.....	- 58 -
4 Πίνακας 3.4.4:Άθροισμα κατατάξεων	- 59 -
5 Πίνακας 3.4.5:Χρονικά Δεδομένα	- 61 -
6 Πίνακας 3.4.6:Αποτελέσματα για την εύρεση του D	- 62 -
7 Πίνακας 4.2.1:Εξεταζόμενες περιοχές ανά ημέρα μετρήσεων.....	- 73 -
8 Πίνακας 4.2.2:Ποσοστιαία διαφορά των αποστάσεων ανά περιοχή από την υψηλότερη κορυφή για όλες τις διεγέρσεις.	- 74 -
9 Πίνακας 4.3.1 :P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440 Hz) ανά τεστ.	- 78 -
10 Πίνακας 4.3.2:P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2710) Hz ανά τεστ.	- 79 -
11 Πίνακας 4.3.3:P-values για το εύρος συχνοτήτων (5330-5440) Hz ανά τεστ.	- 81 -
12 Πίνακας 4.3.4:P-values για το εύρος συχνοτήτων (2670-2715) Hz ανά τεστ.	- 82 -
13 Πίνακας 4.3.5:P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440 Hz) ανά τεστ	- 84 -
14 Πίνακας 4.3.6:P-values για το εύρος συχνοτήτων (2670-2720) Hz ανά τεστ.	- 85 -
15 Πίνακας 4.3.7:P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440) Hz ανά τεστ.	- 87 -
16 Πίνακας 4.3.8:P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2715) Hz ανά τεστ.	- 88 -
17 Πίνακας 4.3.9:P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440) Hz ανά τεστ.	- 90 -
18 Πίνακας 4.3.10:P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2720) Hz ανά τεστ.	- 91 -
19 Πίνακας 4.3.11:P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440) Hz ανά τεστ.	- 93 -
20 Πίνακας 4.3.12:P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2720) Hz ανά τεστ.	- 94 -
21 Πίνακας 4.3.13:P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440) Hz ανά τεστ.	- 96 -

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή έχει ως σκοπό την ανάπτυξη ενός αισθητηρίου που βασίζεται στην αρχή της ανέπαφης ανίχνευσης και καταγραφής δεδομένων. Το αισθητήριο αυτό έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί χωρίς φυσική επαφή με το αντικείμενο μέτρησης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διερεύνηση διαφορετικών μορφών ή προφίλ διέγερσης, με στόχο να κατανοηθούν οι επιδράσεις αυτών στην απόδοση και την αποτελεσματικότητα του αισθητηρίου. Αρχικά περιγράφεται η διάταξη του πειράματος και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την δόμηση του, επεξηγώντας την διαδικασία κατασκευής. Η διάταξη αποτελείται από μια δοκό προβόλου με ένα μαγνητοελαστικό φιλμ να είναι ενσωματωμένο πάνω της. Ενεργό στοιχείο της διέγερσης αποτελεί ένας κινητήρας δόνησης που ενεργοποιείται από τον μικροελεγκτή του Arduino. Ο συγκεκριμένος κινητήρας δόνησης είναι τύπου νομίσματος και προσκολλάται στην ελεύθερη άκρη της δοκού. Ωστόσο τα σήματα διέγερσης του κινητήρα διαμορφώνονται καταλλήλως με την χρήση απλών κυκλωμάτων εξετάζοντας τα σε έναν παλμογράφο. Ύστερα ακολουθεί η καταγραφή των σημάτων τάσης με την χρήση του παλμογράφου που προκύπτουν από τα τυλίγματα ενός πηνίου λήψης το οποίο βρίσκεται σε μια μικρή απόσταση πάνω από το φιλμ. Καθώς ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις για όλα τα προφίλ διέγερσης ακολουθεί η αναπαράσταση των δεδομένων στο πεδίο της συχνότητας για την μετέπειτα ανάλυση τους. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η σύγκριση των προφίλ διέγερσης ώστε να διαπιστωθεί ποιο από αυτά παρέχει την καλύτερη απόδοση. Τέλος πραγματοποιούνται δοκιμές όπου τοποθετούνται φορτία σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της δοκού, τόσο για το καλύτερο όσο και για το χειρότερο προφίλ διέγερσης. Οι δοκιμές αυτές επιτρέπουν την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του αισθητηρίου υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τις διαφορετικές θέσεις φορτίων αναλύονται με τη χρήση στατιστικών μεθόδων, προκειμένου να εξεταστούν οι αποκλίσεις στην ευαισθησία και την ακρίβεια του αισθητηρίου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται για να επιβεβαιωθεί η υπεροχή του καλύτερου προφίλ διέγερσης και να εντοπιστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του αισθητηρίου στο χειρότερο προφίλ.

Abstract

The present thesis aims to develop a sensor based on the principle of contactless detection and data recording. This sensor is designed to operate without physical contact with the object being measured. Particular emphasis is placed on investigating different forms or profiles of excitation, with the goal of understanding their effects on the performance and efficiency of the sensor. First, the experimental setup and the materials used for its construction are described, explaining the building process. The device consists of a cantilever beam with a magnetoelastic film embedded on it. The active component of the excitation is a vibration motor, which is activated by an Arduino microcontroller. The specific vibration motor is coin type and is attached to the free end of the beam. The excitation signals of the motor are modulated using simple circuits, and these signals are examined using an oscilloscope. Following this, the voltage signals generated from the windings of a coil, positioned a short distance above the film and the signals are recorded using the oscilloscope. Once the necessary measurements for all excitation profiles are obtained, the data are plotted in the frequency domain for subsequent analysis. The comparison of the excitation profiles is conducted to determine which profile yields the best results. Finally, tests are performed where loads are placed at various positions along the beam for the best and worst excitation profiles. These tests allow for the evaluation of the sensor's behavior under different loading conditions. The measurements taken from the various load positions are analyzed using statistical methods to examine deviations in the sensor's sensitivity and accuracy. The results are compared to confirm the superiority of the best excitation profile and to identify the factors that negatively affect the sensor's performance with the worst profile.

Αναγνωρίσεις

Εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Γ. Δημογιαννόπουλο για την πολύτιμη καθοδήγηση και την διαρκή υποστήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Η συνεχή παρουσία τους αποτέλεσε καθοριστικό ρόλο για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που μου παρείχαν στήριξη κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην διατριβή

Ο όρος "αρχή της ανέπαφης ανίχνευσης" αναφέρεται στην ικανότητα της μέτρησης φυσικών μεγεθών, με την προϋπόθεση ότι δεν υφίσταται φυσική επαφή μεταξύ του αισθητηρίου και του αντικειμένου της μέτρησης. Δηλαδή οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι ικανοί να λειτουργούν και να μετρούν μεγέθη σε περιβάλλοντα που η επαφή με το αντικείμενο ανίχνευσης δεν είναι επιθυμητή. Στην παρούσα εργασία μελετάται η λειτουργία ενός ανέπαφου αισθητηρίου, όπου κατά τη διαδικασία της ανίχνευσης αξιοποιείται το φαινόμενο της μαγνητικής επίδρασης στην ελαστικότητα. Δηλαδή, στην περίπτωση που μεταβληθούν οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού όπως η ελαστικότητα, αλλάζουν οι μαγνητικές του ιδιότητες και αυτές μετρούνται από ένα πηνίο που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το φιλμ. Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρουσιάζεται πειραματικά διεγείροντας ένα μαγνητοελαστικό φιλμ, το οποίο έχει τοποθετηθεί πάνω στην άκρη μιας δοκού, η οποία είναι πακτωμένη. Τα αισθητήρια που λειτουργούν με τη μαγνητοελαστική αρχή συμβάλλουν σε περιπτώσεις εφαρμογών, όπου τα συνήθη όργανα μέτρησης δεν μπορούν να αξιοποιηθούν με ασφάλεια, λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών με υψηλό βαθμό κινδύνου για τον άνθρωπο. Επίσης, τα μαγνητοελαστικά αισθητήρια μπορούν να είναι εκτεθειμένα σε χημικές ουσίες και να έχουν αξιόπιστα αποτελέσματα, χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση του ανθρώπου. Ακόμη, τα αισθητήρια αυτά μπορούν να επωφεληθούν για την έγκαιρη ανίχνευση διάφορων τοξικών ουσιών που προκαλούν μακροχρόνια βλάβη στην υγεία των ανθρώπων, όπως τις πτητικές οργανικές ενώσεις (volatile organic compounds). (Dimogianopoulos D, 2021 B)

Στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιείται το μαγνητοελαστικό φιλμ από σιδηρομαγνητικό υλικό "Metglas 2826 MB". Το συγκεκριμένο υλικό καθορίζει την απόκριση του αισθητηρίου στις αλλαγές του μαγνητικού πεδίου. Κύρια πρόκληση στο επίκεντρο της μελέτης των ερευνητών για τα μαγνητοελαστικά αισθητήρια αποτελεί ο χαρακτηρισμός της ευαισθησίας και η βελτίωση της απόκρισής τους. Το "Metglas 2826 MB" αποτελείται κυρίως από σίδηρο με προσμίξεις μετάλλων, όπως το νικέλιο, το κοβάλτιο και το βόριο. Ο σκοπός της πολυσύνθετης δομής του είναι να προσδώσει στο υλικό πολύτιμες μαγνητικές και μηχανικές ιδιότητες. Μερικές σημαντικές ιδιότητες είναι η αντοχή στη διάβρωση, η αντοχή σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασιών και η υψηλή μαγνητοσυστολή του. Καθώς μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο, το φιλμ είναι ικανό να ανιχνεύει αυτές τις αλλαγές του πεδίου λόγω της υψηλής μαγνητοσυστολής που διαθέτει, δηλαδή λόγω της αλλαγής των διαστάσεών του όταν εκτίθεται σε μαγνητικό πεδίο. (Paula G, 2022)

Η μαγνητοελαστική αρχή αναφέρεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ μαγνητικών και ελαστικών ιδιοτήτων ενός υλικού. Αυτή η αλληλεπίδραση επιτρέπει τη μετατροπή της μαγνητικής ενέργειας σε ελαστική και αντίστροφα. Η μαγνητοελαστική σύζευξη περιγράφεται από δύο κύριες εξισώσεις που συνδέουν τις μηχανικές και μαγνητικές παραμέτρους του υλικού. Από την εξίσωση (1.1) υπολογίζεται η μηχανική παραμόρφωση ε με βάση την μηχανική τάση σ , την επίδραση του μαγνητικού πεδίου H , τον συντελεστή d που αναπαριστά την μεταβολή της παραμόρφωσης προς το μαγνητικό πεδίο που επενεργεί υπό σταθερή τάση και το μέτρο ελαστικότητας Young. Στην εξίσωση (1.2) εκτιμάται η μαγνητική επαγωγή B με βάση την τάση σ , την μαγνητική διαπερατότητα μ^σ (υπό σταθερή τάση), το μαγνητικό πεδίο H και τον συντελεστή d^* που αναπαριστά την παράγωγο της μαγνητικής επαγωγής B ως προς την μηχανική τάση σ με σταθερό το μαγνητικό πεδίο H . (Dimogianopoulos D, 2012)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^H} + d \cdot H \quad (1.1)$$

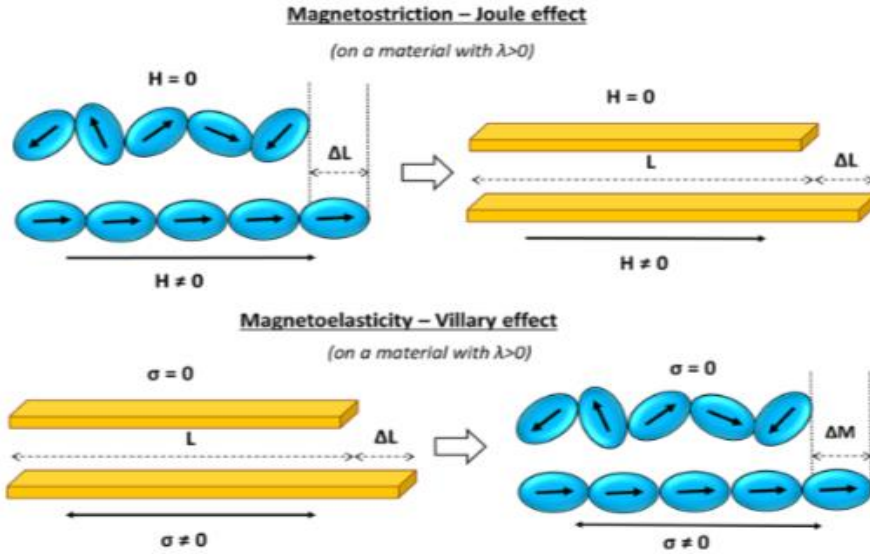
$$\text{Όπου } d = \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right|_{\sigma}$$

$$B = d^* \cdot \sigma + \mu^\sigma \cdot H \quad (1.2)$$

$$\text{Όπου } d^* = \left. \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right|_H$$

Η παραμόρφωση ενός μαγνητοστρεπτικού υλικού, δηλαδή ενός σιδηρομαγνητικού υλικού που έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει τις διαστάσεις του υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, ονομάζεται φαινόμενο Joule, ενώ η αντίστροφη διαδικασία, όπου η μαγνήτιση του υλικού αλλάζει λόγω μηχανικής παραμόρφωσης, ονομάζεται φαινόμενο Villari. (Dimogianopoulos D, 2012)

Σχήμα 1.1: Μαγνητοσυστολή-Μαγνητοελαστικότητα



Στην παραπάνω εικόνα (1.1) απεικονίζεται η επίδραση και των δύο φαινομένων σε ατομικό επίπεδο. Για τον τυχαίο προσανατολισμό των μαγνητικών δίπολων ευθύνεται το μαγνητικό πεδίο H . Στην περίπτωση που ισούται με το μηδέν, το υλικό δεν έχει υποβληθεί σε μαγνητικό πεδίο, κατά συνέπεια να βρίσκεται σε μη παραμορφωμένη κατάσταση όπως φαίνεται στην κίτρινη δοκό. Όταν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, δηλαδή το H είναι διάφορο του μηδενός, τα μαγνητικά δίπολα ευθυγραμμίζονται κατά μήκος της κατεύθυνσης του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Κατά αυτόν τον τρόπο προκαλούνται μεταβολές στις διαστάσεις του υλικού, με αποτέλεσμα το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Έτσι αναπαριστάται και το αντίστροφο φαινόμενο όπου στην προκειμένη περίπτωση η κίτρινη πλάκα υπόκειται σε μηχανική τάση, δηλαδή η μηχανική τάση σ είναι διάφορη του μηδενός. Καθώς μεταβάλλονται οι διαστάσεις της δοκού λόγω της εξωτερικής τάσης τα μαγνητικά δίπολα ευθυγραμμίζονται προς την διεύθυνση της εκάστοτε συστολής ή διαστολής της. (Paula G, 2022)

Είναι σημαντικό, πριν την ανάλυση της παρούσας μελέτης να επεξηγηθούν τα κύρια σημεία των προηγούμενων ερευνών σχετικά με την ανάπτυξη του μαγνητοελαστικού αισθητηρίου. Σε μια από τις προηγούμενες μελέτες ερευνάται η ανάπτυξη του ανέπαφου αισθητηρίου ενσωματώνοντας το μαγνητοελαστικό φιλμ σε σύνθετα ελάσματα ιών άνθρακα CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), τα οποία κατασκευάζονται με χρήση ενός FDM (Fused Deposition Modeling) 3D εκτυπωτή. (Dimogianopoulos D, 2020)

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο βασικά μέρη. Το πρώτο στάδιο του πειράματος περιλαμβάνει τα ελάσματα τύπου M-sensor και -A blanc. Το έλασμα στο οποίο έχει τοποθετηθεί ενδιάμεσα η μαγνητοελαστική κορδέλα σε ύψος 1.15 mm μετά από παύση της προσθετικής κατεργασίας του εκτυπωτή αφορά έλασμα τύπου M-sensor. Ενώ το έλασμα στο οποίο δεν έχει τοποθετηθεί η μαγνητοελαστική ταινία καθίσταται τύπου -A blanc. Για την διέγερση των ελασμάτων χρησιμοποιείται ένας δυναμικός μηχανικός αναλυτής (DMA Q800) που μέσω αυτού ελέγχεται το φορτίο που επενεργεί στο έλασμα.

Για την σχεδίαση της διάταξης του πειράματος ακολουθείται η μεθοδολογία της δυναμικής κάμψης τριών σημείων. Κατά την μέθοδο αυτή το έλασμα στηρίζεται στα άκρα του σε δύο υποστηρίγματα σχήματος κυλίνδρου και στο μέσο του ελάσματος τοποθετείται κύλινδρος στον οποίο, εφαρμόζεται το φορτίο μέσω του δυναμικού μηχανικού αναλυτή προκαλώντας έτσι, κάμψη στο έλασμα. Κατά την κάμψη του ελάσματος, το μαγνητοελαστικό φιλμ υφίσταται μηχανική παραμόρφωση, η οποία οδηγεί σε αλλαγές στη μαγνητική του κατάσταση. Αυτές οι αλλαγές στη μαγνήτιση του φιλμ καταγράφονται από ένα πηνίο λήψης που είναι τοποθετημένο σε ύψος 20 mm πάνω από το φιλμ, με την χρήση ενός λογισμικού καταγραφής δεδομένων στον υπολογιστή. Η συγκεκριμένη απόσταση των 20 mm επιλέχθηκε ως η ελάχιστη μετά από δοκιμές, για να εξασφαλιστεί ότι το σήμα που καταγράφεται είναι επαρκώς ισχυρό, ώστε να μπορεί να αναλυθεί με ακρίβεια στο Matlab. Εφόσον αναλυθούν τα δεδομένα από το πείραμα σχετικά με το έλασμα τύπου M-sensor, συγκρίνονται με τα δεδομένα από το σχετικό πείραμα με το έλασμα τύπου -A blanc. Δηλαδή συγκρίνονται τα δεδομένα από την περίπτωση της ενσωμάτωσης του φιλμ στο έλασμα μεταξύ των δεδομένων στην περίπτωση του σκέτου ελάσματος. Αυτή η σύγκριση μεταξύ των δεδομένων αποσκοπεί στη διαπίστωση ότι τα σήματα από το ανέπαφο αισθητήριο είναι αξιόπιστα και δεν οφείλονται σε τυχαίο θόρυβο ή σε άλλες εξωτερικές παρεμβολές. (Dimogianopoulos D, 2020)

Κατά το δεύτερο μέρος της έρευνας χρησιμοποιούνται ελάσματα τύπου B, C1, C2. Το έλασμα τύπου B αφορά την περίπτωση M-sensor με το φιλμ να είναι ενσωματωμένο σε ύψος 1.75 mm αυτή την φορά και το έλασμα να είναι μεγαλύτερο στο πλάτος και στο μήκος σε σχέση με αυτά του πρώτου μέρους. Το έλασμα τύπου B τοποθετείται στην διάταξη με πακτωμένο το ένα άκρο και το άλλο ελεύθερο για να υποβληθεί σε φορτίο ημιτονοειδούς μορφής που παράγεται από έναν διεγέρτη μηχανικής δύναμης. Κατά συνέπεια το έλασμα υπόκειται σε δονήσεις και το φιλμ παραμορφώνεται, προκαλώντας έτσι μεταβολές στην μαγνήτιση του, οι οποίες καταγράφονται με το πηνίο λήψης που είναι τοποθετημένο στο ίδιο ύψος από το πρώτο μέρος του πειράματος. Τα ηλεκτρικά σήματα απεικονίζονται στην οθόνη ενός ψηφιακού παλμογράφου ο οποίος συνδέεται στα άκρα του πηνίου. Τα ελάσματα τύπου C αποτελούν δομές που περιέχουν εγχοπές, με σκοπό την διάγνωση δομικών βλαβών με την χρήση του ανέπαφου αισθητηρίου. Για την περίπτωση των C ελασμάτων το C1 αναφέρεται σε έλασμα με μια εγχοπή και το C2 αναφέρεται σε έλασμα με δύο εγχοπές. Η διάταξη του πειράματος είναι ίδια με αυτήν στην περίπτωση του ελάσματος B. Για την ανίχνευση δομικών βλαβών συγκρίνεται το συχνοτικό περιεχόμενο των σημάτων από τα δεδομένα του B ελάσματος σε σχέση με αυτά του C2, με σκοπό να αξιολογηθεί η ικανότητα ανίχνευσης του ανέπαφου αισθητηρίου σχετικά με πιο σοβαρές δομικές βλάβες. (Dimogianopoulos D, 2020)

Σε μια άλλη μελέτη εξετάζεται η λειτουργία του μαγνητοελαστικού αισθητηρίου ενσωματώνοντας το σε σύνθετες δομές ελασμάτων χρησιμοποιώντας αρθρώσεις για την σύνδεση τους. Αυτές οι σύνθετες δομές δημιουργούνται με την τεχνική προσθετικής κατεργασίας, δηλαδή με την χρήση ενός FDM (Fused Deposition Modeling) 3D εκτυπωτή. (Dimogianopoulos D, 2021 A)

Κατά την διάταξη του πειράματος χρησιμοποιούνται δύο τύποι δομών οι οποίες ταξινομούνται ως η δομή-A και η δομή-B. Στην δομή-A περιλαμβάνονται δύο συνδεδεμένα ελάσματα με έναν κοχλία ενώ στην δομή-B περιλαμβάνονται τρία ελάσματα με δύο κοχλιωτές συνδέσεις. Το μαγνητοελαστικό φιλμ ενσωματώνεται στο έλασμα σε ύψος 1.75 mm και έπειτα συνεχίζεται η εκτύπωση στρώμα με στρώμα μέχρι τα 3 mm. Κατά το πείραμα, οι σύνθετες δομές των ελασμάτων έχουν το ένα άκρο τους πακτωμένο με μια μέγγενη και το άλλο άκρο ελεύθερο να υποβληθεί σε δονήσεις από έναν διεγέρτη. Πάνω από το φιλμ στα 20 mm τοποθετείται το πηνίο λήψης που μετατρέπει τις μεταβολές της μαγνήτισης του φιλμ σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία καταγράφονται από έναν ψηφιακό παλμογράφο. Η απόσταση στην οποία τοποθετείται το πηνίο επιλέγεται ως η ελάχιστη απόσταση που επιτρέπει την καταγραφή σημάτων, όπου το συχνοτικό τους περιεχόμενο είναι πιο ισχυρό από το αντίστοιχο του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που ο οποίος περιέχεται στο σήμα λήψης. Κύριος σκοπός της προκείμενης έρευνας είναι η ανίχνευση δομικών βλαβών στους συνδέσμους συγκρίνοντας το περιεχόμενο της συχνότητας των δύο δομών. (Dimogianopoulos D, 2021 A)

Επίσης, σε άλλη έρευνα έχει μελετηθεί η ευαισθησία του μαγνητοελαστικού αισθητηρίου με εξοπλισμό χαμηλού κόστους χωρίς την χρήση πολύπλοκων κυκλωμάτων ή παλμογεννητήριων. Η διέγερση προέρχεται από την δόνηση ενός απλού κινητού τηλεφώνου το οποίο έχει τοποθετηθεί πάνω στην μία πλευρά του ελάσματος. Για την αξιολόγηση της ευαισθησίας του αισθητηρίου χρησιμοποιούνται μικρά μεταλλικά βάρη από 0 έως 3 gr ως φόρτιση της δομής. Με την διέγερση της δομής ανιχνεύονται τα σήματα από το πηνίο λήψης κατά την φόρτιση και χωρίς την φόρτιση και συγκρίνονται οι μεταβολές στο περιεχόμενο της συχνότητας των σημάτων. Το πηνίο λήψης τοποθετείται στα 15 mm πάνω από το φιλμ για μια πιο αξιόπιστη καταγραφή των σημάτων. (Dimogianopoulos D, 2021 B)

Ως επέκταση των προηγούμενων ερευνών αποτελεί η ενσωμάτωση της μαγνητοελαστικής κορδέλας πάνω σε εύκαμπτες δοκούς. Η δοκός απαρτίζεται από δυο μικρότερους δοκούς οι οποίοι εκτυπώνονται από Fused Deposition Modeling (FDM) 3d εκτυπωτή και κολλιούνται μεταξύ τους με κόλλα. Η δοκός είναι πακτωμένη στο ένα άκρο της με μια μέγγενη και ως αποτέλεσμα η δοκός να δρα ως πρόβολος. Το άλλο άκρο της δοκού είναι συνδεδεμένο στην ράβδο του διεγέρτη, ο οποίος προκαλεί δονήσεις κατά μήκος της δοκού. Το πηνίο λήψης τοποθετείται σε απόσταση 5 mm από το μαγνητοελαστικό φιλμ και τα ηλεκτρικά σήματα που προκύπτουν στα τυλίγματα του πηνίου από τις μεταβολές της μαγνήτισης του φιλμ καταγράφονται από ένα ψηφιακό παλμογράφο. Μετά από πειραματισμούς, κατά τους οποίους το πηνίο τοποθετήθηκε σε αποστάσεις 20 mm και 5 mm αντίστοιχα από το φιλμ, παρατηρήθηκε στο συχνοτικό περιεχόμενο των σημάτων ότι

στην περίπτωση όπου το πηνίο βρισκόταν σε απόσταση 5 mm το σήμα της διέγερσης διαχωρίζεται καλύτερα από τον θόρυβο. Στο μέρος του πειράματος, ακολουθούν τρία σενάρια δοκιμών, με σκοπό τον εντοπισμό μεταβολών στις δονήσεις της δοκού λόγω της τοποθέτησης φορτίων στις διάφορες θέσεις της. Η θέση A βρίσκεται κοντά στο ελεύθερο άκρο της δοκού στο σημείο της διέγερσης, ενώ η θέση B βρίσκεται στην μέση της δοκού και η θέση C βρίσκεται κοντά στο μαγνητοελαστικό φιλμ. Κατά το πρώτο σενάριο, η δοκός διεγείρεται χωρίς της τοποθέτηση φορτίων. Έπειτα τοποθετείται κέρμα ενός λεπτού του ευρώ στα σημεία που προαναφέρθηκαν, διεγείροντας την δοκό για κάθε σημείο ξεχωριστά. Στην συνέχεια η δοκός διεγείρεται με την τοποθέτηση φορτίων με μεγαλύτερη μάζα χρησιμοποιώντας αυτή την φορά παξιμάδια βιδών. Ο κύριος σκοπός των δοκιμών αυτών είναι η ανίχνευση δομικών βλαβών της δοκού καθώς και η ανάπτυξη στοχαστικών μοντέλων για την περιγραφή της συμπεριφοράς της. (Sultana R, 2023)

Σε επόμενη εργασία διευρύνεται ο χαρακτηρισμός της ευαισθησίας του αισθητηρίου καθώς χρησιμοποιείται στατιστική ανάλυση με στόχο την αξιολόγηση και την σύγκριση διαφορετικών διεγέρσεων της δοκού. Οι στατιστικοί μέθοδοι αναλύουν τις φασματικές μεταβολές στα δεδομένα των μετρήσεων, διασφαλίζοντας έτσι την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η πειραματική διάταξη που αφορά την συγκεκριμένη μελέτη αποτελείται από βασικό εξοπλισμό χωρίς την χρήση πολύπλοκων κυκλωμάτων. Για την διέγερση του ελεύθερου άκρου της δοκού επενεργεί ο διεγέρτης που είναι συνδεδεμένος με μια παλμογεννήτρια ώστε να διαμορφωθεί το προφίλ της διέγερσης. Το άλλο άκρο της δοκού είναι πακτωμένο με μια μέγγενη και κοντά σε εκείνο το σημείο πάνω στην δοκό έχει τοποθετηθεί η μαγνητοελαστική ταινία Metglas® 2826MB. Το πηνίο λήψης τοποθετείται σε απόσταση 5 mm πάνω από το φιλμ και η απόσταση αυτή επιλέγεται λόγω προηγούμενης έρευνας σχετικά με τον διαχωρισμό του σήματος διέγερσης από τον θόρυβο. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι η διάγνωση σφαλμάτων με στατιστικές μεθόδους, χρησιμοποιώντας κέρματα ενός λεπτού του ευρώ ως φορτία στις τρεις θέσεις που προαναφέρθηκαν σε προηγούμενη μελέτη. Αναλύοντας τα διαστήματα εύρους κορυφών, δηλαδή τις μετατοπίσεις κορυφών στις περιοχές συχνοτήτων του φάσματος των σημάτων, γίνεται η διάγνωση των φορτίων. (Davrados A, 2024)

Κεφάλαιο 2: Πειραματική διάταξη και σχεδιασμός σημάτων διέγερσης

2.1 Περιγραφή πειράματος

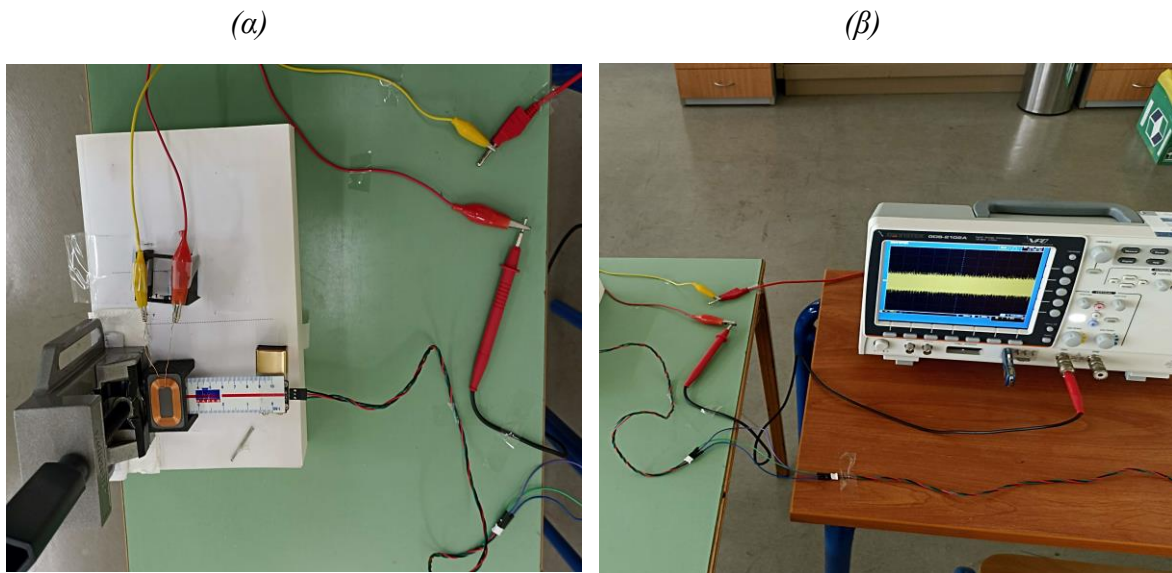
Κατά το πρώτο μέρος της σχεδίασης του πειράματος το μαγνητοελαστικό φιλμ (2.2.4) έχει τοποθετηθεί πάνω στην μια άκρη ενός χάρακα (2.2.1), ο οποίος λειτουργεί ως δοκός (2.1.1). Η δοκός αυτή είναι σταθερά προσαρμοσμένη με τη βοήθεια μιας μέγγενης, καθώς κρίνεται απαραίτητο η διάταξη να είναι σταθερή για την ακρίβεια των μετρήσεων. Σε ύψος 14mm από το μαγνητοελαστικό τοποθετείται το πηνίο (2.2.3), το οποίο στηρίζεται πάνω σε πλατφόρμα σχήματος τραπεζιού. Η απόσταση του πηνίου από το φιλμ μετρήθηκε με παχύμετρο (2.2.13) και επιλέχθηκε στα 14mm, διότι σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες η μέγιστη απόσταση για την καταγραφή αξιόπιστου σήματος είναι στα 20mm. Όσο πιο κοντά βρίσκεται το πηνίο στο φιλμ τόσο πιο αξιόπιστες θα είναι οι μετρήσεις. Ωστόσο με την επιλογή της τοποθέτησης του πηνίου ακόμη πιο χαμηλά μπορεί να προκύψουν κίνδυνοι που σχετίζονται με την σταθερότητα της πειραματικής διάταξης. Δηλαδή μπορεί κάποιο έντομο να εισέλθει στο κενό ανάμεσα στο πηνίο και το φιλμ, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να απομακρυνθεί χωρίς να διαταραχθεί η πειραματική διάταξη. Κουνώντας την διάταξη μεταβάλλονται οι συνθήκες του πειράματος και έτσι επηρεάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. (Dimogianopoulos D, 2020)

Αφού δημιουργείται η πάκτωση με την χρήση της μέγγενης, στην άλλη άκρη της δοκού προσκολλάται ο κινητήρας δόνησης (2.2.5). Η τοποθέτηση του κινητήρα γίνεται με την βοήθεια κολλητικής ταινίας διπλής όψεως, αλλά και της χρήσης του κατάλληλου αντικείμενου ώστε να ευθυγραμμιστεί ο χάρακας. Ωστόσο η διάταξη περιλαμβάνει πλατφόρμα με προσκολλημένα τα καλώδια (2.2.6) που συνδέονται με τα άκρα του πηνίου. Τα καλώδια αυτά οδηγούν στον παλμογράφο (2.1.1) (βλέπε β) τα οποία είναι συνδεδεμένα με τα καλώδια τύπου Probes (2.2.12) και έτσι γίνεται η μέτρηση για το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από τις μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο.

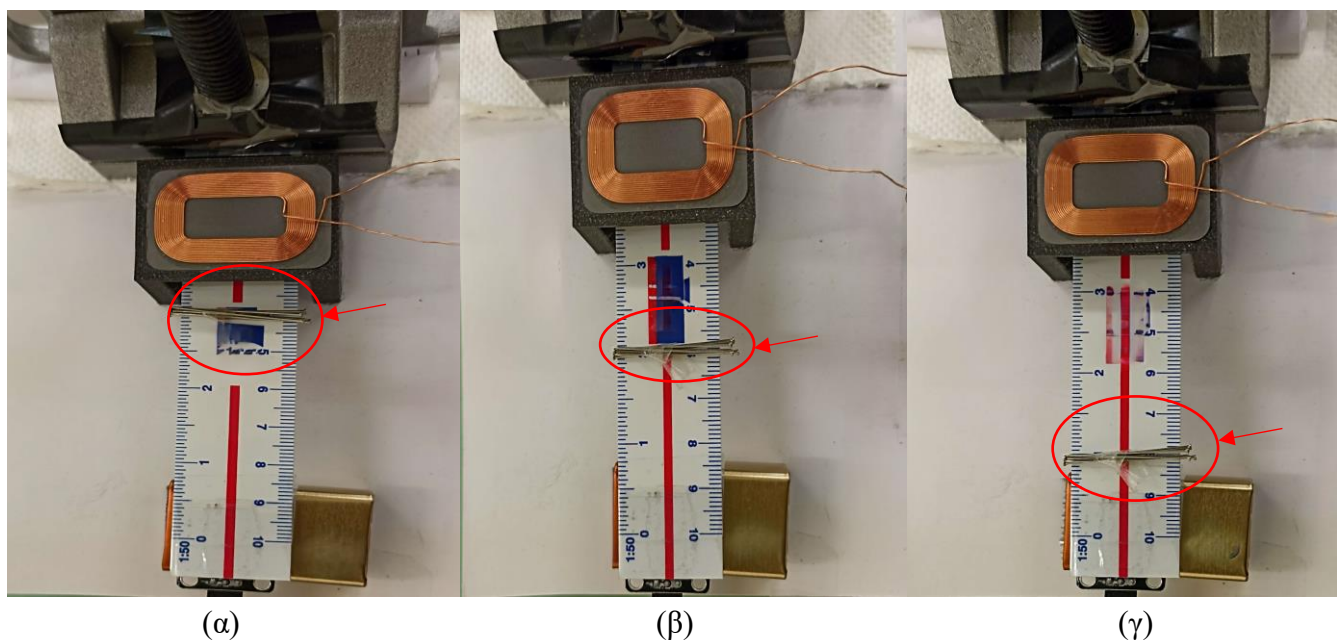
Το επόμενο μέρος της πειραματικής διάταξης αφορά την προετοιμασία της διέγερσης του φιλμ, μέσω της παραγόμενης δόνησης του κινητήρα. Ο κινητήρας δόνησης τύπου νομίσματος είναι ενσωματωμένος σε μια πλακέτα, η οποία περιλαμβάνει το κύκλωμα ενίσχυσης του κινητήρα (2.2.5). Για την παραγωγή των διάφορων διεγέρσεων χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής Atmega328 Arduino-Uno (2.2.2) που διαθέτει ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού. Στην παρούσα πειραματική διάταξη το Arduino λειτουργεί ως παλμογεννήτρια σημάτων για την ενεργοποίηση του κινητήρα δόνησης. Καθώς θα εξεταστούν διάφορα προφίλ διέγερσης απαιτείται και η κατάλληλη παραμετροποίηση των παλμών που παράγει ο μικροελεγκτής. Για να επιτευχθεί η κατασκευή των σχετικών σημάτων διέγερσης, χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα κυκλώματα σε συνδεσμολογία με τον μικροελεγκτή και την πλακέτα του κινητήρα δόνησης. Για την σύνδεση των κυκλωμάτων και της πλακέτας του κινητήρα δόνησης χρησιμοποιούνται καλώδια τύπου “DFROBOT” 50 cm με βύσμα 3-pin (2.2.8).

Το τελευταίο μέρος της πειραματικής διάταξης περιλαμβάνει την τοποθέτηση μεταλλικών μικρών φορτίων πάνω στον χάρακα στα 4, 6, 8 cm (2.1.2) σύμφωνα με την κλίμακα. Τα φορτία που επιλέχθηκαν είναι καρφίτσες, όπου η μία καρφίτσα ζυγίζει 0.08 gr. Με βάση την μελέτη (Dimogianopoulos D, 2021 B), έχει επιλεχθεί να πραγματοποιηθούν δοκιμές με βάρη των 0,5 γραμμαρίων για την περαιτέρω ανάλυση της ευαισθησίας του συστήματος, με στόχο τη βελτιστοποίηση του προφίλ διέγερσης. Έτσι χρειάζονται 6 καρφίτσες $6 \times 0.08 = 0.48 \text{ gr}$, οι οποίες προσκολλώνται με κολλητική ταινία διπλής όψευς.

Σχήμα 2.1.1: (α) Πειραματική διάταξη (β) Παλμογράφος



Σχήμα 2.1.2: (α) Φορτίο στα 4 cm (β) Φορτίο στα 6 cm (γ) Φορτίο στα 8 cm



2.2 Εργαλεία και υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την διάταξη του πειράματος είναι τα εξής:

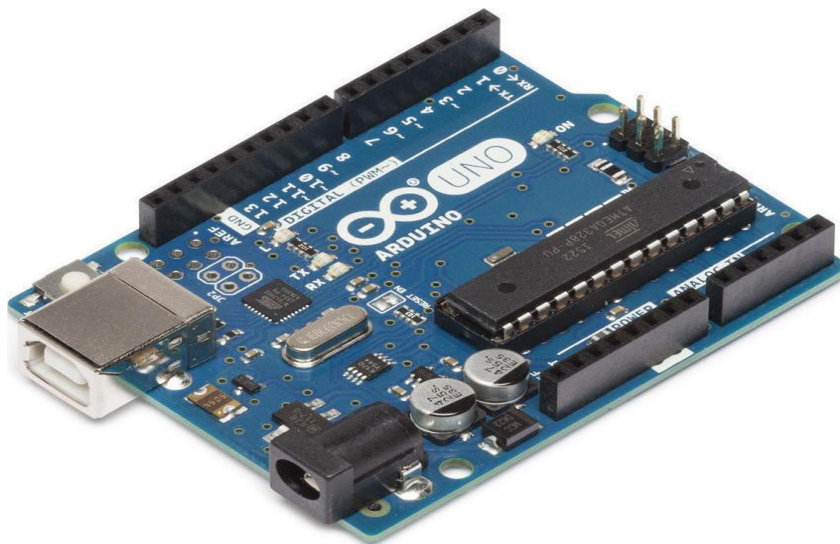
- Πλαστικός χάρακας 10cm από την “EXAS PAPER”, με κόκκινη γραμμή ακριβώς στο μισό του πλάτους του (Σχ. 2.2.1).

Σχήμα 2.2.1 : Χάρακας “EXAS PAPER”



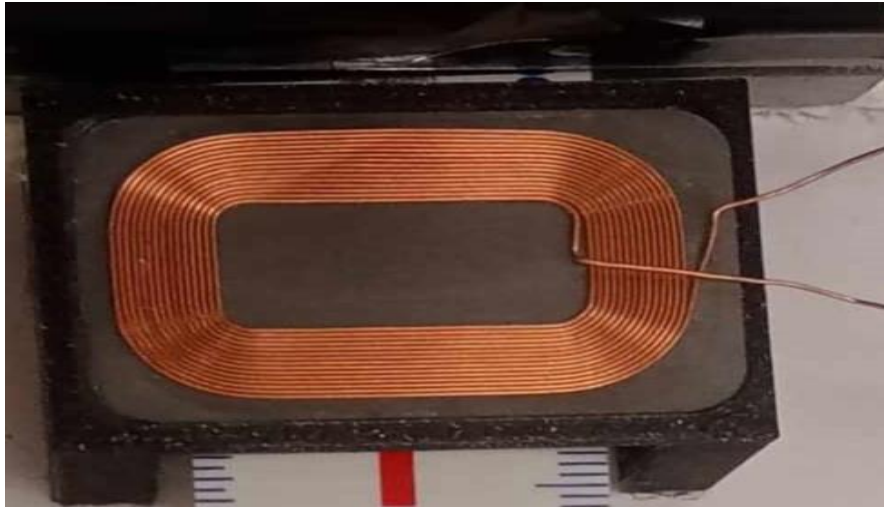
- Ένας “Arduino-Uno” μικροελεγκτής “Atmega328”, (Σχ. 2.2.2).

Σχήμα 2.2.2 : Μικροελεγκτής “Atmega328”



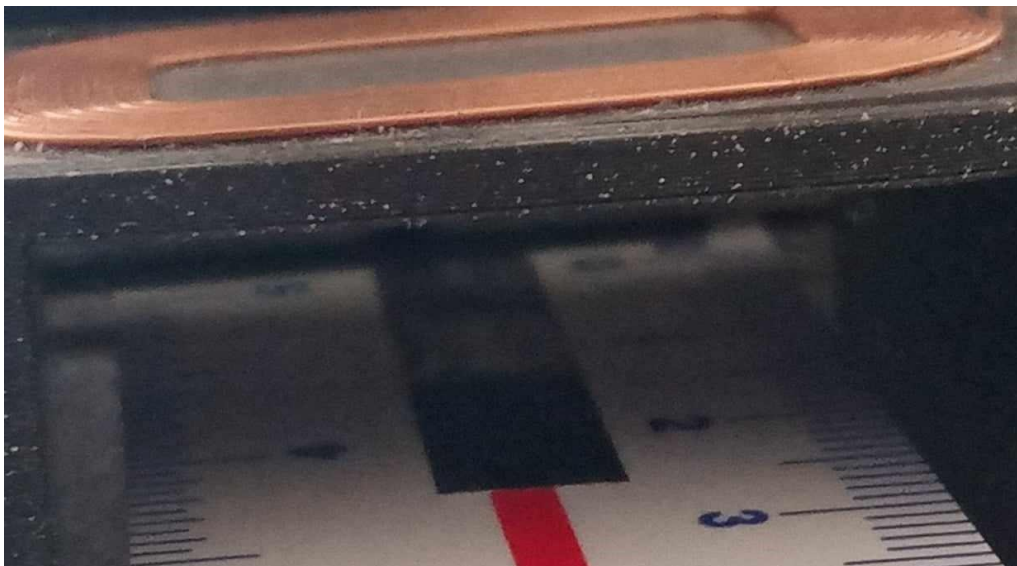
- Ψηφιακός παλμογράφος της “INSTEK” τύπου “GDS-2102AGW” για την καταγραφή και την λήψη των δεδομένων του σήματος που μετρείται από το πηνίο, αλλά και για την προετοιμασία των προφίλ διέγερσης (2.1.1) (βλέπε εικόνα (β)).
- Πηνίο ανίχνευσης το όποιο μετράει την μαγνητική ροή από το μαγνητοελαστικό φιλμ (Σχ. 2.2.3).

Σχήμα 2.2.3: Πηνίο



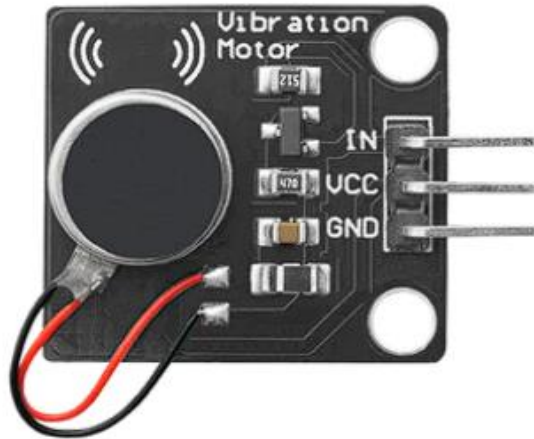
- Το μαγνητοελαστικό φιλμ τύπου "Metglas 2826 MB" είναι το κεντρικό στοιχείο που μελετάται σε αυτό το πείραμα. Αυτό το υλικό επιλέχθηκε λόγω των εξαιρετικών μαγνητοελαστικών ιδιοτήτων του, οι οποίες το καθιστούν ιδανικό για δημιουργία ανέπαφου αισθητηρίου (Σχ. 2.2.4) .

Σχήμα 2.2.4: Το μαγνητοελαστικό φιλμ κολλημένο στον χάρακα επι της κόκκινης γραμμής (στο μισό του πλάτους)



- Μια μέγγενη και 2 πλατφόρμες κατασκευασμένες από 3D εκτυπωτή για την στήριξη του πηνίου και των καλωδίων.
- Κινητήρας δόνησης ενσωματωμένος σε πλακέτα (Σχ. 2.2.5).

Σχήμα 2.2.5: Κινητήρας δόνησης τύπου νομίσματος με ενσωμάτωση σε “module”



- Καλώδια τύπου “alligator” δύο πλευρών για την σύνδεση στα άκρα του πηνίου και για την μέτρηση των δεδομένων του σήματος διέγερσης (Σχ. 2.2.6).

Σχήμα 2.2.6: Καλώδια τύπου “alligator”



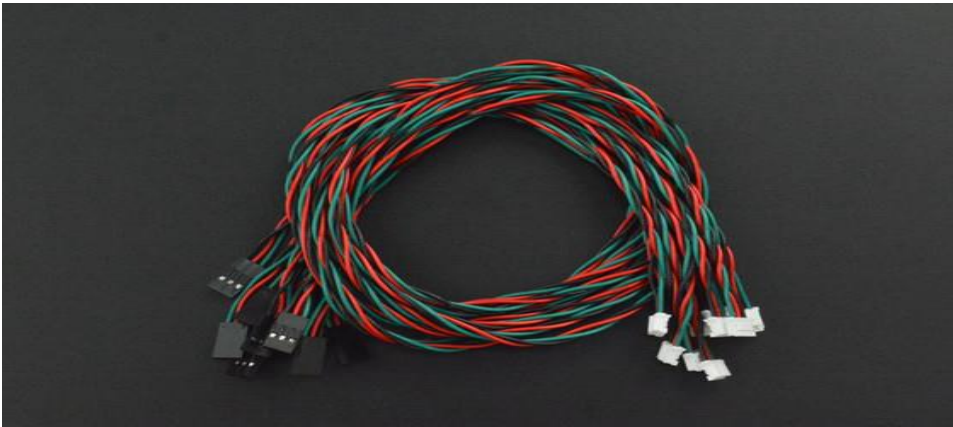
- Καλώδια τύπου “Dupont male to male “ για την σύνδεση των “pin” του “Arduino” με την διάταξη των κυκλωμάτων για τα προφίλ διέγερσης (Σχ. 2.2.7).



Σχήμα 2.2.7: Καλώδια “Dupont male to male “

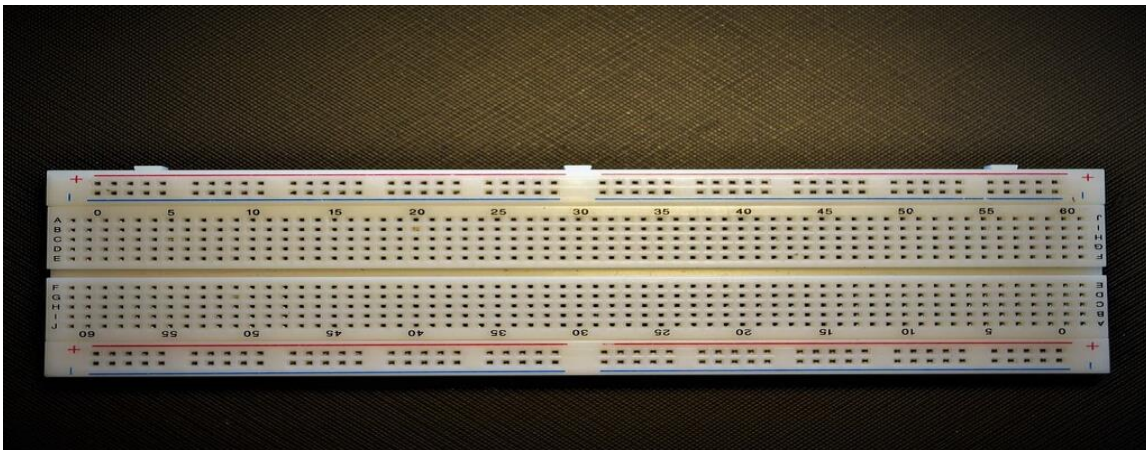
- Καλώδιο από την “DFROBOT” 50 cm με βύσμα 3-pin για την συνδεσμολογία του vibrator motor με τα κυκλώματα (Σχ. 2.2.8).

Σχήμα 2.2.8: Καλώδιο με βύσμα 3-pin



- “Breadboard –Full size” για την δημιουργία των κυκλωμάτων διέγερσης (Σχ. 2.2.9).

Σχήμα 2.2.9: “Breadboard –Full size”



- Αντιστάσεις με διάφορες τιμές ,για την διαμόρφωση των κυκλωμάτων και του πλάτους της τάσης (Σχ. 2.2.10).



Σχήμα 2.2.10: Αντίσταση

- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές για την διαμόρφωση των παλμών με διάφορες τιμές χωρητικότητας (Σχ. 2.2.11).



Σχήμα 2.2.11: Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής

- Καλώδια τύπου “Probes” για τις εισόδους του παλμογράφου (Σχ. 2.2.12) .



Σχήμα 2.2.12: “Probes” για παλμογράφο

- Ψηφιακό παχύμετρο για την μέτρηση των αποστάσεων στην διάταξη της δοκού και του μαγνητοελαστικού φιλμ (Σχ. 2.2.13) .

Σχήμα 2.2.13: Ψηφιακό παχύμετρο



2.3 Ο μικροελεγκτής “Atmega328”

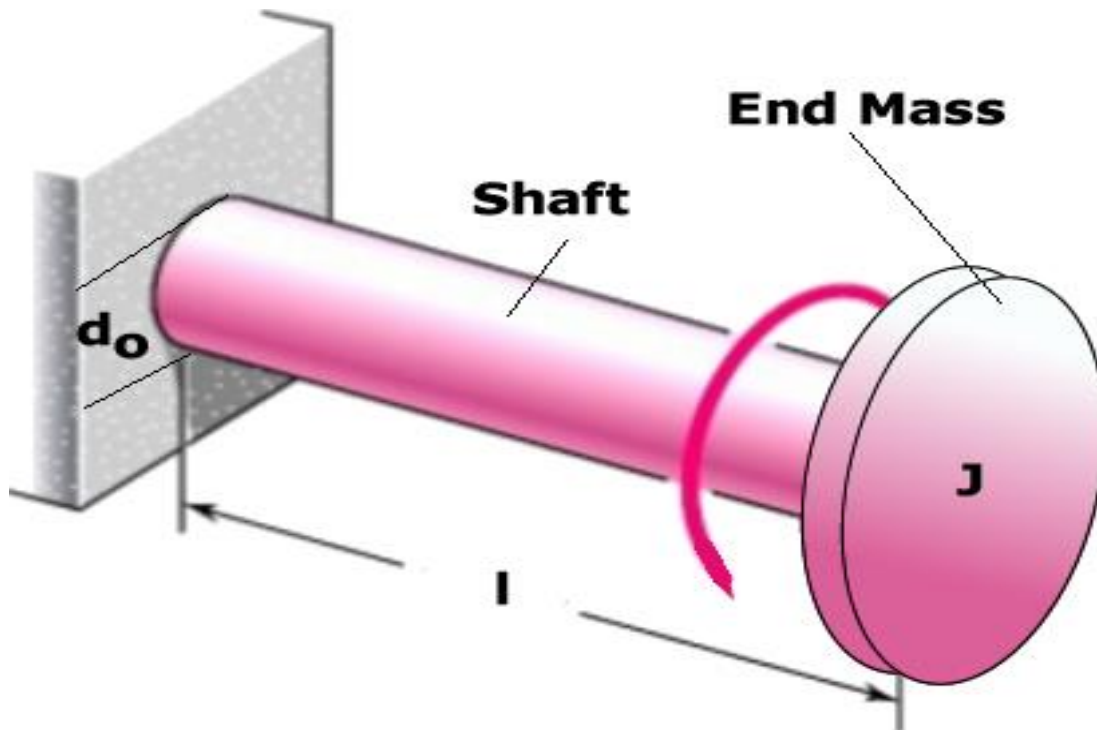
Το “Arduino” αποτελεί πλακέτα ανοικτού κώδικα, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ηλεκτρονικών συστημάτων (2.2.2). Περιλαμβάνει τον μικροελεγκτή “AVR ATmega328” και το περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού, το οποίο αποτελεί μια εύχρηστη πλατφόρμα για τους χρήστες. Απευθύνεται για μηχανικούς και χομπίστες, προσφέροντας μία οικονομική λύση για τους εκπαιδευτές. Η μητρική πλακέτα του “Arduino” περιλαμβάνει το κύκλωμα τροφοδοσίας, την διασύνδεση μεταξύ του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή, καθώς και τις διάφορες εισόδους-εξόδους. Η γλώσσα προγραμματισμού ακολουθεί τους συντακτικούς κανόνες της γλώσσας “C”, με την παροχή αρκετών επιπρόσθετων βιβλιοθηκών και διαδικασιών. Έτσι, ο κώδικας καθίσταται πιο εύκολος για τον χρήστη, διότι ίδιος μπορεί να τον δημιουργήσει στο περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού με κάποιο “Sketch”. Με την μεταφόρτωση των εντολών (upload) μέσω της θύρας “USB” ο μικροελεγκτής σαρώνει τον κώδικα και εκτελεί τις καθορισμένες εντολές. Ο μικροελεγκτής “AVR ATmega328” είναι ένας 8-bit ελεγκτής, που σημαίνει ότι επεξεργάζεται δεδομένα σε μονάδες των 8 bit, και λειτουργεί με τάση τροφοδοσίας 5 volt. Επίσης παρέχει 14 ψηφιακές εξόδους-εισόδους, αλλά και 6 αναλογικές εισόδους. (Καλοφωλιάς Δ, 2017)

Όπως προαναφέρθηκε η πλακέτα του “Arduino” απαρτίζεται από 14 ψηφιακές θύρες 0-13 “pins”, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή παλμού στα κυκλώματα. Έκτος από τις θύρες εξόδου στην διάταξη των κυκλωμάτων διέγερσης χρησιμοποιούνται οι θύρες των “GROUND” για την γείωση των “breadboards” και της πλακέτας του κινητήρα δόνησης. Ακόμη αξιοποιείται η θύρα των 5 “volt” για την τροφοδοσία των “breadboards” (2.2.9) και της πλακέτας του κινητήρα δόνησης. Η ενσωμάτωση του κινητήρα δόνησης με το “Arduino” για την επίτευξη ελεγχόμενης δόνησης αποτελεί το μηχανικό μοντέλο του συστήματος. Η πλακέτα του κινητήρα δόνησης περιλαμβάνει ενσωματωμένο “MOSFET” για την ενίσχυση του σήματος ελέγχου που παράγεται από το “Arduino”. Έτσι με τον κατάλληλο προγραμματισμό του “Arduino” ενεργοποιείται ο κινητήρας δόνησης.

2.4 Θεωρητική ανασκόπηση της διέγερσης του φιλμ

Η διέγερση του μαγνητοελαστικού φιλμ έχει πρωταρχικό ρόλο στην λειτουργία του ανέπαφου αισθητηρίου, καθώς ευθύνεται για τις μεταβολές των μαγνητικών ιδιοτήτων του φιλμ. Στην παρούσα εργασία μελετάται η μηχανική διέγερση του φιλμ μέσω μηχανικών ταλαντώσεων που προκαλούνται με την χρήση στοιχείου δόνησης. Γενικότερα η στρεπτική δόνηση σε ένα περιστροφικό άξονα δημιουργείται από την επίδραση έντονων ροπών στρέψης (2.4.1). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει στους κινητήρες δόνησης, καθώς αναπτύσσονται και κραδασμοί από τα διάφορα μέρη του συστήματος μετάδοσης της κίνησης. Για την ανάλυση των διάφορων δονήσεων που προκαλούνται από τις υψηλές ταχύτητες στρέψης κρίσιμο ρόλο έχει η συχνότητα τους, η οποία μπορεί να συμπίπτει με τις φυσικές συχνότητες του κάθε συστήματος με αποτέλεσμα να δημιουργείται συντονισμός, δηλαδή να αυξάνεται το πλάτος των ταλαντώσεων. (Jayanthan P, 2018)

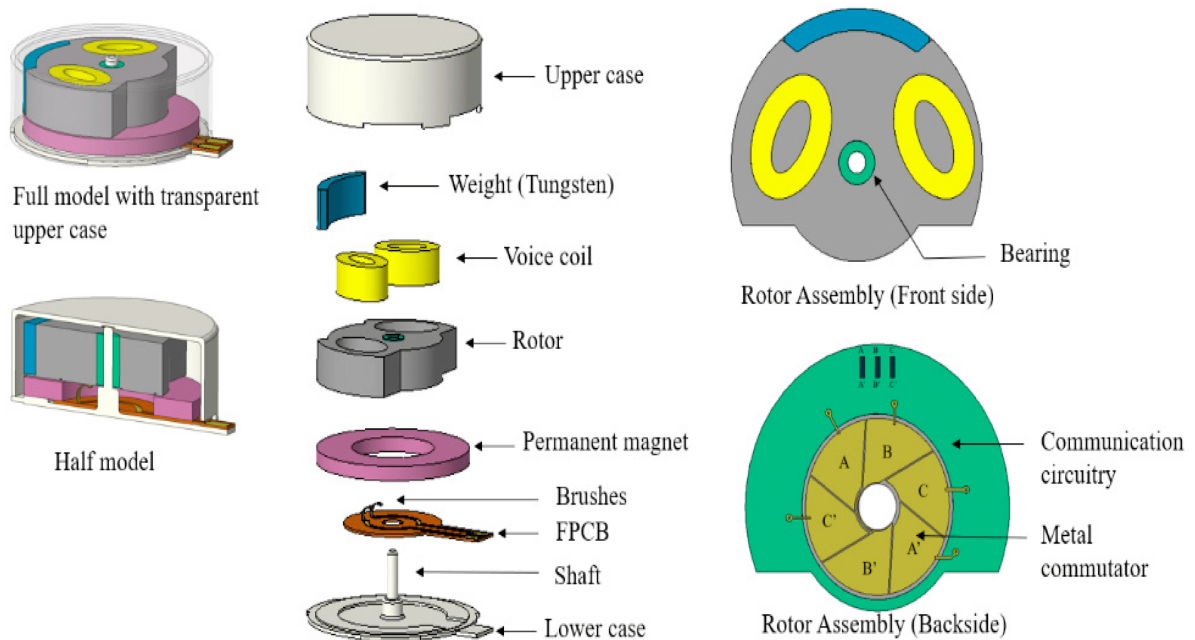
Σχήμα 2.4.1: Σχηματική διάταξη στρεπτικής δόνησης



2.5 Κινητήρας δόνησης

Ο κινητήρας δόνησης αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην παρούσα διατριβή, καθώς αξιοποιείται για την παραγωγή της διέγερσης. Γενικά οι δονήσεις παράγονται από τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τον κινητήρα και από την αλληλεπίδρασή του με το μαγνητικό πεδίο. Κατά την λειτουργία, ο κινητήρας δόνησης παρουσιάζει δονήσεις στον ρότορα του, οι οποίες μεταφέρονται σε μηχανική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα στην πειραματική διάταξη χρησιμοποιείται κινητήρας δόνησης τύπου νομίσματος (2.5.1). Αυτό το είδος κινητήρα αποτελείται από ένα σταθερό μέρος και ένα κινούμενο μέρος. Στο σταθερό μέρος περιέχεται το άνω και κάτω περίβλημα μαζί με τον άξονα, αλλά και η πλακέτα (FPCB) με το μαγνήτη. Ο ρότορας περιλαμβάνει τα λεγόμενα voice coils τα όποια είναι υπεύθυνα για την παραγωγή δονήσεων όταν διαπερνά το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του πηνίου. (Jiang Z, 2020)

Σχήμα 2.5.1: Δομικά μέρη κινητήρα δόνησης τύπου νομίσματος



2.6 Σχεδιασμός των σημάτων διέγερσης

Για το σχεδιασμό των σημάτων διέγερσης, είναι σημαντικό να επιλεγθούν συχνότητες που θα επιτρέψουν μια ευρεία και λεπτομερή ανάλυση της απόκρισης του ανέπαφου αισθητηρίου. Η επιλογή ενός ευρύ φάσματος συχνοτήτων για την δοκιμή της ανίχνευσης του αισθητηρίου επιτρέπει την εξέταση της απόκρισής του σε διαφορετικές συνθήκες, παρέχοντας μια καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του. Καθώς εξετάζονται διαφορετικές συχνότητες δόνησης, μπορεί να αποκαλυφθούν διάφορες αδυναμίες ή περιορισμοί του αισθητηρίου. Τα προφίλ που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή είναι συνολικά επτά. Τα έξι από αυτά διαμορφώνονται σε τριγωνική μορφή με συχνότητες 30, 60, 90, 120, 150, και 180 Hz. Η τριγωνική μορφή δονήσεων επιλέγεται γιατί μπορεί να προσομοιώσει πιο ρεαλιστικές συνθήκες δόνησης που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε πραγματικές εφαρμογές, όπως σε μηχανικά συστήματα ή δομές που υπόκεινται σε παλινδρομικές κινήσεις. Το τελευταίο προφίλ αποτελείται από τετραγωνικό παλμό τύπου "SWEEP" με σάρωση όλων των συχνοτήτων. Αυτό το προφίλ επιτρέπει την ανάλυση της απόκρισης του αισθητηρίου σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων με μία συνεχή μετάβαση. Η χρήση του "SWEEP" προφίλ είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον εντοπισμό συγκεκριμένων συχνοτήτων στις οποίες το αισθητήριο μπορεί να παρουσιάζει μέγιστη ή ελάχιστη ευαισθησία. Αυτό καθιστά τη διαδικασία πιο αποδοτική και παρέχει μια πλήρη εικόνα της συχνοτικής απόκρισης του αισθητηρίου.

2.7 Ανάλυση των κυκλωμάτων της διέγερσης

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, η σχεδίαση των προφίλ διέγερσης γίνεται με την αξιοποίηση του "Arduino" ως παλμογεννήτρια. Με την σάρωση κώδικα στο περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού επιτυγχάνεται η παραγωγή παλμών. Στην περίπτωση της σάρωσης όλων των συχνοτήτων μελέτης, δηλαδή για το σήμα διέγερσης τύπου "SWEEP" δεν πραγματοποιείται κάποια διαμόρφωση στο σήμα. Το σήμα παραμένει ως τετραγωνικός παλμός, καθώς η διαμόρφωση τριγωνικού σήματος τύπου "SWEEP" απαιτεί την δημιουργία κυκλώματος με αυξημένη πολυπλοκότητα. Το γεγονός αυτό σε πειραματικό επίπεδο μπορεί να επηρεάσει αρκετά την ακρίβεια των μετρήσεων, εφόσον όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα κύκλωμα με την σύνδεση πολλών ηλεκτρονικών στοιχείων, τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα υπάρχει για την λανθασμένη λειτουργία αυτού. Είναι εξαιρετικής σημασίας, τα σήματα να είναι διαμορφωμένα με το ίδιο πλάτος τάσης. Για αυτό το λόγο έχει επιλεγθεί και τα επτά προφίλ διέγερσης να έχουν περίπου πλάτος στα 4 volt. Στην περίπτωση του "SWEEP" αυτό επιτυγχάνεται με ένα απλό κύκλωμα με την χρήση κάποιων αντιστάσεων (2.2.10). Επίσης, η χρήση αντιστάσεων βοηθά στη σταθεροποίηση του πλάτους των παλμών, διασφαλίζοντας ότι το σήμα παραμένει σταθερό και αξιόπιστο καθ' όλη τη διάρκεια της σάρωσης. Τέλος, η ακρίβεια των μετρήσεων ενισχύεται σημαντικά με την απλότητα του κυκλώματος, επιτρέποντας την απόκτηση αξιόπιστων δεδομένων που είναι απαραίτητα για την ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων από τα πειράματα.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να εξετασθούν δυο διαφορετικά είδη διεγέρσεων σχετικά με την μορφή του σήματος. Τα υπόλοιπα σήματα διεγέρσεων ακολουθούν την τριγωνική μορφή, η οποία δημιουργείται με την χρήση “RC”κυκλώματος. Η επιλογή του κυκλώματος έγινε με σκοπό την επίτευξη της τριγωνικής μορφής σήματος με τον απλούστερο δυνατό τρόπο και τη χρήση του ελάχιστου αριθμού ηλεκτρονικών στοιχείων. Η σχεδίαση του κυκλώματος αντίστασης-πυκνωτή (RC) επιτρέπει την αποτελεσματική διαμόρφωση του παλμού των 5 volt που παράγεται από τον μικροελεγκτή σε έναν σχεδόν τριγωνικό παλμό στα 4 volt, διασφαλίζοντας παράλληλα τη σταθερότητα και την ακρίβεια του σήματος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του κυκλώματος είναι το “Breadboard”, οι πυκνωτές (2.2.11), οι αντιστάσεις και διάφορα καλώδια (2.2.7) για την συνδεσμολογία.

Το κύκλωμα “RC” αποτελείται από τρία ηλεκτρονικά στοιχεία, την πηγή, την αντίσταση και τον πυκνωτή. Ο πυκνωτής έχει την δυνατότητα να φορτίζεται (αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας) και να εκφορτίζεται (αποβολή της ηλεκτρικής ενέργειας). Στην περίπτωση με μηδενικές αρχικές συνθήκες, την χρονική στιγμή που το ρεύμα ξεκινά να διαπερνά από την πηγή ο πυκνωτής αρχίζει να φορτίζεται (2.7.1) (Καλοφωλιάς Δ, 2017).

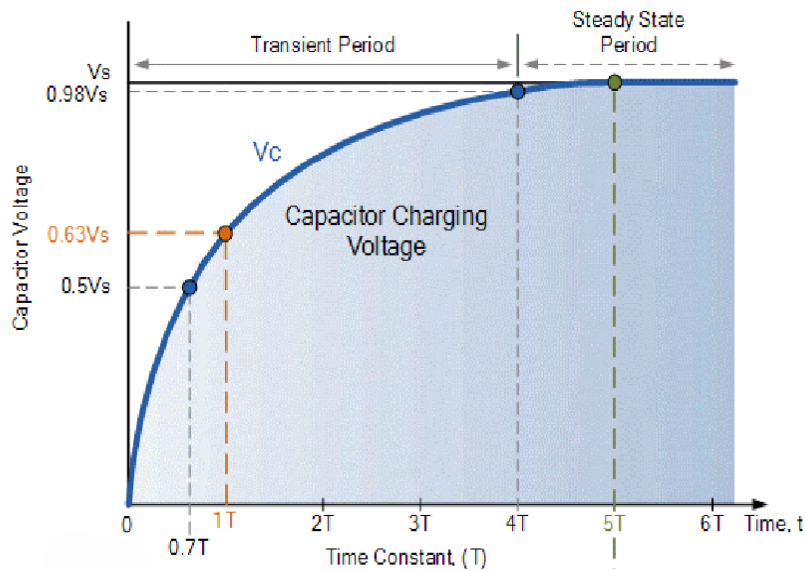
Η μαθηματική σχέση που υπολογίζει την τάση στα άκρα του πυκνωτή δίνεται παρακάτω:

$$V_c = E \times (1 - e^{-t/RC}) \quad (2.1)$$

με t τον χρόνο φόρτισης, RC η σταθερά του χρόνου του κυκλώματος, E η πηγή τροφοδοσίας.

Ο όρος “χρονική απόκριση” ενός συστήματος αναφέρεται στη συμπεριφορά του συστήματος με την πάροδο του χρόνου, σε μια συγκεκριμένη είσοδο. Η χρονική απόκριση ενός συστήματος ελέγχου αποτελείται από τη μεταβατική απόκριση και την απόκριση της μόνιμης κατάστασης. Η μεταβατική κατάσταση αφορά την απόκριση του συστήματος αμέσως μετά τη διέγερσή του και πριν τη σταθεροποίηση της εξόδου. Η μόνιμη κατάσταση αναφέρεται στο μέρος της απόκρισης που παραμένει αφού έχει εξασθενήσει το μεταβατικό μέρος. Το κύκλωμα RC αποτελεί σύστημα πρώτης τάξης με είσοδο τη βηματική συνάρτηση που λειτουργεί ως πηγή τάσης E (Κανδρής Δ, 2017).

Σχήμα 2.7.1: Γραφική παράστασή φόρτισης πυκνωτή

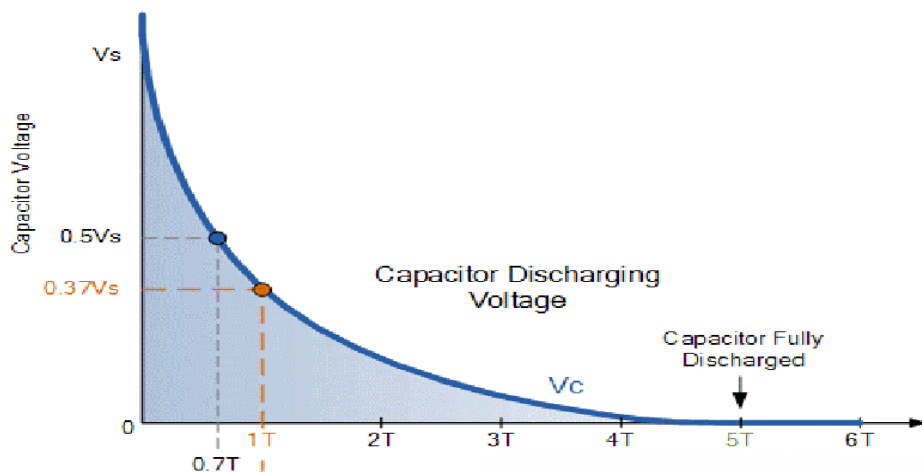


Με την αποσύνδεση της πηγής ο πυκνωτής ξεκινά να εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης, δηλαδή λειτουργεί ως πηγή στο κύκλωμα (2.7.2). Κατά την εκφόρτιση, το ρεύμα που ρέει μέσω του κυκλώματος και η τάση στον πυκνωτή μειώνονται εκθετικά με την πάροδο του χρόνου. Η διαδικασία εκφόρτισης περιγράφεται από την εξίσωση:

$$V_c = E \times e^{-t/RC} \quad (2.2)$$

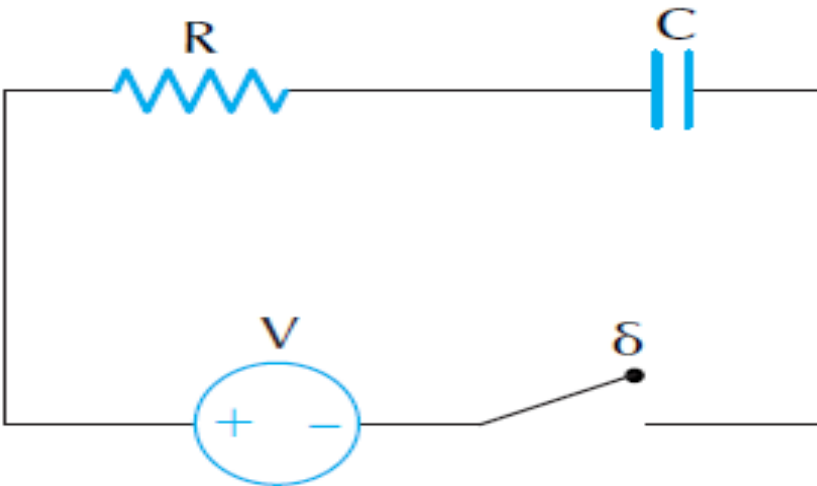
με t τον χρόνο εκφόρτισης, RC η σταθερά του χρόνου του κυκλώματος, E η πηγή τροφοδοσίας.

Σχήμα 2.7.2 : Γραφική παράστασή εκφόρτισης πυκνωτή

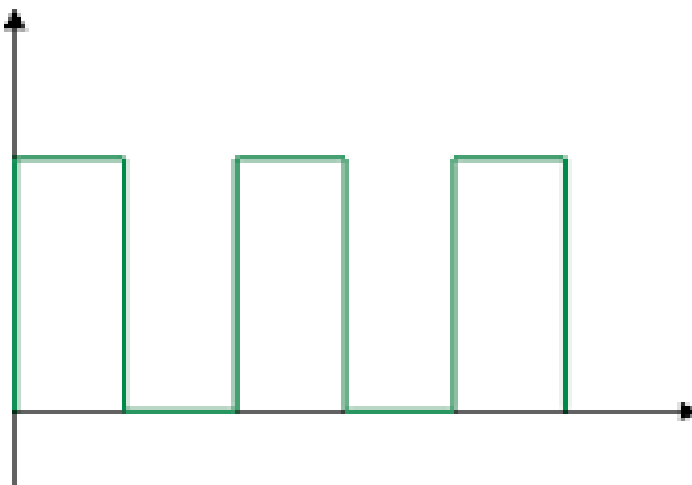


Ένα κύκλωμα “RC”(2.7.3) με πηγή τετραγωνικού παλμού χρησιμοποιείται συχνά για τη μελέτη της απόκρισης συστημάτων πρώτης τάξης. Όταν εφαρμόζεται ένας τετραγωνικός παλμός (2.7.4), ο πυκνωτής φορτίζεται και εκφορτίζεται περιοδικά μέσω της αντίστασης. Κατά τη διάρκεια της θετικής φάσης του παλμού (κλειστός διακόπτης), ο πυκνωτής φορτίζεται εκθετικά προς την τάση του παλμού. Κατά τη διάρκεια της αρνητικής φάσης (ανοικτός διακόπτης), ο πυκνωτής εκφορτίζεται εκθετικά προς μηδενική τάση. Η ταχύτητα φόρτισης και εκφόρτισης εξαρτάται από τη χρονική σταθερά “ $T=RC$ ”. Αυτή η συμπεριφορά δημιουργεί μια κυματομορφή τάσης στον πυκνωτή που εξομαλύνεται σε σχέση με τον τετραγωνικό παλμό, δείχνοντας την ικανότητα του κυκλώματος να φιλτράρει υψηλές συχνότητες. Έτσι το κύκλωμα “RC” λειτουργεί ως χαμηλοπερατό φίλτρο και έχει ως συνέπεια την δημιουργία τριγωνικού παλμού.

Σχήμα 2.7.3: Σχηματική διάταξη του κυκλώματος RC

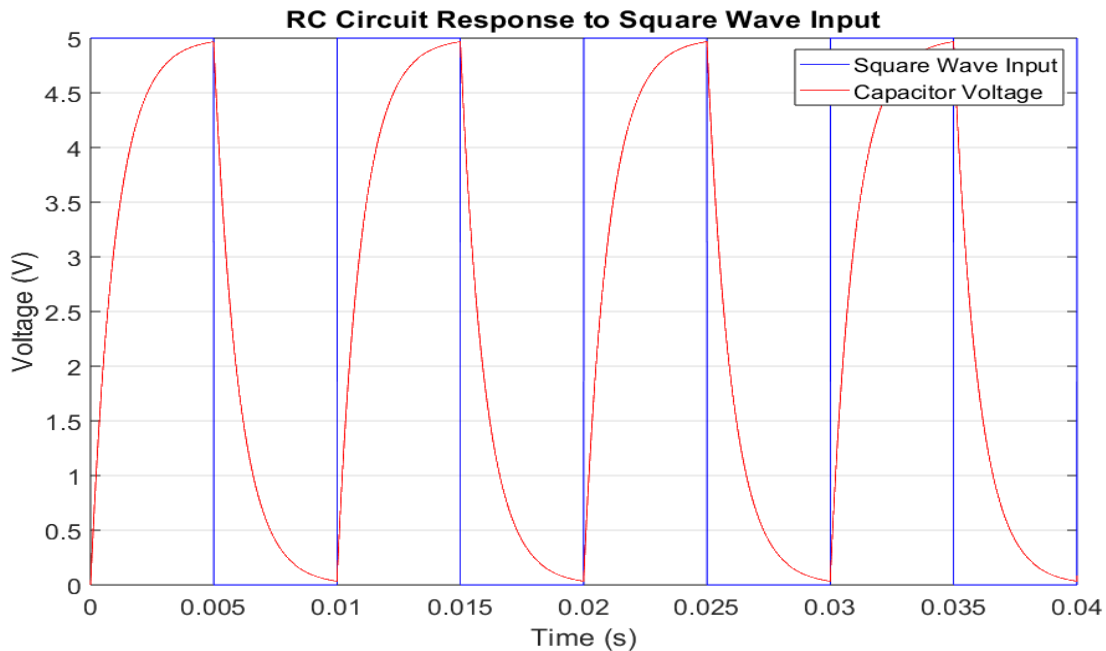


Σχήμα 2.7.4: τετραγωνικός παλμός



Σε ένα κύκλωμα RC (αντιστάτη-πυκνωτή), η απόκριση επηρεάζεται σημαντικά από τη συχνότητα του παλμού. Καθώς η συχνότητα του παλμού αυξάνεται, η τελική τάση του τριγωνικού παλμού μειώνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή ο πυκνωτής δεν έχει αρκετό χρόνο να φορτίσει και να εκφορτίσει πλήρως σε κάθε κύκλο του παλμού. Στις χαμηλές συχνότητες, ο πυκνωτής μπορεί να παρακολουθεί τις μεταβολές της τάσης πιο αποτελεσματικά, παράγοντας σχεδόν ιδανικούς τριγωνικούς παλμούς. Στις υψηλές συχνότητες, η απόκριση του κυκλώματος γίνεται πιο αργή σε σχέση με τις γρήγορες εναλλαγές της τάσης, με αποτέλεσμα την πτώση της τελικής τάσης και την παραμόρφωση της κυματομορφής. Οποτε η σταθεροποίηση της τάσης για όλα τα προφίλ διέγερσης στα 5 “volt” δεν είναι εφικτή. Έτσι επιλέχθηκε να περιοριστεί στα 4 volt αλλάζοντας τις τιμές “RC”. Στο παρακάτω σχήμα (2.7.5) αναπαρίσταται σχετικό παράδειγμα με το στάδιο φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή σε κοινό διάγραμμα με το σήμα εισόδου του κυκλώματος “RC” .

Σχήμα 2.7.5: Στάδιο φόρτισης-εκφόρτισης πυκνωτή με παράδειγμα μέσω του MATLAB



2.8 Θεωρητική ανάλυση της εύρεσης τιμών RC

Για την εύρεση των τιμών “RC” των προφίλ διέγερσης με τριγωνικό παλμό χρησιμοποιείται η εξίσωση της χρονικής απόκρισης του συστήματος “RC” (2.1). Στο σχήμα της εικόνας (2.7.5) παρατηρείται ότι, στο χρονικό διάστημα της ημιπεριόδου γίνεται η φόρτιση του πυκνωτή και στο υπόλοιπο μέρος της περιόδου ακολουθεί η εκφόρτιση του. Έτσι η ημιπερίοδος θα πρέπει να ισούται με n φορές την χρονική σταθερά T . Άρα, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$T_p = 2 \cdot n \cdot T \quad (2.3)$$

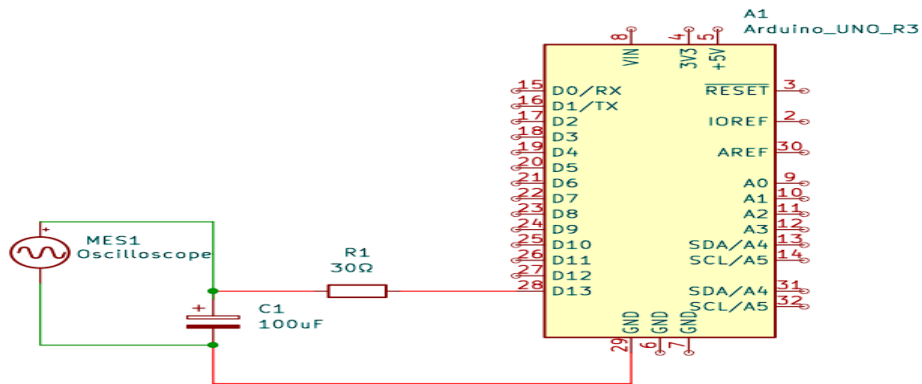
όπου T_p η περίοδος του παλμού, T η χρονική σταθερά του συστήματος “RC” και n φυσικός αριθμός

Η εξίσωση που συσχετίζει την ημιπερίοδο με την πολλαπλάσια χρονική σταθερά $n \cdot T$ (2.3) δεν λαμβάνει υπόψη τις πρακτικές ανοχές και τις διαταραχές στο κύκλωμα. Στην πράξη, η ιδανική θεωρητική απόκριση ενός παθητικού RC φίλτρου αποκλίνει λόγω αυτών των παραγόντων. Για να επιτευχθεί η αξιόπιστη τριγωνική μορφή και να διατηρηθεί η τάση στα 4V, το ζευγάρι τιμών RC θα πρέπει να είναι μικρότερο από την θεωρητική τιμή. Στο ερώτημα στο πόσο μικρότερη τιμή πρέπει να έχει, μπορεί να απαντήσει ο παλμογράφος. Η χρήση του παλμογράφου διευκολύνει την αντιστάθμιση των απωλειών του κυκλώματος, μεταβάλλοντας τις τιμές “RC” με βάση την κυματομορφή που αναπαρίσταται στην οθόνη του παλμογράφου.

2.9 Σχεδίαση κυκλωμάτων και αναπαράσταση των σημάτων με τον παλμογράφο

Στο στάδιο πριν την κατασκευή των κυκλωμάτων στα “breadboard”, τα κυκλώματα με την συνδεσμολογία του “Arduino” έχουν σχεδιαστεί με το λογισμικό “Ki cad”. Παρακάτω αναπαρίσταται η τάση στα άκρα του πυκνωτή με τον παλμογράφο για κάθε προφίλ διέγερσης. Επιπλέον, προστίθενται εικόνες από το σχετικό “hardware”, που δείχνουν τη συνδεσμολογία στο “breadboard” και το σήμα στον παλμογράφο. Αυτές οι εικόνες καταδεικνύουν τις μετρήσεις και την τελική απόδοση του κυκλώματος, επιβεβαιώνοντας ότι η προσαρμογή των τιμών “RC” ήταν απαραίτητη για την επίτευξη των επιθυμητών διεγέρσεων. Στο “hardware” μέρος έχουν χρησιμοποιηθεί παραπάνω από μια αντίσταση (με παράλληλη σύνδεση) και πυκνωτές (σε σειρά), ώστε να προσαρμοστεί η τελική τιμή της αντίστασης που αναγράφεται στο σχέδιο του “Ki cad”. Σχετικά με τον παλμογράφο φαίνεται η κλίμακα για το πλάτος, 2 volt ανά «κουτάκι» και για τον χρόνο στα 50 ms.

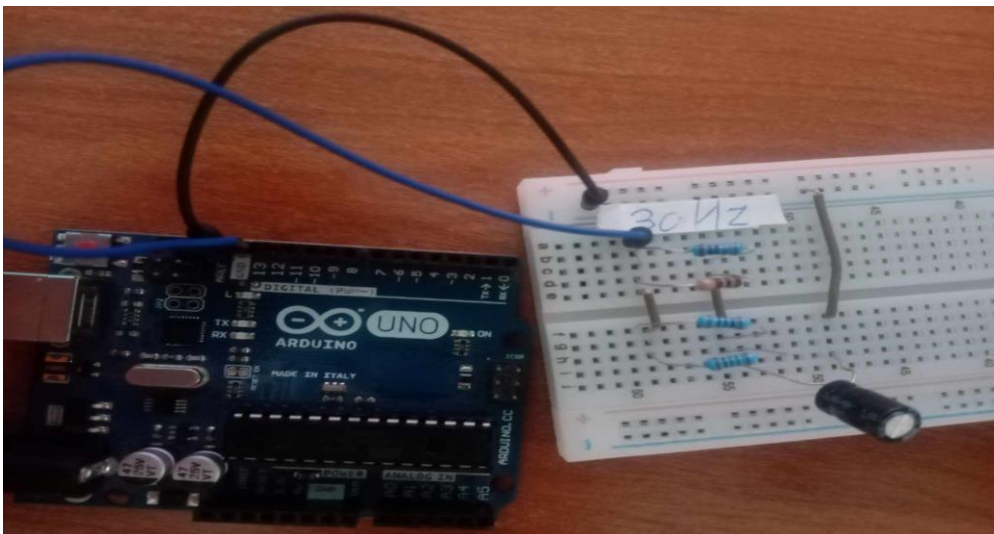
Σχήμα 2.9.1: Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 30 Hz- αναπαράσταση στο Ki cad



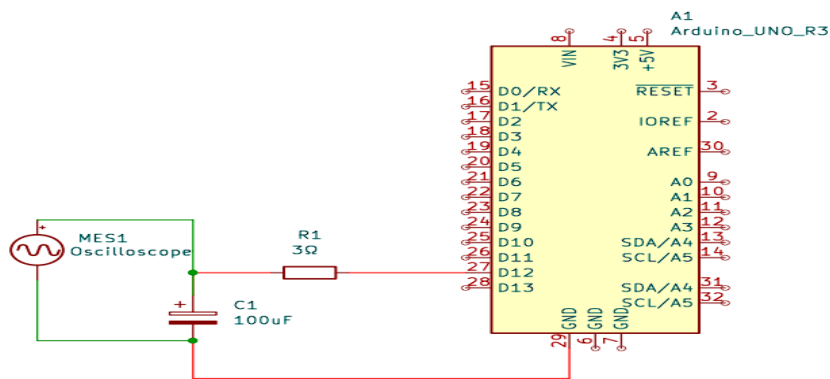
Σχήμα 2.9.2: Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου



Σχήμα 2.9.3: Hardware μέρος για το προφίλ των 30 Hz



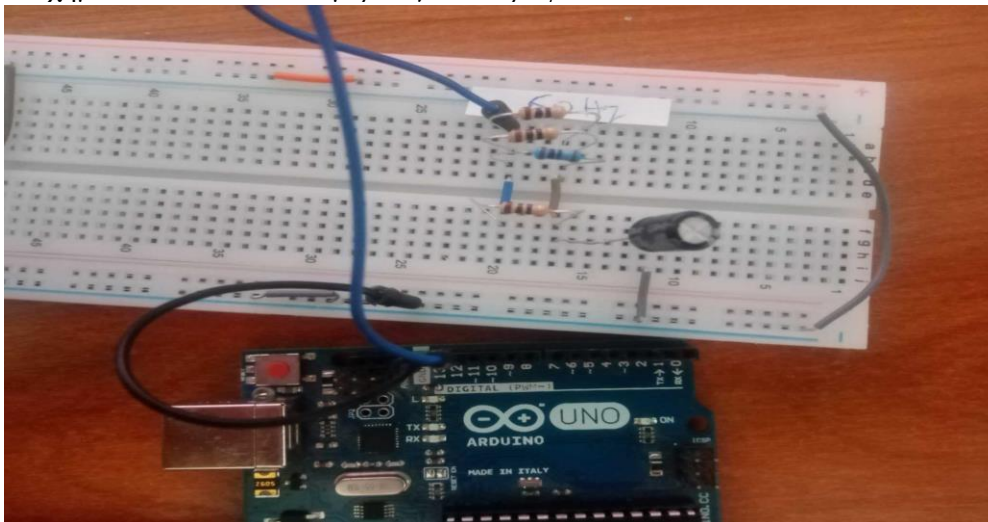
Σχήμα 2.9.4: Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 60 Hz-αναπαράσταση στο Ki cad



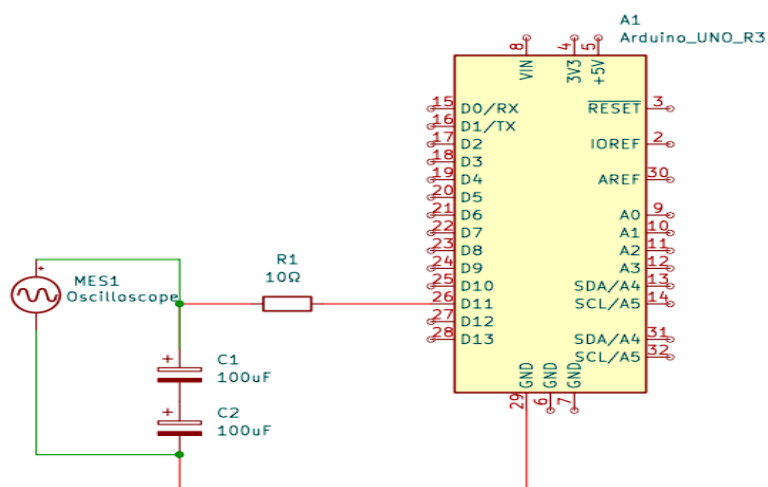
Σχήμα 2.9.5: Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου



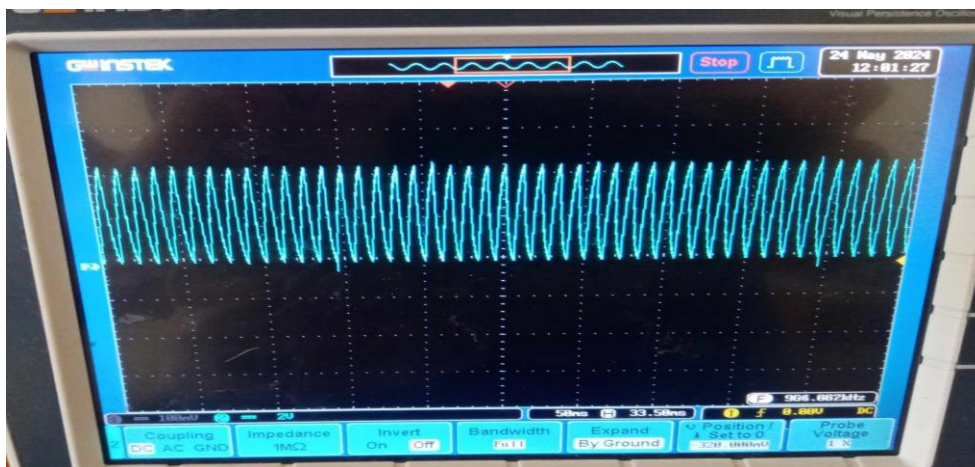
Σχήμα 2.9.6: Hardware μέρος για το προφίλ των 60 Hz



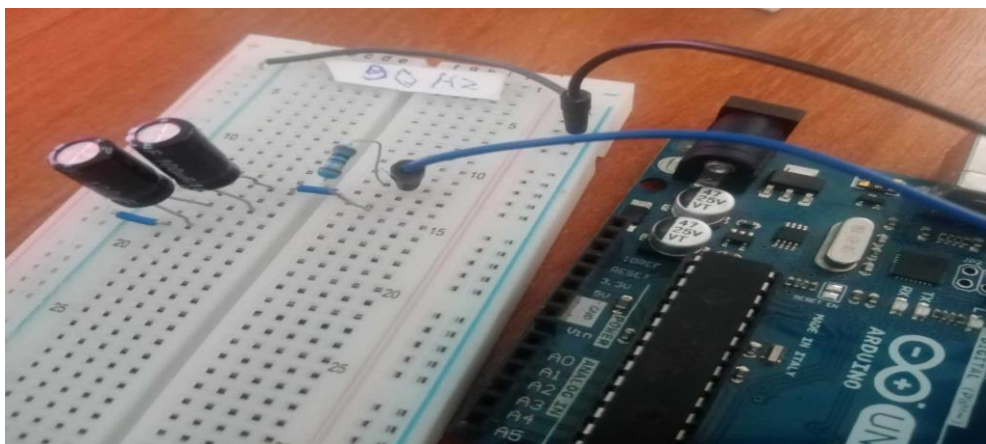
Σχήμα 2.9.7: Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 90 Hz-αναπαράσταση στο Ki cad



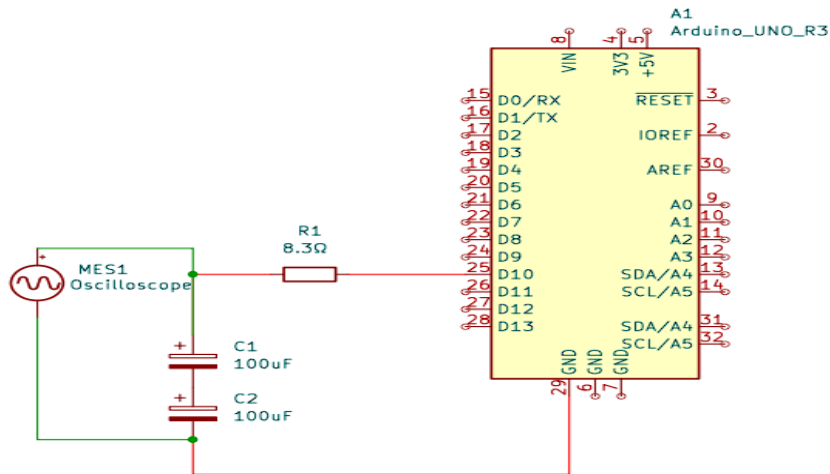
Σχήμα 2.9.8: Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου



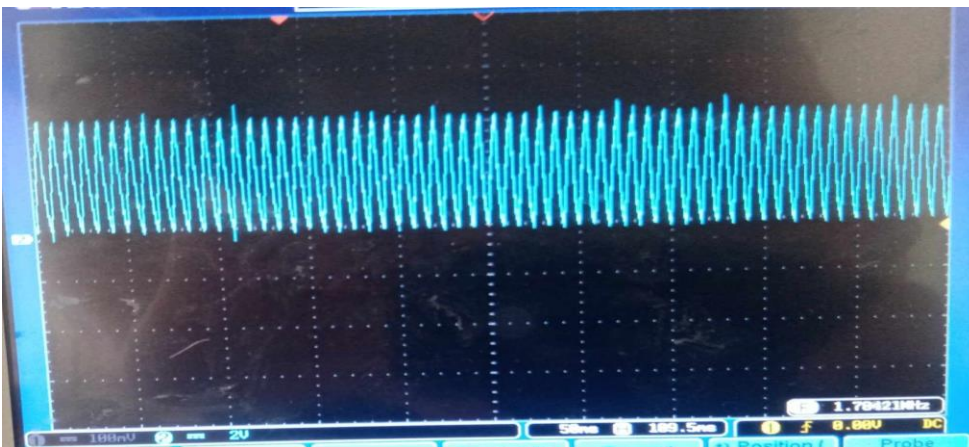
Σχήμα 2.9.9: Hardware μέρος για το προφίλ των 90 Hz



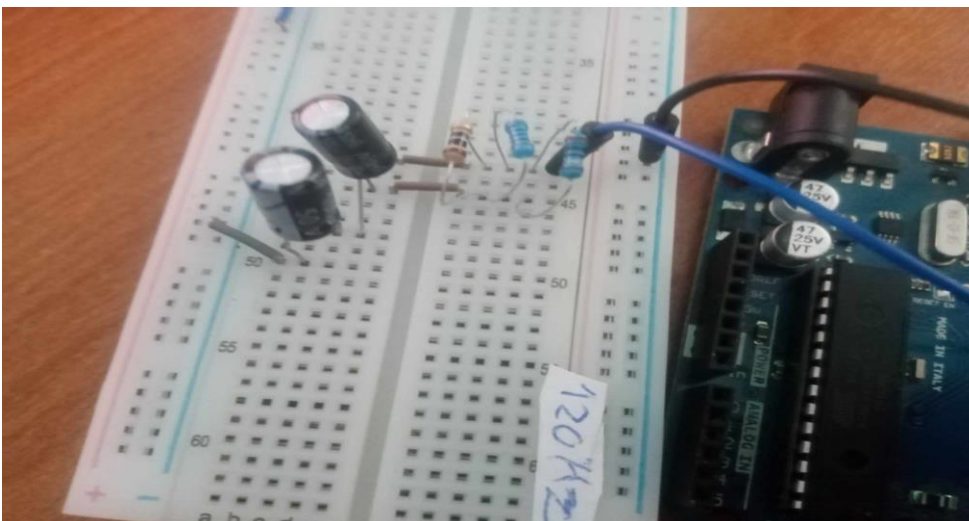
Σχήμα 2.9.10: Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 120 Hz αναπαράσταση στο Ki cad



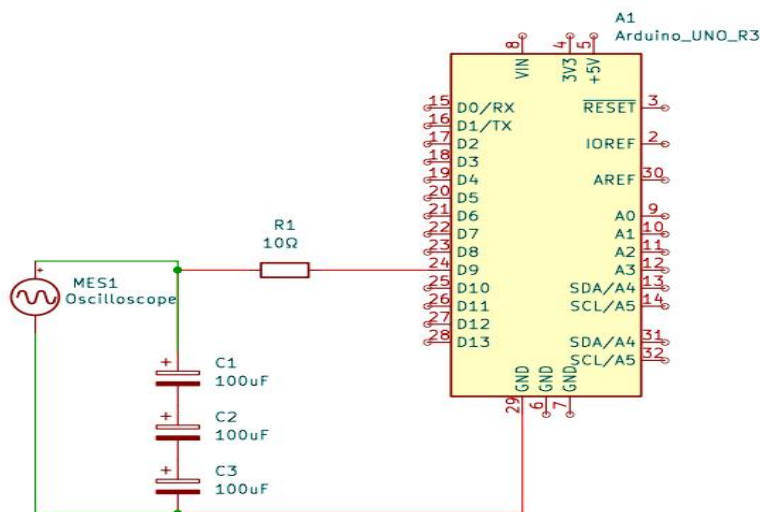
Σχήμα 2.9.11: Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου



Σχήμα 2.9.12: Hardware μέρος για το προφίλ των 120 Hz



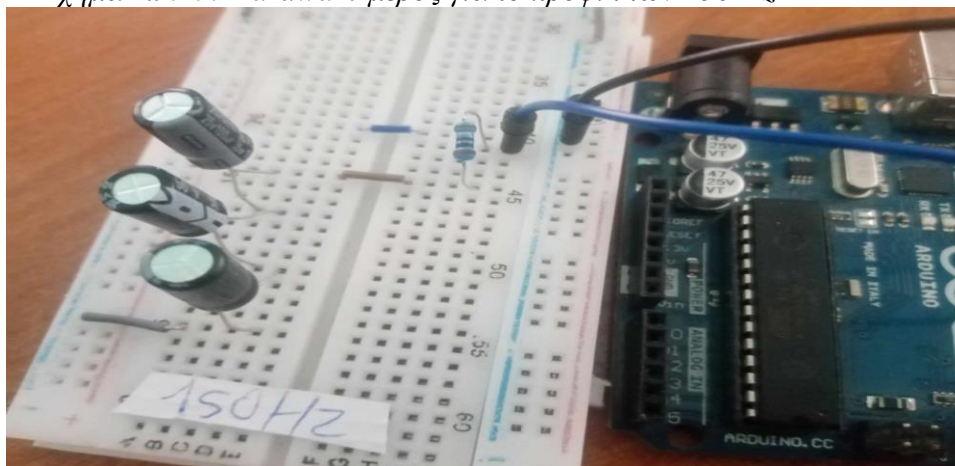
Σχήμα 2.9.13: Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 150 Hz αναπαράσταση στο Ki cad



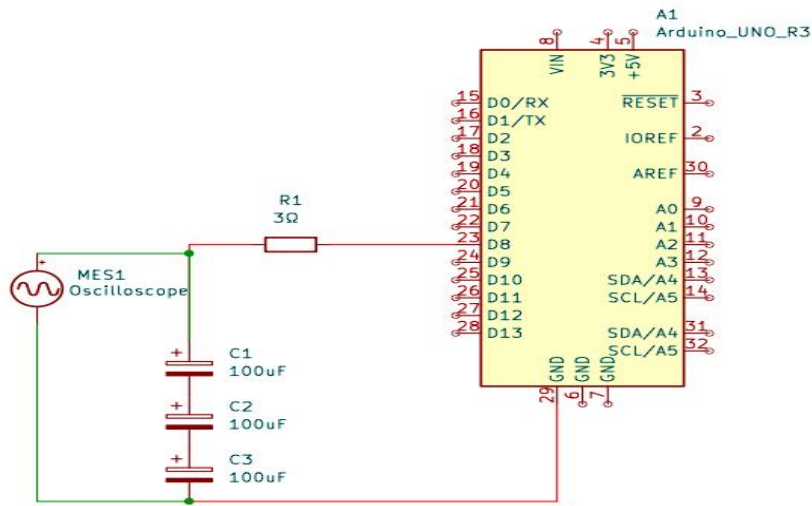
Σχήμα 2.9.14: Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου



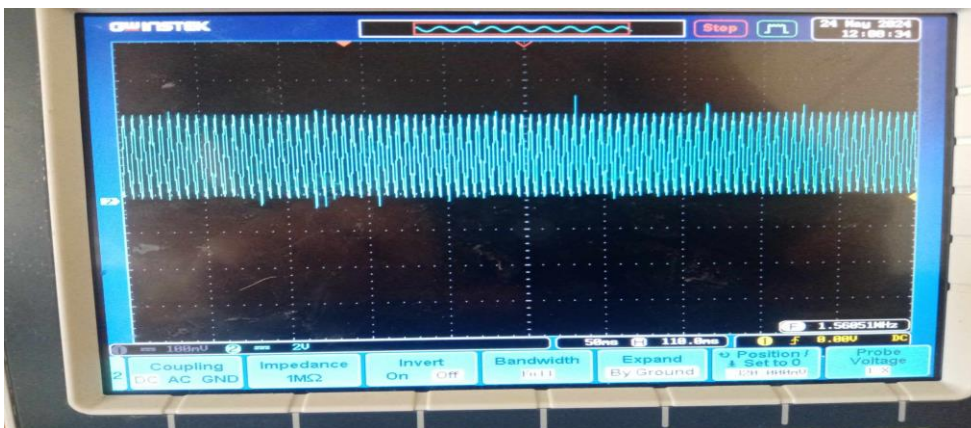
Σχήμα 2.9.15: Hardware μέρος για το προφίλ των 150 Hz



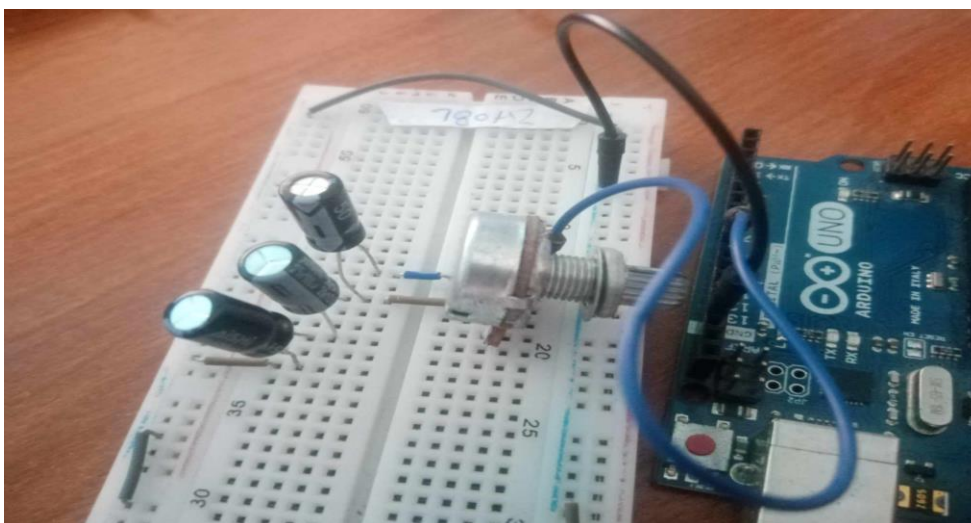
Σχήμα 2.9.16: Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος 180 Hz αναπαράσταση στο Ki cad



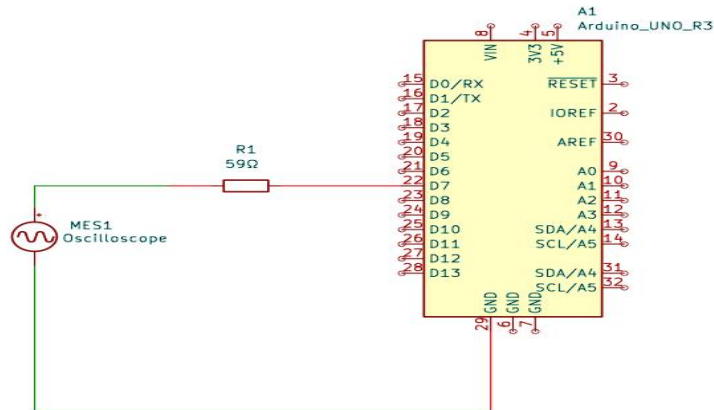
Σχήμα 2.9.17: Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου



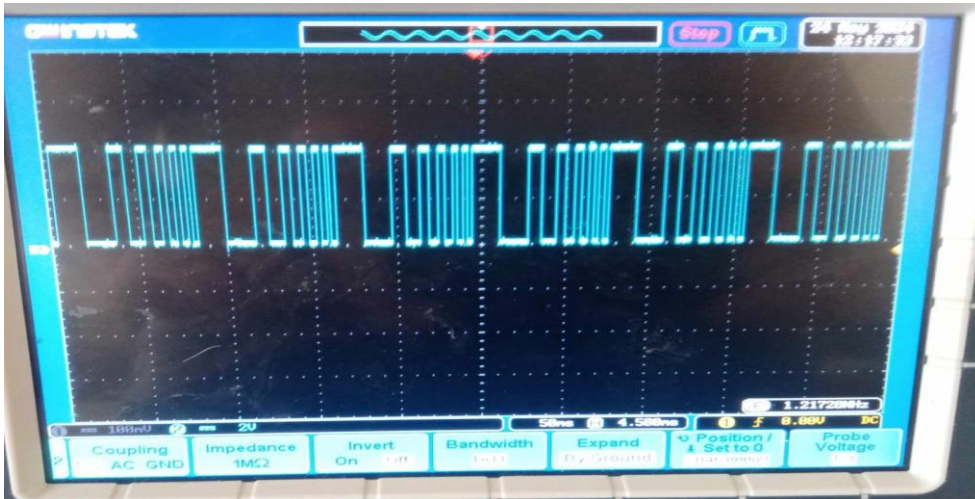
Σχήμα 2.9.18: Hardware μέρος για το προφίλ των 180 Hz



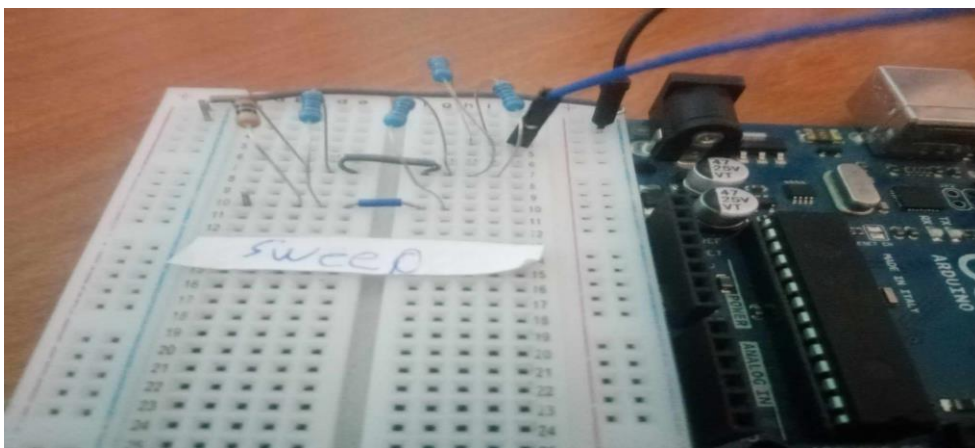
Σχήμα 2.9.19: Σχεδίαση κυκλώματος του σήματος Sweep αναπαράσταση στο Ki cad



Σχήμα 2.9.20: Αναπαράσταση του σήματος μέσω του παλμογράφου



Σχήμα 2.9.21: Hardware μέρος για το προφίλ Sweep



2.10 Χρονοσειρές

Οι χρονοσειρές είναι σύνολα δεδομένων που προέρχονται από διαδοχικές παρατηρήσεις ή μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε ίσα χρονικά διαστήματα. Αυτές οι μετρήσεις καταγράφουν την τιμή ενός συγκεκριμένου χαρακτηριστικού, το οποίο μπορεί να σχετίζεται με ένα στοχαστικό φαινόμενο. Δηλαδή, πρόκειται για φαινόμενα των οποίων η εξέλιξη και οι τιμές δεν είναι απολύτως προβλέψιμες και περιέχουν κάποιο βαθμό τυχαιότητας. Με άλλα λόγια, οι χρονοσειρές καταγράφουν την αλλαγή ενός χαρακτηριστικού με την πάροδο του χρόνου, καταδεικνύοντας πώς επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες αβεβαιότητας ή μεταβλητότητας. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι διατεταγμένες σε συνεχόμενα χρονικά διαστήματα, προσφέροντας μια συνεχή καταγραφή της χρονικής πορείας του φαινομένου (Μπουτσίκας Μ, 2020).

Τα σήματα που συλλέχθηκαν από τον παλμογράφο μπορούν να θεωρηθούν ως χρονοσειρές. Στον κατακόρυφο άξονα των γραφημάτων αποτυπώνονται οι τιμές της τάσης στα τυλίγματα του πηνίου, δηλαδή το σήμα που καταγράφει ο παλμογράφος, ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται οι χρονικές στιγμές για κάθε δείγμα. Οι χρονικές αυτές στιγμές είναι γνωστές, καθώς καθορίζονται από τον αριθμό των δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο και το μέγεθος κάθε σήματος.

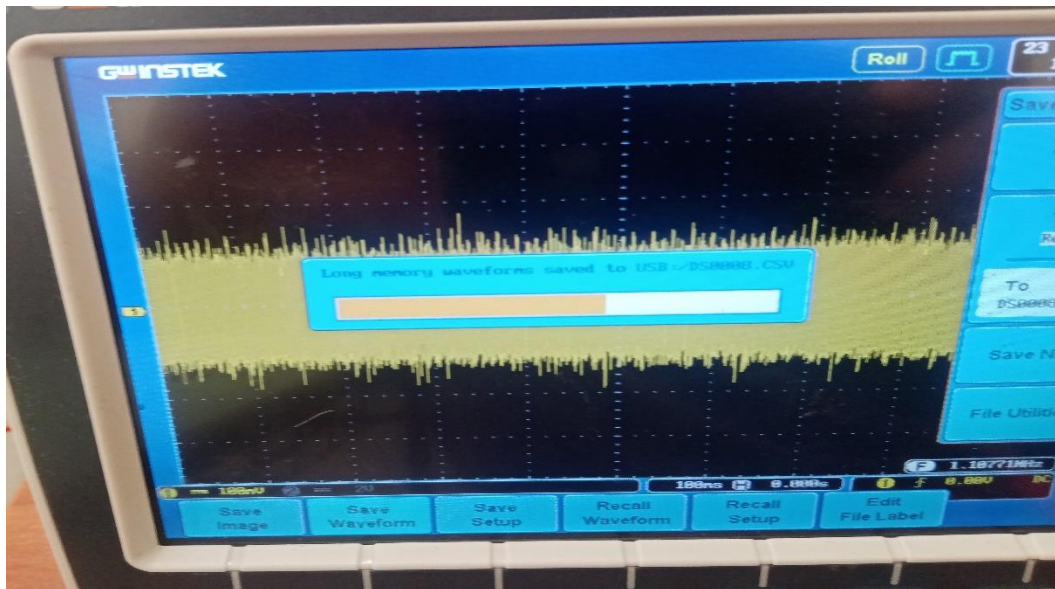
Έχει διερευνηθεί πως τα σήματα αυτά δεν ακολουθούν τα θεωρητικά μοντέλα, που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη διατριβή (Sultana R, 2023). Ο θόρυβος που παρουσιάζεται στην πρακτική ανίχνευση του μαγνητοελαστικού φιλμ αποτελεί σημαντική διαταραχή στο σύστημα, επηρεάζοντας την ακρίβεια των μετρήσεων. Ο θόρυβος αυτός έχει άγνωστα χαρακτηριστικά και προέρχεται από παράγοντες που δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν εύκολα, όπως οι δυναμικές στο πραγματικό σύστημα και τα εσωτερικά σήματα.

Κεφάλαιο 3: Εργαλεία στην προεργασία των σημάτων και στην επεξεργασία των δεδομένων

3.1 Καταγραφή των σημάτων

Η τάση που προκύπτει από το πηνίο ανίχνευσης, είναι το σήμα που καταγράφεται στον παλμογράφο. Η χρονοσειρά που αναπαρίσταται παρακάτω (3.1.1) στον παλμογράφο, είναι το σήμα τάσης που μετρείται στα άκρα του πηνίου. Παρατηρείται πως η κλίμακα στον άξονα του πλάτους τάσης έχει ρυθμιστεί στα 100mV και στον άξονα των χρόνων στα 100ms. Όπως φαίνεται στην εικόνα το σήμα αποθηκεύεται με την χρήση εξωτερικού μέσου αποθήκευσης στην μορφή αρχείου .CSV(Comma Separated Values). Το αρχείο που αποθηκεύεται κάθε φορά αποτελεί “Long memory CSV” και επιλέγεται από το σχετικό μενού ρυθμίζοντας έτσι να καταγράφονται όλα τα δεδομένα του σήματος. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι στα 2 MHz και κάθε τετράγωνο αντιστοιχεί σε 100ms. Όταν το αρχείο διαρκεί 1 δευτερόλεπτο, όσο είναι το μήκος του οριζόντιου άξονα στην οθόνη του παλμογράφου. Η αποθήκευση των δεδομένων στο εξωτερικό μέσο έχει διάρκεια περίπου 7-8 λεπτά και το μέγεθος του αρχείου κυμαίνεται από τα 49-50MB.

Σχήμα 3.1.1:Σήμα τάσης από το πηνίο ανίχνευσης στον παλμογράφο



3.2 Σήματα στο πεδίο της συχνότητας –Μετασχηματισμός Fourier

Ουσιώδες στοιχείο στην ανάλυση των σημάτων αποτελεί η απόκριση της συχνότητας. Στο πεδίο της συχνότητας, τα σήματα μπορούν να αναλυθούν σε συνιστώσες που αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά τους σε διαφορετικές συχνότητες. Με τον μετασχηματισμό Fourier είναι δυνατή η εξέταση του περιεχομένου τους σήματος στο πεδίο της συχνότητας. Ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την επεξεργασία των σημάτων. Για τον καθορισμό του φάσματος ενός πραγματικού μη περιοδικού σήματος $X(t)$, απαιτείται η χρήση της σχέσης του μετασχηματισμού Fourier, η οποία είναι η ακόλουθη :

$$X(f) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

όπου f η συχνότητα και $X(f)$ η συνάρτηση της συχνότητας

Σχετικά με τα περιοδικά σήματα, ο μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου αποτελεί την πιο γενική εκδοχή της Σειράς Fourier. Σύμφωνα με αυτήν, κάθε περιοδικό σήμα, ανεξαρτήτως της μορφής του, μπορεί να αναλυθεί ως άπειρη σειρά τριγωνομετρικών συναρτήσεων. Αυτές οι συναρτήσεις περιλαμβάνουν ημιτονοειδή σήματα με συγκεκριμένες γωνίες φάσης που δεν είναι μηδενικές. Η βασική ιδέα είναι ότι οποιοδήποτε περιοδικό σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί ως άθροισμα πολλών ημιτονοειδών κυμάτων, το καθένα με διαφορετική συχνότητα, πλάτος και φάση. Αυτό επιτρέπει την ανάλυση και τον χειρισμό σύνθετων σημάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια, δίνοντας τη δυνατότητα να κατανοηθούν και να επεξεργαστούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά τους (Καραϊσκος X, 2015)

$$x(t) = c_0 \cdot \cos(\theta_0) + c_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \theta_1) + \dots \\ + c_n \cdot \cos(2\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot t + \theta_n) + \dots \quad (3.2)$$

όπου f_0 είναι η συχνότητα του σήματος και η συχνότητα nf_0 είναι η n -οστή αρμονική του σήματος. Οι συντελεστές c_n και θ_n αντιπροσωπεύουν το πλάτος και τη φάση αντίστοιχα της συγκεκριμένης αρμονικής συνιστώσας.

Ωστόσο στην περίπτωση που μελετάται μη περιοδικό σήμα διακριτού χρόνου χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (DTFT), ο οποίος είναι η αποτύπωση του σήματος ως συνδυασμός μιγαδικών εκθετικών ακολουθιών της μορφής $e^{-j\omega n}$, όπου ω είναι η κυκλική συχνότητα σε rad/sec. Η αρχική ακολουθία μπορεί να ανακατασκευαστεί από τον DTFT της με τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου. (ΒΕΛΩΝΗ Α, 2018)

Ο DTFT ενός σήματος $x\{n\}$ διατυπώνεται ως

$$X(e^{j\omega}) = F\{x\{n\}\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-j\omega n} \quad (3.3)$$

Ενώ η αντίστροφη διαδικασία για την ανακατασκευή στον χρόνο :

$$x[n] = F^{-1}\{X(e^{j\omega})\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) \cdot e^{j\omega n} d\omega \quad (3.4)$$

Η πρώτη σχέση περιγράφει τη διάσπαση του σήματος διακριτού χρόνου σε εκθετικά σήματα που απλώνονται σε ένα συνεχές φάσμα κυκλικών συχνοτήτων ω , το οποίο ορίζεται στο διάστημα $0-2\pi$. Η δεύτερη σχέση καθιστά δυνατή την ανασύσταση του αρχικού σήματος από τον DTFT του. Αυτή η διαδικασία είναι ουσιώδης για την ανάλυση και επεξεργασία μη περιοδικών σημάτων διακριτού χρόνου, καθώς προσφέρει τα απαραίτητα εργαλεία για την κατανόηση και διαχείριση των χαρακτηριστικών τους μέσω της συχνοτικής τους απεικόνισης. (ΒΕΛΩΝΗ Α, 2018)

Όπως προαναφέρθηκε για τα σήματα συνεχούς χρόνου ότι ένα περιοδικό σήμα μπορεί να αναλυθεί από μια σειρά “Fourier”, το ίδιο συμβαίνει και για τα σήματα διακριτού χρόνου. Το διακριτό σήμα $x[n]$ αποτελεί μια περιοδική ακολουθία στην οποία εφαρμόζεται η διακριτή σειρά “Fourier” (DFS). Η διακριτή σειρά εκφράζει την περιοδική ακολουθία με άθροισμα μιγαδικών εκθετικών όρων. Η εξίσωση είναι η εξής:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi \frac{k}{N} n} \quad (3.5)$$

όπου $X[k]$ οι συντελεστές “Fourier” με $X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{j2\pi \frac{k}{N} n}$ (3.6)

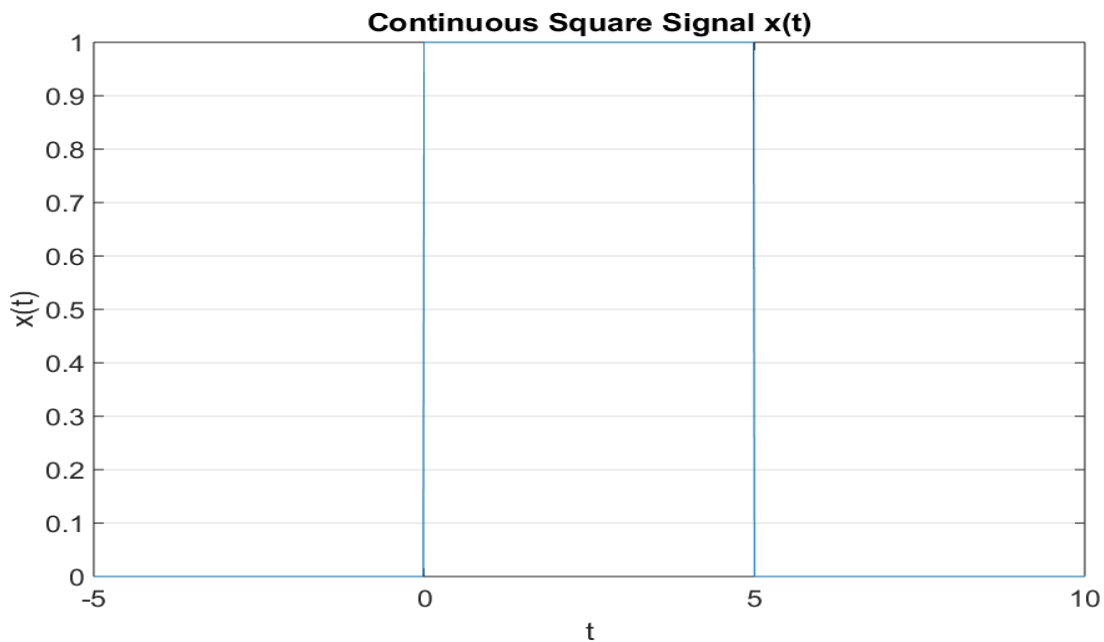
Ο Διακριτός μετασχηματισμός fourier (DFT) μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική περίπτωση της Διακριτής σειράς fourier (DFS). Ειδικότερα, ο DFT εφαρμόζεται σε περιοδικά σήματα με πεπερασμένη διάρκεια, όπου η πεπερασμένη διάρκεια του σήματος μπορεί να ερμηνευθεί ως μία περίοδος ενός περιοδικού σήματος που επαναλαμβάνεται συνεχώς. Ο DFT επιτρέπει την αποδοτική ανάλυση σημάτων χάρη στον αλγόριθμο FFT, καθιστώντας τον κατάλληλο για εφαρμογές όπως η επεξεργασία ήχου, εικόνας, η αναγνώριση προτύπων και η ψηφιακή επεξεργασία σήματος. (ΒΕΛΩΝΗ Α, 2018)

Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) ορίζεται από τη σχέση:

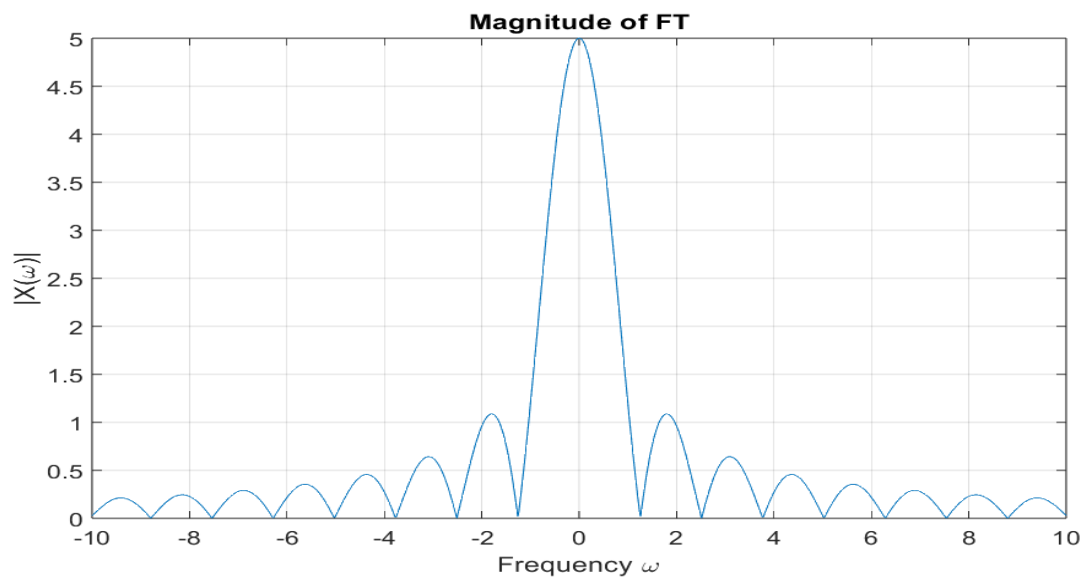
$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi\frac{k}{N}n} \quad \text{ή} \quad X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot W_N^{kn} \quad k=0, 1 \dots N-1 \quad (3.7)$$

Παρακάτω δίνονται παραδείγματα την χρήση του “MATLAB” για τους τύπους του μετασχηματισμού “Fourier”, καθώς και τα αντίστοιχα είδη σημάτων.

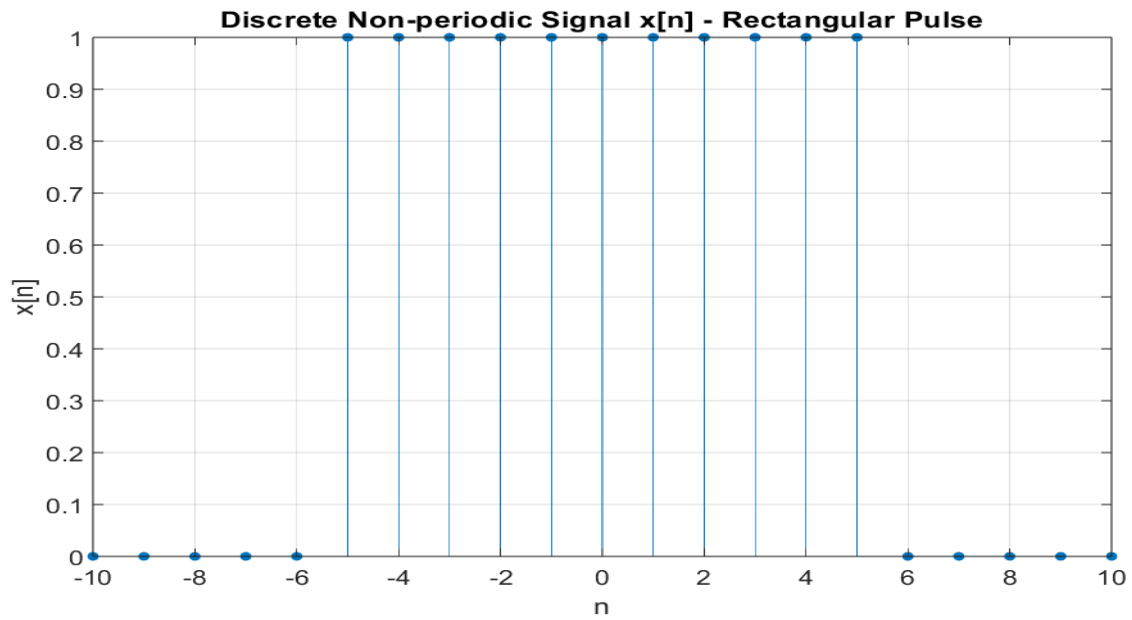
Σχήμα 3.2.1 : Παράδειγμα συνεχούς και μη περιοδικού σήματος



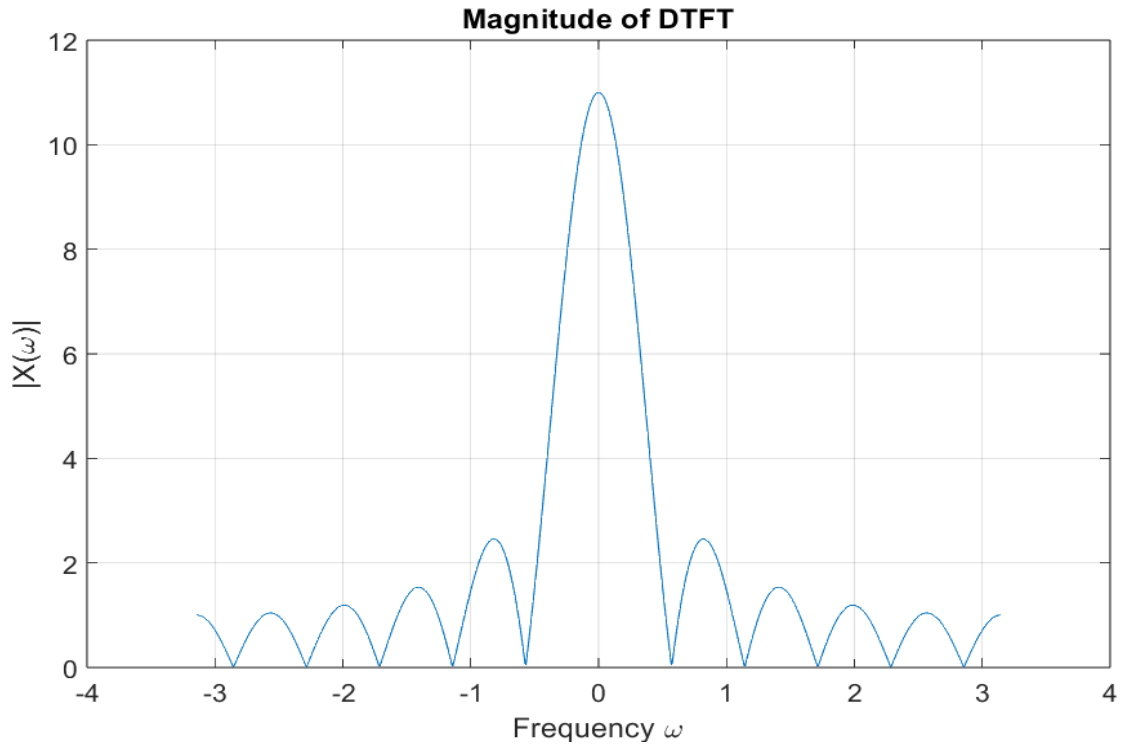
Σχήμα 3.2.2 : Ο μετασχηματισμός Fourier (FT) του σήματος στο σχήμα (3.2.1).



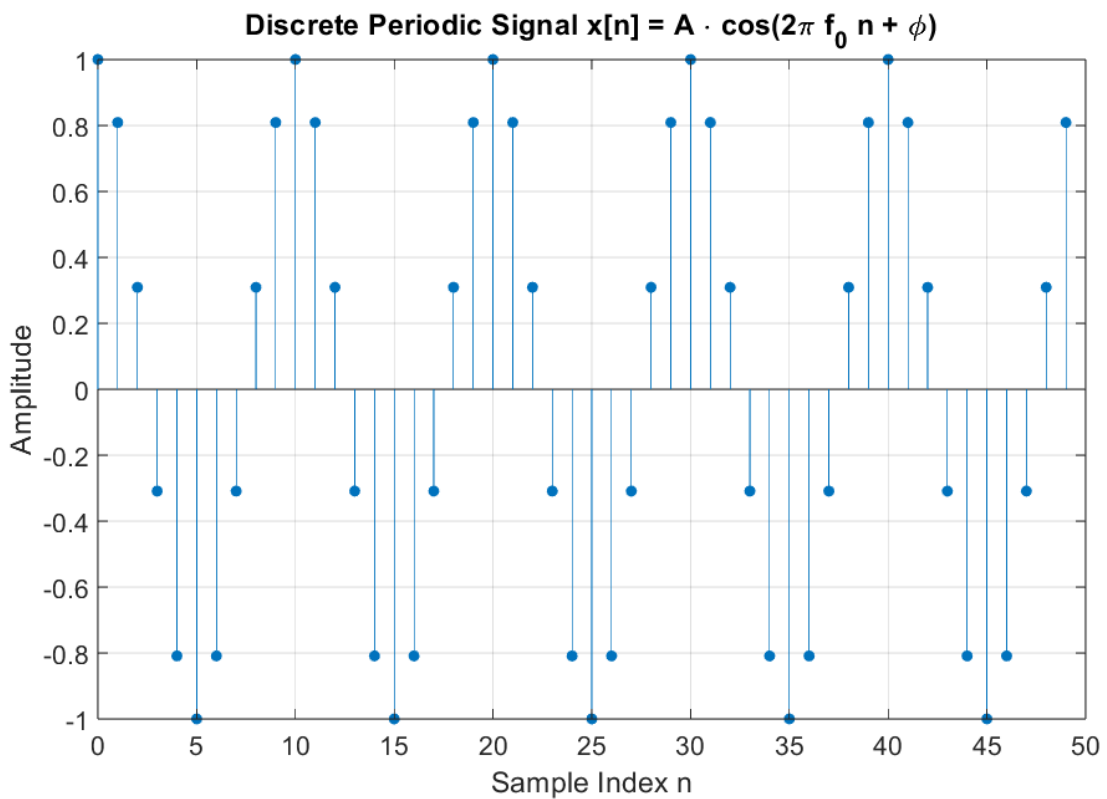
Σχήμα 3.2.3 : Παράδειγμα διακριτού και μη περιόδου σήματος



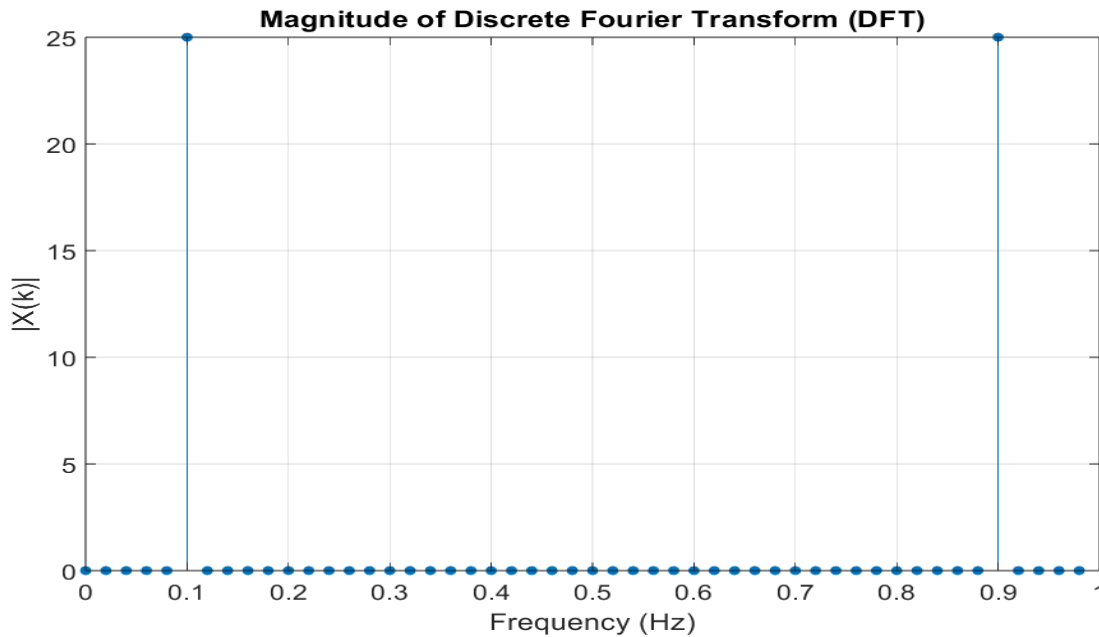
Σχήμα 3.2.4 : Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (DTFT) του σήματος στο σχήμα (3.2.3)



Σχήμα 3.2.5 : Παράδειγμα Διακριτού και περιοδικού σήματος



Σχήμα 3.2.6 : Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) του σήματος στο σχήμα (3.2.5)



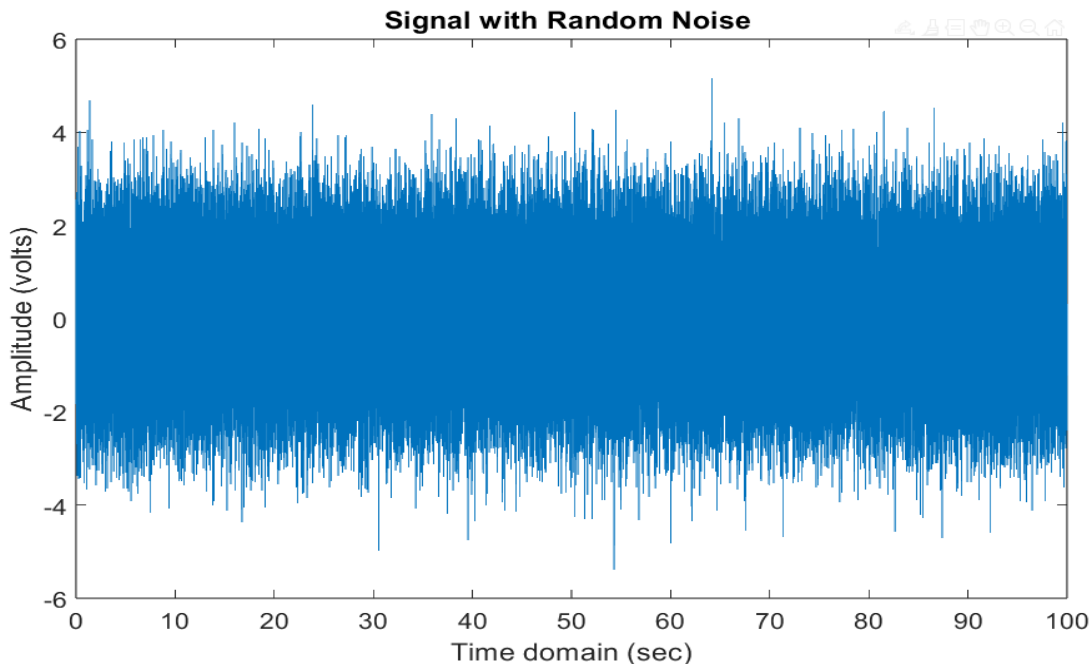
Κατά τον υπολογισμό του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) απαιτείται ο υπολογισμός όλων των N συχνοτήτων με πολυπλοκότητα N^2 . Αυτό οφείλεται από την πράξη της βασικής εξίσωσης (3.7). Για ένα πιο γρήγορο υπολογισμό του DFT χρησιμοποιείται ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) όπου μειώνει τον αριθμό των υπολογισμών με πολυπλοκότητα $N \log_2 N$, ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των δειγμάτων N είναι δύναμη του 2 (N^2). (ΒΕΛΩΝΗ Α, 2018)

Ο μετασχηματισμός Fourier μετατρέπει ένα πραγματικό σήμα σε μιγαδικούς αριθμούς, αποτελούμενους από πραγματικό (α) και φανταστικό (β) μέρος. Το μέτρο $|z|$ παριστάνει τη συνολική ενέργεια της κάθε συχνότητας και δίνεται από την σχέση $|Z| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$. Η φάση $\text{Arg}(z)$ (θ) μετρά τη γωνία του μιγαδικού αριθμού σε σχέση με τον πραγματικό άξονα, και προκύπτει από την σχέση $\text{Arg}(z) = \theta = \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha}$. Αυτή η ανάλυση των μιγαδικών αριθμών σε μέτρο και φάση επιτρέπει την απεικόνιση του σήματος σε συχνοτικό πεδίο και την εκτίμηση της συμβολής κάθε συχνότητας στο αρχικό σήμα. (Smith S, 1997)

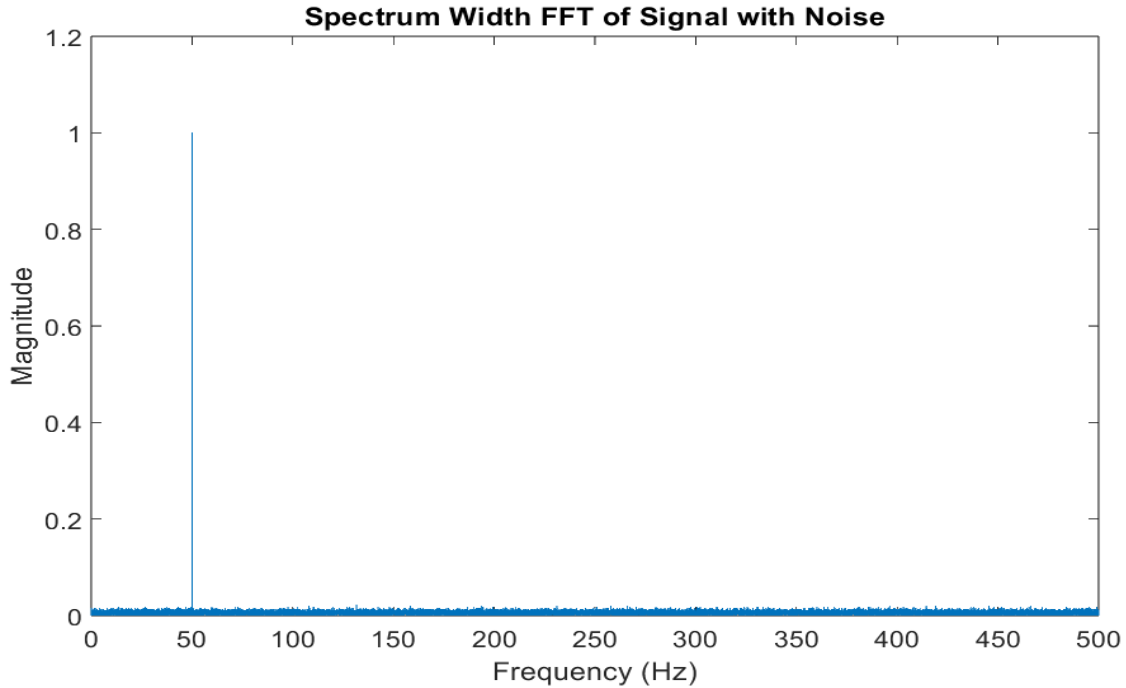
3.3 Μετασχηματισμός Fourier στο Matlab

Με την χρήση του αλγορίθμου (FFT) στο Matlab είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) ενός σήματος. Έτσι μετατρέπεται ένα σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας με περιεχόμενο μέγιστης συχνότητας, εκείνη όπου ακολουθεί το θεώρημα του Nyquist $f_s \geq 2f_{max}$. Διαιρώντας με το συνολικό αριθμό δειγμάτων (N) εξασφαλίζεται ότι το πλάτος είναι αντιπροσωπευτικό του αρχικού σήματος. Για τα πραγματικά σήματα, χρησιμοποιείται η μονόπλευρη αναπαράσταση, η οποία περιλαμβάνει μόνο τις θετικές συχνότητες. Ωστόσο η δίπλευρη αναπαράσταση δεν είναι αναγκαία καθώς οι αρνητικές συχνότητες δεν περιέχουν κάποια νέα πληροφορία για τα πραγματικά σήματα. Από τη στιγμή που το φάσμα είναι συμμετρικό, μπορούμε να κρατήσουμε μόνο τις θετικές συχνότητες χωρίς να χάσουμε πληροφορίες. Επομένως, κρατώντας μόνο το πρώτο μισό του φάσματος και διπλασιάζοντας τις τιμές του πλάτους (εκτός από την πρώτη και την τελευταία τιμή, οι οποίες αντιστοιχούν στη μηδενική συχνότητα και στη συχνότητα Nyquist), προκύπτει το μονόπλευρο φάσμα πλάτους του FFT. Παρακάτω δίνεται παράδειγμα ανάλυσης σήματος στο πεδίο της συχνότητας με το “Matlab” (3.3.1).

Σχήμα 3.3.1: Παράδειγμα σήματος με την παρουσία θορύβου : $\sin(2\pi 50t) + \text{random}(\text{noise})$

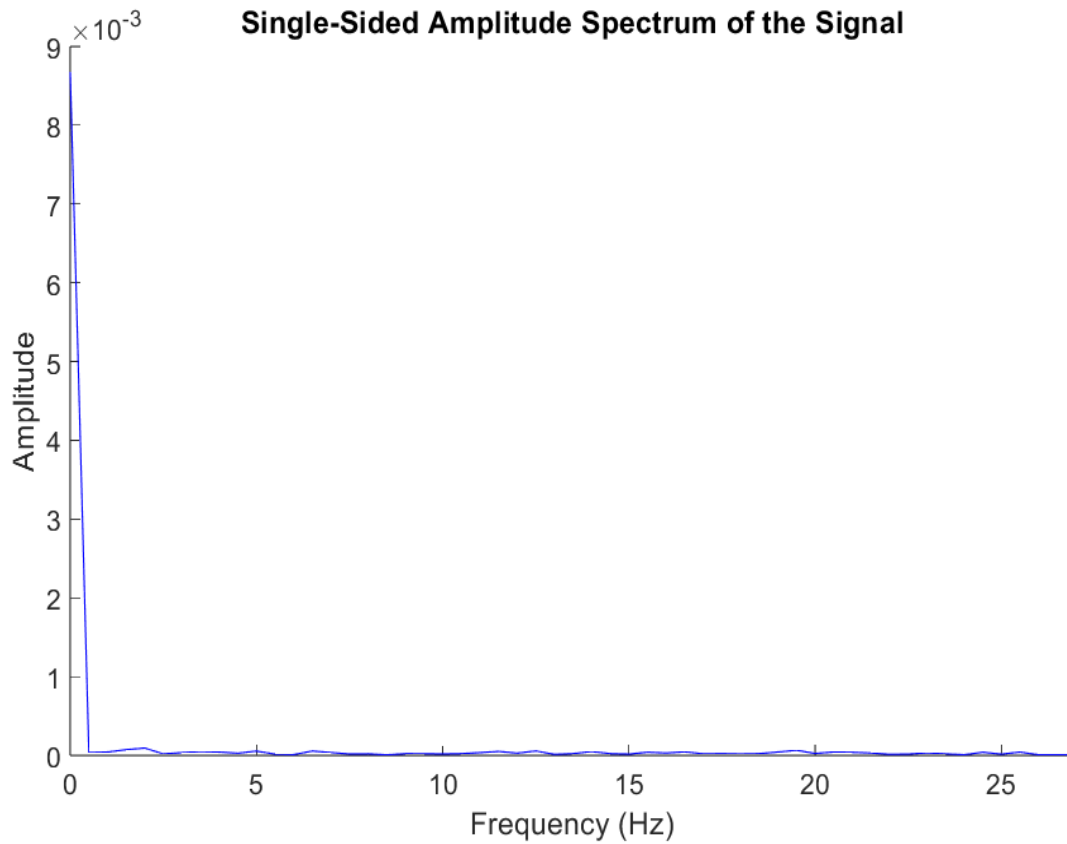


Σχήμα 3.3.2: Αναπαράσταση FFT με τον αλγόριθμο του Matlab



Στο σχήμα (3.3.2) παρατηρούμε το φάσμα πλάτους του σήματος που έχει δοθεί ως παράδειγμα για την χρήση του (FFT) στο Matlab. Στο σχήμα (3.3.1) που αναπαρίσταται το σήμα στο πεδίο του χρόνου δεν είναι δυνατόν να διακριθούν τα χαρακτηριστικά του σήματος. Ωστόσο στο φάσμα πλάτους σχήμα (3.3.2) διακρίνεται η κορυφή στα 50 Hz όπου είναι η χαρακτηριστική συχνότητα της κατασκευής του σήματος.

Σχήμα 3.3.3: Αναπαράσταση FFT σήματος από τυχαία μέτρηση στο παλμογράφο και η παρουσία του DC offset



Η κορυφή στην συχνότητα 0 Hz που φαίνεται στο σχήμα (3.3.3) λέγεται “DC component” και αντιστοιχεί στην μέση τιμή του σήματος. Με την αφαίρεση της βελτιώνεται η ακρίβεια του (FFT) και μπορούν να προσεγγιστούν με αξιοπιστία οι χαρακτηριστικές συχνότητες του σήματος.

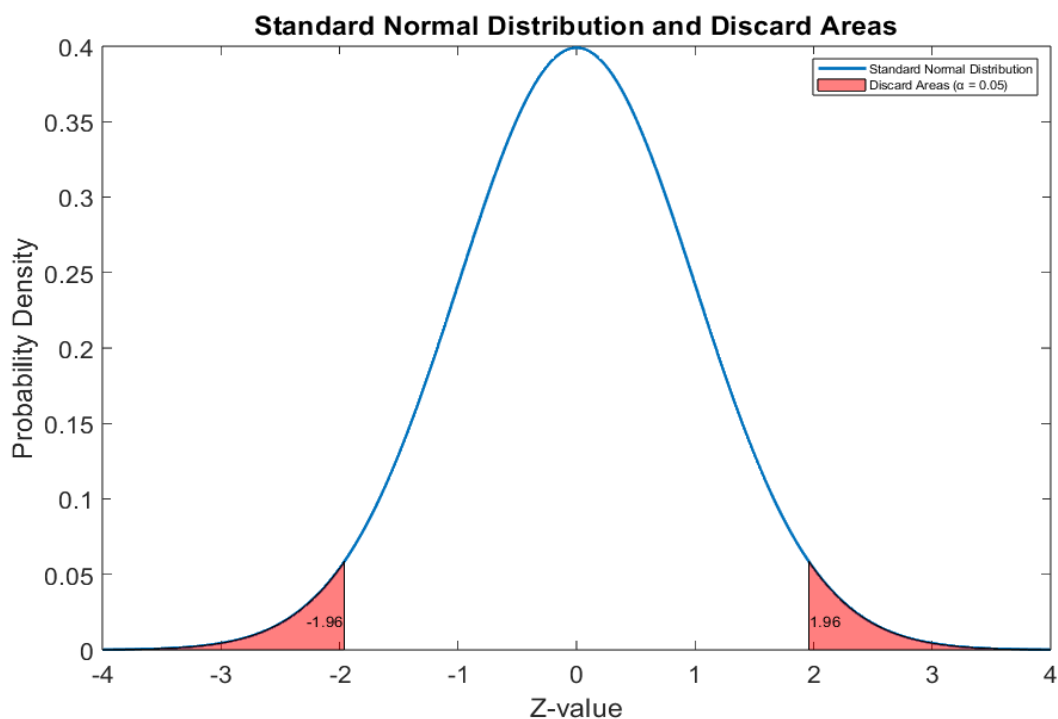
3.4 Μέθοδοι ελέγχου στατιστικών υποθέσεων

3.4.1 θεωρητικό υπόβαθρο στατιστικών ελέγχων

Κατά την ανάλυση δεδομένων σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους είναι απαραίτητη η χρήση στατιστικών μεθόδων διότι επιδιώκεται η εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Ο στατιστικός έλεγχος υποθέσεων περιγράφεται ως μια διαδικασία αξιολόγησης της εγκυρότητας διάφορων υποθέσεων που σχετίζονται με δεδομένα τα οποία συλλέγονται από ένα δείγμα. Η στατιστική υπόθεση αναφέρεται στα χαρακτηριστικά που περιγράφουν έναν πληθυσμό και δεν αφορά μόνο ένα δείγμα από αυτόν. Με τον στατιστικό έλεγχο διατυπώνονται οι εξής υποθέσεις, πρώτον η μηδενική υπόθεση (H_0) και στην συνέχεια ακολουθεί η διατύπωση της αντίθετης υπόθεσης ή γνωστή ως εναλλακτική υπόθεση (H_1). Η περίπτωση της μηδενικής υπόθεσης υποστηρίζει ότι δεν είναι υπαρκτή κάποια ουσιαστική διαφορά στις εξεταζόμενες μεταβλητές και οποιαδήποτε διαφορά ενδέχεται να οφείλεται σε τυχαία φαινόμενα. Ενώ στην περίπτωση της εναλλακτικής υπόθεσης μελετάται αν υπάρχει πραγματική διαφορά μεταξύ των μεταβλητών. Με την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης αποδεικνύεται η εναλλακτική υπόθεση ως αληθής. Παραδείγματος χάριν, σε μελέτη κατά την οποία συγκρίνονται τα επίπεδα χοληστερόλης σε ασθενείς με έμφραγμα και σε ασθενείς χωρίς έμφραγμα, η μηδενική υπόθεση (H_0) ισχυρίζεται ότι δεν παρουσιάζεται κάποια διαφορά στα επίπεδα της χοληστερόλης μεταξύ των δύο διαφορετικών πληθυσμών, ενώ για την περίπτωση της εναλλακτικής υπόθεσης (H_1) ισχύει ότι υπάρχει εμφανώς διαφορά μεταξύ των ομάδων. (Sunogon A, 2022)

Σημαντικό ρόλο στα στατιστικά τεστ υποθέσεων έχει η κατανομή πιθανότητας όπου η όποια, παρουσιάζει το πως κατανέμονται οι πιθανότητες σχηματικά για ένα στατιστικό μέγεθος. Αν η τιμή του στατιστικού μεγέθους υπάρχει σε περιοχή της κατανομής με χαμηλή πιθανότητα συμπεραίνεται πως η μηδενική υπόθεση δεν είναι αληθής και μπορεί να απορριφθεί. Η βασικότερη κατανομή στην στατιστική καλείται κανονική κατανομή και χρησιμοποιείται συχνά στους στατιστικούς ελέγχους. Με βάση την κατανομή της υπόθεσης μπορούν να υπολογιστούν τα p-values, τα οποία δείχνουν την πιθανότητα της παρατήρησης ενός αποτελέσματος αν η μηδενική υπόθεση είναι αληθής. Σε κάθε στατιστικό τεστ ορίζεται και το επίπεδο σημαντικότητας με το οποίο συμπεραίνεται αν είναι δυνατόν να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση. Συνήθως χρησιμοποιείται σαν όριο η τιμή 0.05. Στο σχήμα (3.4.1) αναπαρίσταται η τυπική κανονική κατανομή, καθώς φαίνονται και οι περιοχές απόρριψης όπου μπορούν να βρεθούν με βάση τον πίνακα με τις αντίστοιχες τιμές των z για την τιμή επιπέδου σημαντικότητας 0.05. Η συγκεκριμένη κατανομή αφορά σε περιπτώσεις αμφίπλευρου ελέγχου και οι περιοχές στα άκρα εκφράζουν τις τιμές που είναι λιγότερο πιθανές να παρατηρηθούν αν η μηδενική υπόθεση ισχύει. Καθώς η μέση τιμή βρίσκεται στο κέντρο της κατανομής η μηδενική υπόθεση είναι αληθής με την προϋπόθεση οι μετρήσεις να είναι κοντά στο κέντρο. (Jarmakowska-Kostrzanowska L, 2021)

Σχήμα 3.4.1: Τύπικη κανονική κατανομή μέσω Matlab



Ένα από τα κύρια ερωτήματα στην στατιστική ανάλυση των δεδομένων με την χρήση δοκιμών υποθέσεων είναι η αξιολόγηση της κανονικότητας των δεδομένων. Είναι δηλαδή, σημαντικό, πριν ληφθούν αποφάσεις σχετικά με την επιλογή των στατιστικών δοκιμών, να μελετηθούν πρώτα τα δεδομένα ως προς την κατανομή που ακολουθούν. Στη στατιστική ανάλυση, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες δοκιμών: οι παραμετρικές και οι μη παραμετρικές δοκιμές. Στις παραμετρικές δοκιμές είναι βασική προϋπόθεση τα δεδομένα να ακολουθούν την κανονική κατανομή, ενώ οι μη παραμετρικές δοκιμές δεν προϋποθέτουν συγκεκριμένες κατανομές για τα δεδομένα. Αναφορικά κάποια από τα πιο δημοφιλή παραμετρικά “test” είναι η δοκιμές «t-student» και «ANOVA». Αντίθετα για τα μη παραμετρικά, σύννηθες παράδειγμα αποτελεί η δοκιμή «Mann-Whitney U». Για τον στατιστικό έλεγχο κανονικότητας των δεδομένων συνιστάται το «Shapiro-Wilk (SW)» και το «Kolmogorov-Smirnov (KS)» με την σημείωση ότι λειτουργούν αποτελεσματικά για σχετικά μεγάλα μεγέθη δείγματος. (Orcan F, 2020)

3.4.2 Στατιστικός έλεγχος υποθέσεων Kruskal-wallis

Πρόκειται για ένα μη παραμετρικό “test” που μπορεί να συγκρίνει δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες ομάδες δεδομένων. Κατά την εφαρμογή του τα δεδομένα από όλες τις ομάδες συλλέγονται μαζί και κατατάσσονται σε μια αύξουσα σειρά. Μετά την ανακατανομή στις αρχικές ομάδες υπολογίζονται οι μέσες τιμές τους. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο στατιστικός αριθμός H που δίνεται από τον παρακάτω τύπο. (Weaver K, 2017)

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{N_i} - 3(N+1) \quad (3.8)$$

Όπου N ο συνολικός αριθμός παρατηρήσεων, K ο αριθμός των ομάδων, R_i το άθροισμα των κατατάξεων για την ομάδα i

Η παραπάνω τιμή συγκρίνεται με την αντίστοιχη τιμή στους πίνακες της κατανομής X² με κ-1 βαθμούς ελευθερίας. Αν το H είναι μεγαλύτερο από την κρίσιμη τιμή που δίνεται από την κατανομή X² απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση, ενώ αν το H είναι μικρότερο δεν μπορεί να απορριφθεί. Για την πλήρη κατανόηση της εφαρμογής των στατιστικών ελέγχων, παρακάτω αναλύεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του μη παραμετρικού “test” «Kruskal-Wallis».

Το παράδειγμα αφορά την επίδραση της ποιότητας του ύπνου των ανθρώπων λόγω κατανάλωσης αλκοόλ. Το δείγμα περιλαμβάνει 20 μεσήλικες (25-35 ετών) όπου μετρήθηκαν τα σωματικά βάρη τους, καθώς τους χορηγήθηκε η ποσότητα του αλκοόλ 1 ώρα πριν τον ύπνο. Επίσης, τοποθετήθηκαν τυχαία σε 4 ομάδες με την κάθε ομάδα να καταναλώνει διαφορετική ποσότητα αλκοόλ. Στον παρακάτω πίνακα (3.4.1) αναγράφονται οι ποσότητες χορήγησης ανά ομάδα, καθώς και η διάρκεια του ύπνου (Weaver K, 2017).

Πίνακας 3.4.1: Παράδειγμα εφαρμογής του τεστ Kruskal wallis

Ομάδες	Ομάδα 0	Ομάδα 1	Ομάδα 2	Ομάδα 3
Ποσότητα αλκοόλ/kg σωματικού βάρους	0 gr/kg	16 gr/kg	32gr/kg	48gr/kg
Διάρκεια ύπνου	8 ώρες	8 ώρες	8 ώρες	8 ώρες

Στο παρακάτω πίνακα (3.4.2) αναγράφονται οι εκτιμήσεις των ατόμων την επόμενη μέρα.

Πίνακας 3.4.2: Αποτελέσματα έρευνας

Ομάδες	Ομάδα 0	Ομάδα 1	Ομάδα 2	Ομάδα 3
Ποσότητα αλκοόλ/kg σωματικού βάρους	0 gr/kg	16 gr/kg	32gr/kg	48gr/kg
Αξιολόγηση του ύπνου ανά άτομο σε κάθε ομάδα	5 3 4 4 2	3 4 3 4 4	2 2 3 1 1	2 1 2 1 1
Διάμεσος	4	4	2	1
Μέση τιμή	3.6	3.6	1.8	1.4

Στην συνέχεια πρέπει να διατυπωθούν οι υποθέσεις ξεκινώντας από την μηδενική υπόθεση. Η μηδενική υπόθεση (H0) υποθέτει ότι, η ποιότητα του ύπνου δεν εξαρτάται από την κατανάλωση του αλκοόλ. Ενώ η εναλλακτική (H1) υποθέτει ότι υπάρχει τουλάχιστον μια μεταβολή στην ποιότητα του ύπνου μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων κατανάλωσης αλκοόλ. Ακολουθούν οι κατατάξεις των ομάδων και η διαδικασία υπολογισμού του H.

Πίνακας 3.4.3:Κατατάξεις των δεδομένων

Συλλογή δεδομένων	Ταξινόμηση σε σειρά	Κατατάξεις δεδομένων
5	1	3
3	1	3
4	1	3
4	1	3
2	1	3
3	2	8
4	2	8
3	2	8
4	2	8
4	2	8
2	3	12.5
2	3	12.5
3	3	12.5
1	3	12.5
1	4	17
2	4	17
1	4	17
2	4	17
1	4	17
1	5	20

Πίνακας 3.4.4: Άθροισμα κατατάξεων

Ομάδα 0	Ομάδα 1	Ομάδα 2	Ομάδα 3
5(20)	3(12.5)	2(8)	2(8)
3(12.5)	4(17)	2(8)	1(3)
4 (17)	3(12.5)	3(12.5)	2(8)
4(17)	4(17)	1 (3)	1(3)
2(8)	4(17)	1(3)	1(3)
74.5	76	34.5	25

Για τον υπολογισμό της ποσότητας H κάνουμε αντικατάσταση τα δεδομένα στην σχέση (3.8)

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{N_i} - 3(N+1)$$

$$\Rightarrow H = \frac{12}{20(20+1)} \left[\frac{74.5^2}{5} + \frac{76^2}{5} + \frac{34.5^2}{5} + \frac{25^2}{5} \right] - 3(20+1)$$

$$\Rightarrow H = 12.103$$

Όπως έχει προαναφερθεί η τιμή H συγκρίνεται με την κρίσιμη τιμή της καμπύλης X^2 . Οι βαθμοί ελευθερίας είναι $df=4-1=3$ και από τον πίνακα της καμπύλης X^2 η κρίσιμη τιμή για το επίπεδο σημαντικότητας 0.05 είναι $X(3)=7.815$. Συμπαιρόνοντας το στατιστικό H είναι μεγαλύτερο από την κρίσιμη τιμή όποτε μπορεί να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση. Το παραπάνω μη παραμετρικό “test” χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για την σύγκριση διαστημάτων κορυφών στην περίπτωση των λαμβανόμενων μετρήσεων FFT. Θα ακολουθήσει στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4.3 Στατιστικός έλεγχος υποθέσεων Kolmogorov-smirnov

Μια ακόμη μη παραμετρική δοκιμή που είναι πιθανόν να είναι κατάλληλη για τα δεδομένα των FFT είναι ο στατιστικός έλεγχος «Kolmogorov –Smirnov (K-S)». Πρόκειται για ένα “test” όπου καλείται να συγκρίνει ένα δείγμα με μια θεωρητική κατανομή ή δύο δειγματοληπτικές κατανομές μεταξύ τους. Στην περίπτωση εξέτασης ενός δείγματος, συγκρίνονται δύο βασικές συναρτήσεις. Από τα δεδομένα του δείγματος προκύπτει η εμπειρική συνάρτηση κατανομής EDF και ορίζεται από την παρακάτω σχέση (3.9). Η συγκεκριμένη συνάρτηση εκφράζει το ποσοστό των παρατηρήσεων στο δείγμα, οι οποίες είναι μικρότερες ή ίσες από ένα σημείο στο εκάστοτε δείγμα. Με την EDF περιγράφεται η κατανομή του δείγματος και συγκρίνεται με την σωρευτική συνάρτηση κατανομής CDF. Η CDF υποδουλώνει την πιθανότητα μια τυχαία μεταβλητή X να είναι μικρότερη ή ίση με x , όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση (3.10). (Dimitrova D, 2020)

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1_{x_j \leq x} \quad (3.9)$$

Όπου $1_{x_j \leq x} = 1$ αν ισχύει $x_j \leq x$, αλλιώς ισούται με 0

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (3.10)$$

Όπου X η τυχαία μεταβλητή και x σημείο της κατανομής

Αφότου προσεγγιστούν οι παραπάνω συναρτήσεις ακολουθεί ο υπολογισμός του στατιστικού D_n . Το D_n εκφράζει την απόλυτη διαφορά των συναρτήσεων που αναφέρονται παραπάνω, δηλαδή οι (EDF), (CDF) και προκύπτει η παρακάτω σχέση (3.11). Στην συνέχεια υπολογίζεται η κρίσιμη τιμή με το καθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας, από τους πίνακες κατανομής «Kolmogorov» και συγκρίνεται με την D_n . Αν η D_n είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή, απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση (H_0).

$$D_n = \text{Sup}_x |F_n(x) - F(x)| \quad (3.11)$$

Για την περίπτωση της σύγκρισης δύο διαφορετικών δειγμάτων, αρχικά διατυπώνεται η μηδενική υπόθεση η οποία ισχυρίζεται ότι τα δείγματα προέρχονται από την ίδια

κατανομή, ενώ η εναλλακτική ισχυρίζεται το αντίθετο. Η διαδικασία που ακολουθείται για τον έλεγχο της δοκιμής είναι παρόμοια με αυτήν του ενός δείγματος. Οι μόνες διαφορές είναι στο υπολογισμό του D αντικαθιστώντας στην σχέση (3.11) την συνάρτηση (CDF) με την αντίστοιχη συνάρτηση (EDF) του δεύτερου δείγματος όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση (3.12). Στην συνέχεια υπολογίζεται η κρίσιμη τιμή με το καθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας, από τους πίνακες κατανομής «Kolmogorov» και συγκρίνεται με την $D_{n,m}$. Αν η $D_{n,m}$ είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή, απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση (H_0). (Dimitrova D, 2020)

$$D_{n,m} = \text{Sup}_x |F_n(x) - G_m(x)| \quad (3.12)$$

Στο παράδειγμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο στατιστικός έλεγχος «Kolmogorov – smirnov (K-S)» δύο πληθυσμών. Συγκεκριμένα πρόκειται για μια εταιρία όπου μελετά δύο τεχνικές συναρμολόγησης ενός εξαρτήματος. Επιλέχθηκαν διάφοροι εργάτες για την συναρμολόγηση του εξαρτήματος ,αλλά στα δεδομένα συμπεριλήφθηκαν οι εργάτες που κατάφεραν να το συναρμολογήσουν, καθώς και η χρονική διάρκεια που πέρασε για την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης στον καθένα. Στον παρακάτω πίνακα (3.4.5) παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων. (Bolen T, 2014)

Πίνακας 3.4.5:Χρονικά Δεδομένα

Χρονική διάρκεια-Τεχνική 1	Χρονική διάρκεια -Τεχνική 2
41	41
45	43.6
49.1	45.6
49.2	46.4
54.8	47.9
	50.2

Πίνακας 3.4.6: Αποτελέσματα για την εύρεση του D

Δεδομένα	Τεχνική 1	Τεχνική 2	F _n (X)	G _m (X)	D= F1 – F2
41	1	1	1/5	1/6	0.04
44.6	0	1	1/5	2/6	0.13
45.3	1	0	2/5	2/6	0.066
45.6	0	1	2/5	3/6	0.1
46.4	0	1	2/5	4/6	0.26
47.9	0	1	2/5	5/6	0.43
49.1	1	0	3/5	5/6	0.23
49.2	1	0	4/5	5/6	0.03
50.29	0	1	4/5	6/6	0.2
54.8	1	0	5/5	6/6	0
Συνολικά	n=5	m=6			

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα (3.4.6) για το στοιχείο 47.9 έχουμε την μεγαλύτερη διαφορά D= 0.43. Σύμφωνα με τον πίνακα κατανομής υπολογίζεται η κρίσιμη τιμή για n=5, m=6 και βαθμό σημαντικότητας α=0.05 . Η κρίσιμη τιμή ισούται με $\frac{24}{30} = 0.8$ η οποία είναι μεγαλύτερη από την D= 0.43, οπότε δεν μπορεί να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση .

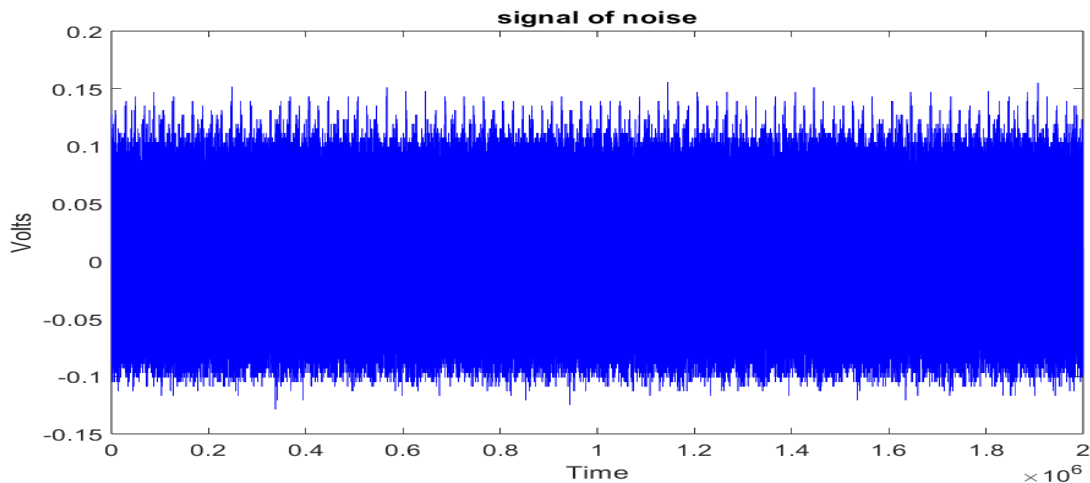
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία σύγκρισης σημάτων και ανάλυση των αποτελεσμάτων

4.1 Σύγκριση των σημάτων στο πεδίο του χρόνου

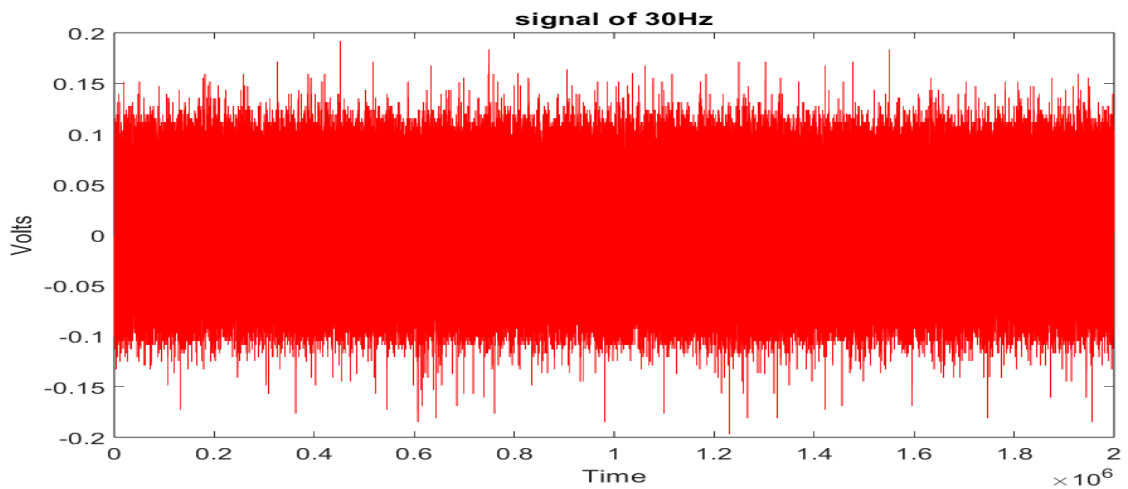
Στα παρακάτω διαγράμματα αναπαρίσταται μέσω του παλμογράφου οι μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και οι αντίστοιχες μετρήσεις ενός από τα εξεταζόμενα προφίλ διέγερσης του κινητήρα δόνησης. Με την αναπαράσταση των σημάτων στο πεδίο του χρόνου εξαλείφεται το φαινόμενο “DC offset” αφαιρώντας από κάθε δείγμα της μέτρησης, την μέση τιμή του σήματος (4.1). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του MATLAB, και έχει ως αποτέλεσμα την ποιοτικότερη ανάλυση των σημάτων.

$$X[n] = x[n] - \bar{x}, \text{ όπου } n \in N \quad (4.1)$$

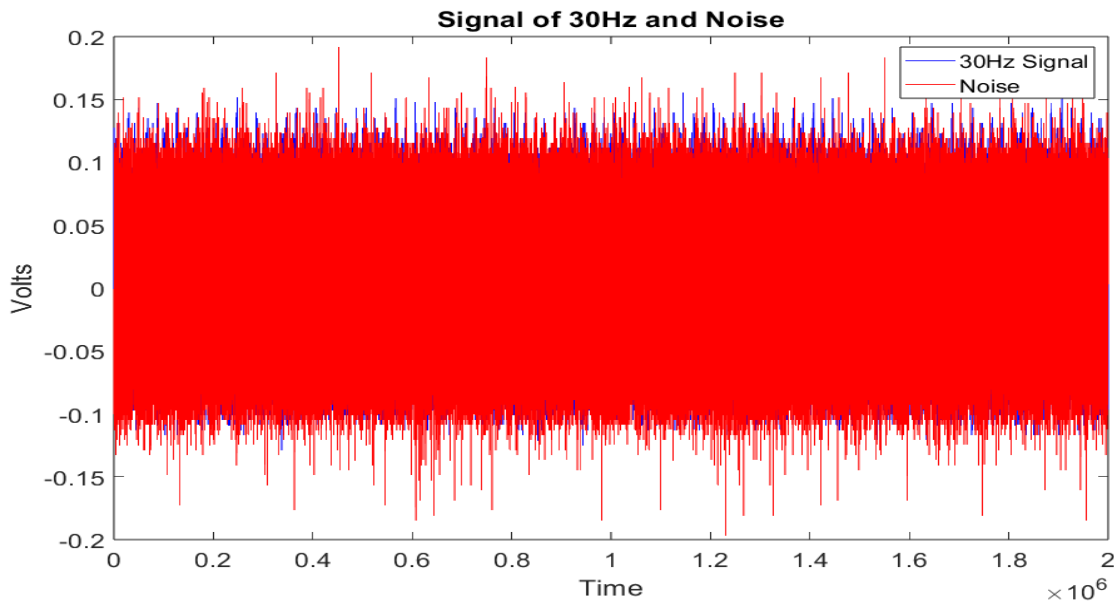
Σχήμα 4.1.1: Αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στο πεδίο του χρόνου μέσω του MATLAB



Σχήμα 4.1.2: Αναπαράσταση του ληφθέντων σήματος κατόπιν διέγερσης στα 30 Hz στο πεδίο του χρόνου μέσω του MATLAB



Σχήμα 4.1.3: Αναπαράσταση των σημάτων σε κοινό διάγραμμα μέσω του MATLAB

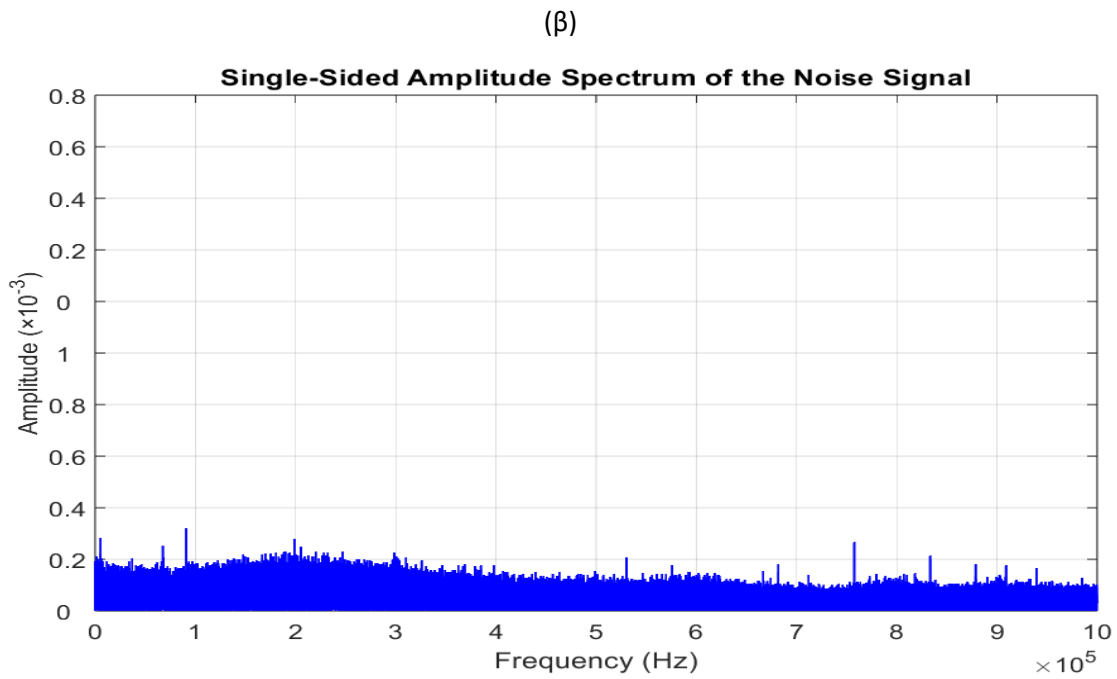
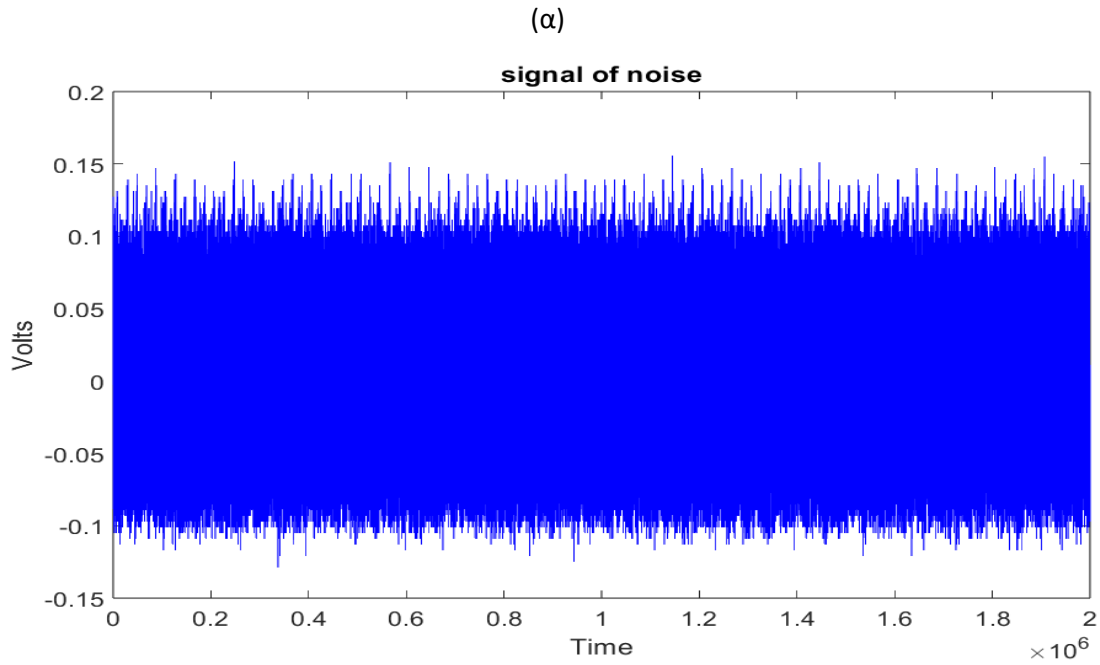


Όπως διακρίνεται στα παραπάνω γραφήματα (4.1.1), (4.1.2) για την σύγκριση των σημάτων στο πεδίο του χρόνου απαιτείται η δημιουργία κοινού γραφήματος ώστε να διαπιστωθούν τυχόν διαφορές μεταξύ των σημάτων. Ωστόσο, κατά την αναπαράσταση του κοινού γραφήματος (4.1.3) μπορεί να διαπιστωθεί με γυμνό μάτι πως δεν είναι δυνατόν να διακριθούν τα χαρακτηριστικά των δύο εξεταζόμενων σημάτων. Αυτό συμβαίνει, λόγω της αυξημένης παρουσίας του θορύβου με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα της σύγκρισης των σημάτων στο πεδίο του χρόνου.

4.2 Σύγκριση των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας

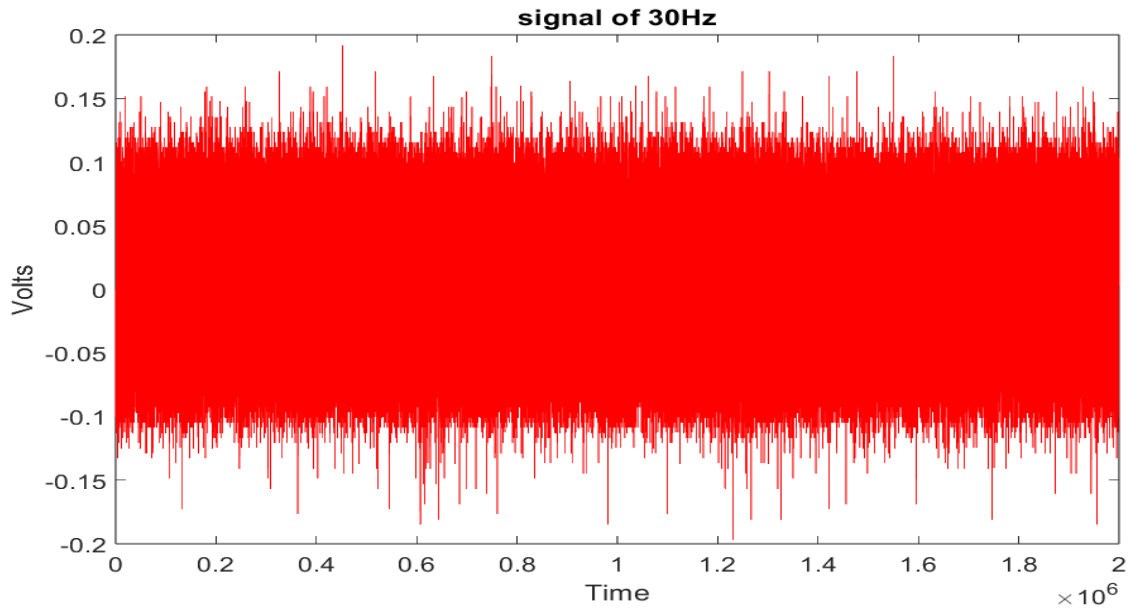
Καθώς ο υψηλός θόρυβος εμποδίζει την ανάλυση των δεδομένων στο πεδίο του χρόνου, η τεχνική της αναπαράστασης των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό των διάφορων χαρακτηριστικών που περιέχουν τα σήματα. Αξιοποιώντας τον αλγόριθμο του μετασχηματισμού “Fourier” ή “FFT” (Fast Fourier Transform) είναι δυνατή η μετατροπή του σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Με την ανάλυση των συνιστωσών της συχνότητας για κάθε προφίλ διέγερσης, είναι δυνατόν να αντληθούν και να κατανοηθούν διάφορες πληροφορίες σχετικά με την συχνοτική συμπεριφορά των σημάτων. Στα παρακάτω σχήματα (4.2.1), (4.2.2) παρουσιάζεται η μετάβαση των δύο σημάτων που έχουν προαναφερθεί, από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας με την χρήση του αλγόριθμου “FFT” στο MATLAB.

Σχήμα 4.2.1: Αναπαράσταση του θορύβου από το πεδίο του χρόνου (α) στο πεδίο της συχνότητας (β) μέσω του MATLAB

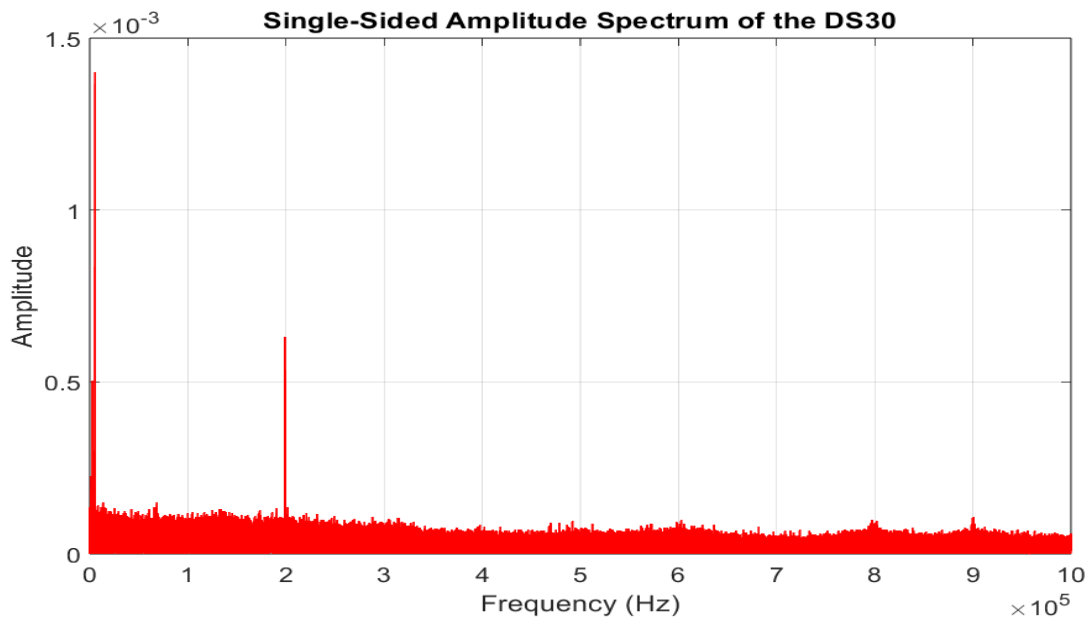


Σχήμα 4.2.2: Αναπαράσταση του ληφθέντος σήματος κατόπιν διέγερσης 30 Hz από το πεδίο του χρόνου (α) στο πεδίο της συχνότητας (β) μέσω του MATLAB

(α)

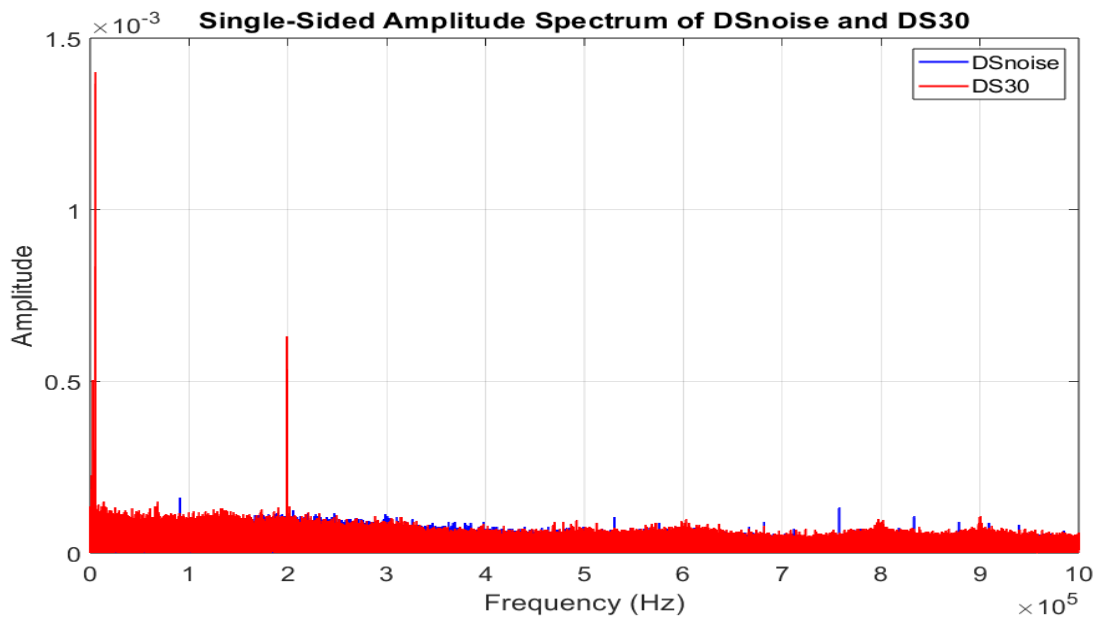


(β)

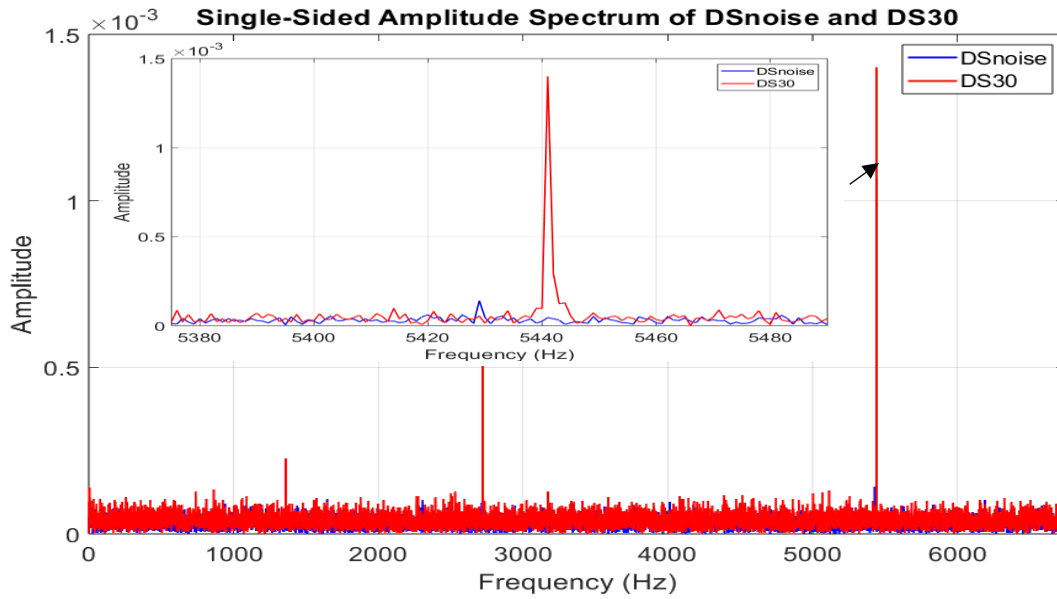


Αυτό που παρατηρείται σχετικά με τα δύο “FFT” στα παραπάνω διαγράμματα (4.2.1) (βλέπε σχήμα β), (4.2.2) (βλέπε σχήμα β) είναι ότι στο γράφημα του σήματος διέγερσης περιέχονται περισσότερες κορυφές και με μεγαλύτερη συνεισφορά σε σχέση με τον θόρυβο. Βέβαια, για την σύγκριση τους χρειάζεται η ανάλυση σε κοινό σύστημα αξόνων το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (4.2.3). Συγκεκριμένα σε ένα εύρος συχνοτήτων από 2 έως 200 KHz παρατηρούνται οι 3 μεγαλύτερες κορυφές που αφορούν το σήμα διέγερσης των 30 Hz, με την υψηλότερη κορυφή να είναι στα 5400 Hz. Όπως φαίνεται στις εικόνες του σχήματος (4.2.4) που αφορούν την ζώνη συχνοτήτων με την υψηλότερη κορυφή, ο θόρυβος (βλέπε μπλε χρώμα) εμφανίζεται με μικρό πλάτος, ενώ το σήμα διέγερσης των 30 Hz (βλέπε κόκκινο χρώμα) παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερη κορυφή υποδεικνύοντας ότι είναι το κυρίαρχο σήμα σε αυτήν την περιοχή. Η δεύτερη υψηλότερη κορυφή βρίσκεται στα 200 KHz όπως φαίνεται στο σχήμα (4.2.5). Παρατηρώντας την περιοχή αυτή σε μεγέθυνση, μπορεί να διαπιστώσει κανείς την απουσία του θορύβου και την ισχυρή εμφάνιση του σήματος διέγερσης. Ύστερα ακολουθεί η τρίτη υψηλότερη κορυφή και αναπαρίσταται στο σχήμα (4.2.6). Ωστόσο βρίσκεται στην ζώνη 2700 Hz και είναι ευδιάκριτη η συνεισφορά της κορυφής του σήματος διέγερσης σε σχέση με την ανύπαρκτη του θορύβου. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση της τέταρτης υψηλότερης κορυφής κοντά στην περιοχή 1300 Hz που φαίνεται στο σχήμα (4.2.7).

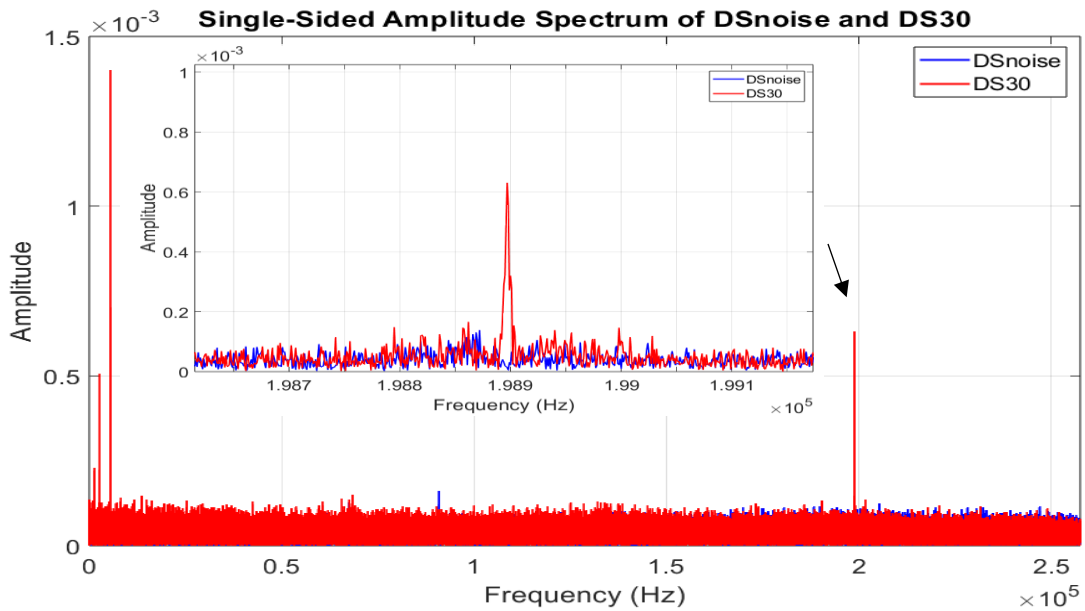
Σχήμα 4.2.3: Αναπαράσταση του ληφθέντος σήματος κατόπιν διέγερσης 30 Hz σε κοινό σύστημα αξόνων με τον θόρυβο στο πεδίο της συχνότητας μέσω του MATLAB



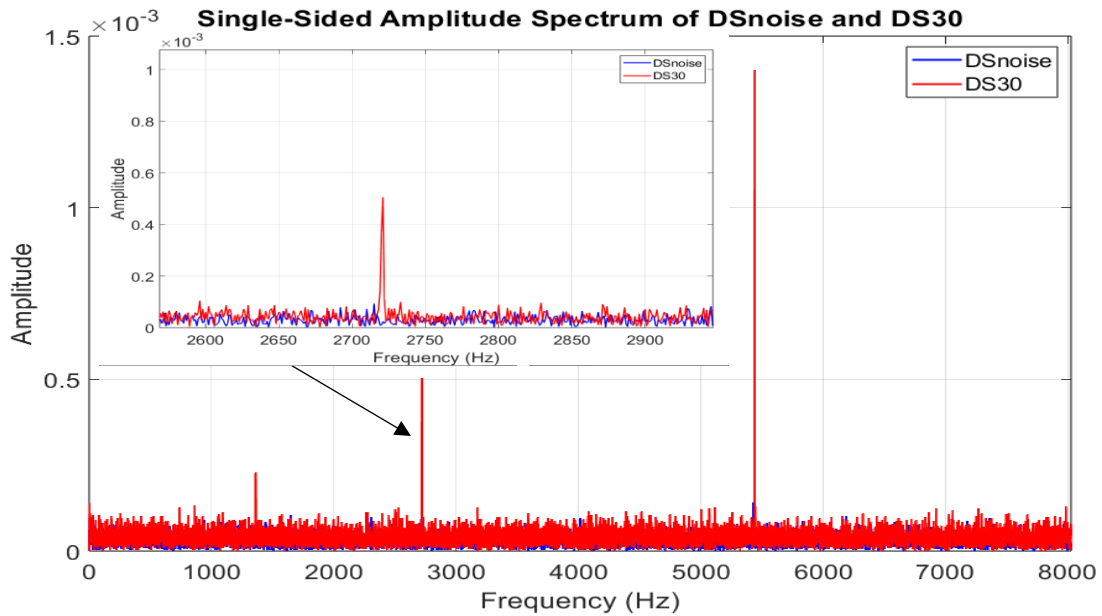
Σχήμα 4.2.4: Αναπαράσταση FFT διέγερσης – θορύβου προσεγγίζοντας την υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB



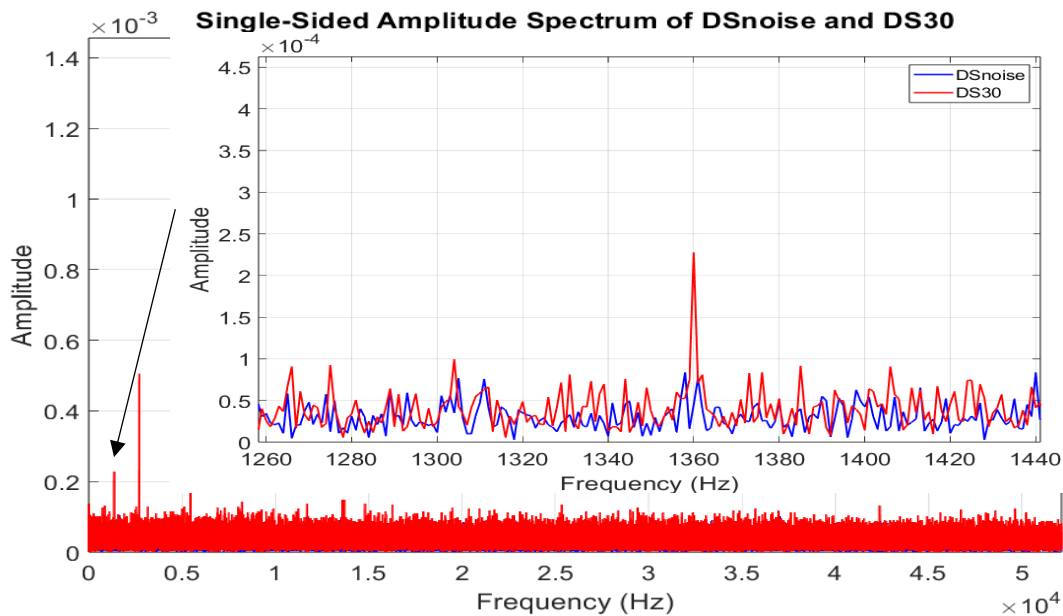
Σχήμα 4.2.5: Αναπαράσταση FFT διέγερσης – θορύβου προσεγγίζοντας την δεύτερη υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB



Σχήμα 4.2.6: Αναπαράσταση FFT διέγερσης – θορύβου προσεγγίζοντας την τρίτη υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB

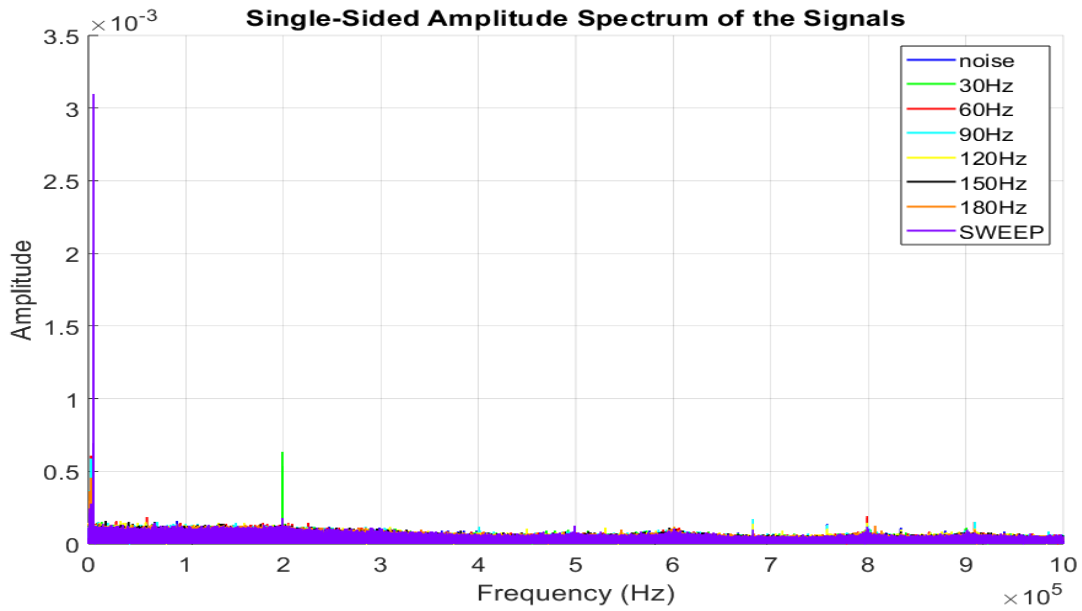


Σχήμα 4.2.7: Αναπαράσταση FFT διέγερσης – θορύβου προσεγγίζοντας την τέταρτη υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB

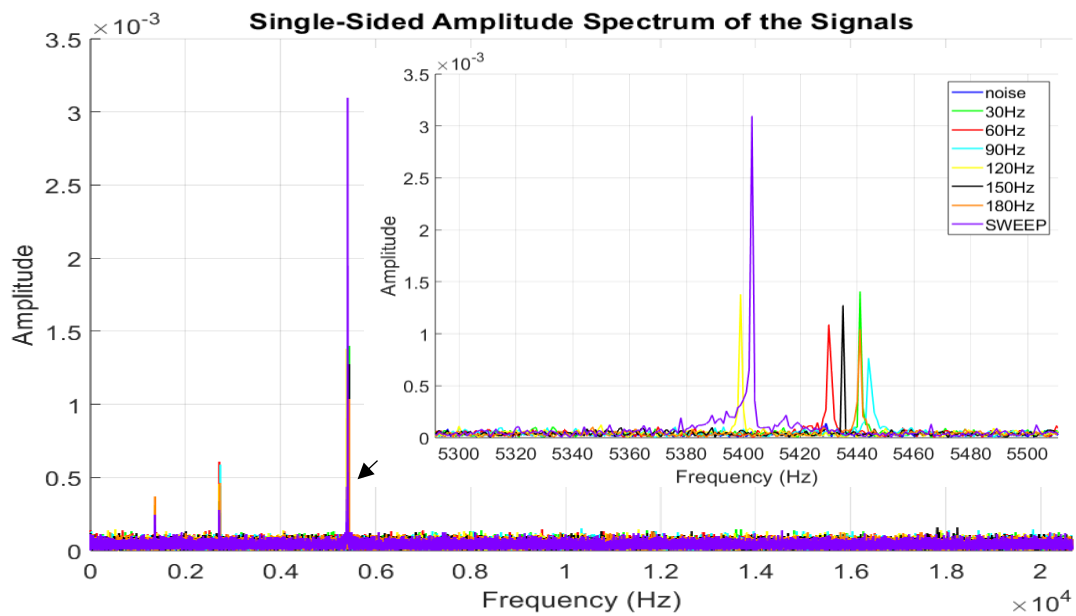


Ωστόσο για την εξασφάλιση βάσιμων ενδείξεων ότι όλα τα σήματα διέγερσης κυριαρχούν σε σχέση με τον θόρυβο θα πρέπει να εξεταστούν όλα τα (FFT) των προφίλ διέγερσης σε κοινό διάγραμμα.

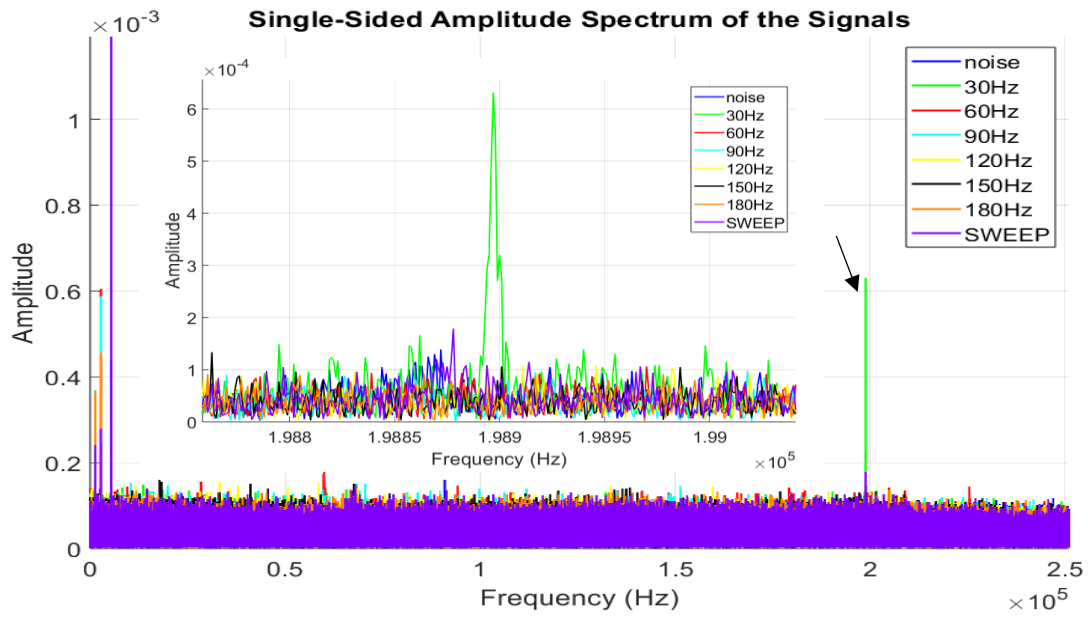
Σχήμα 4.2.8: Αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης μέσω του MATLAB



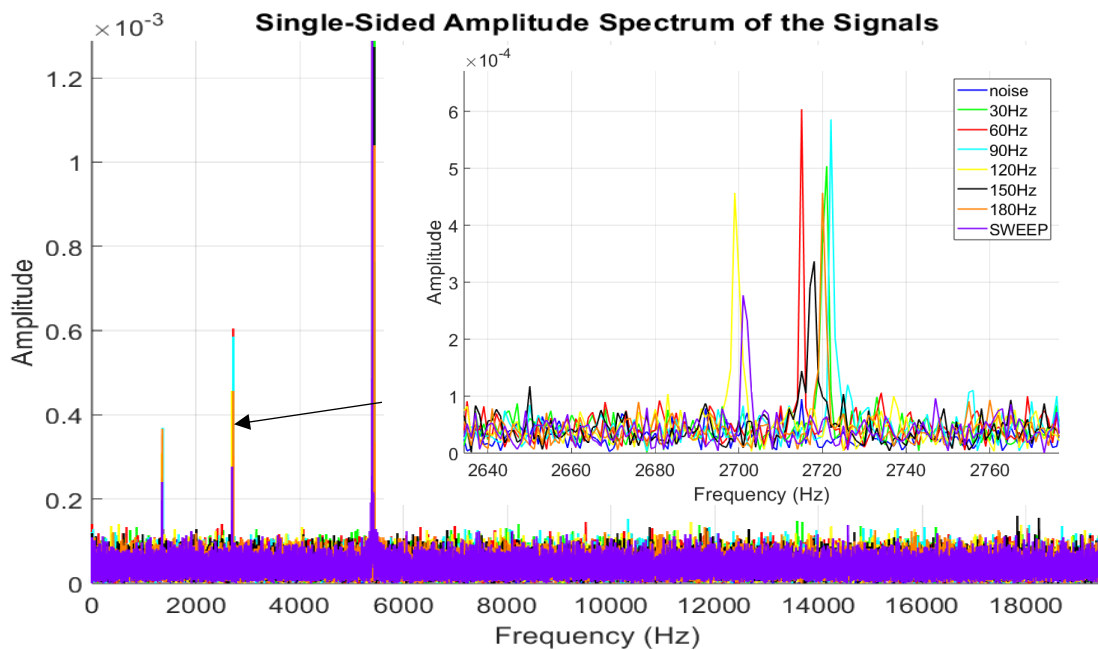
Σχήμα 4.2.9: Αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης προσεγγίζοντας την υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB



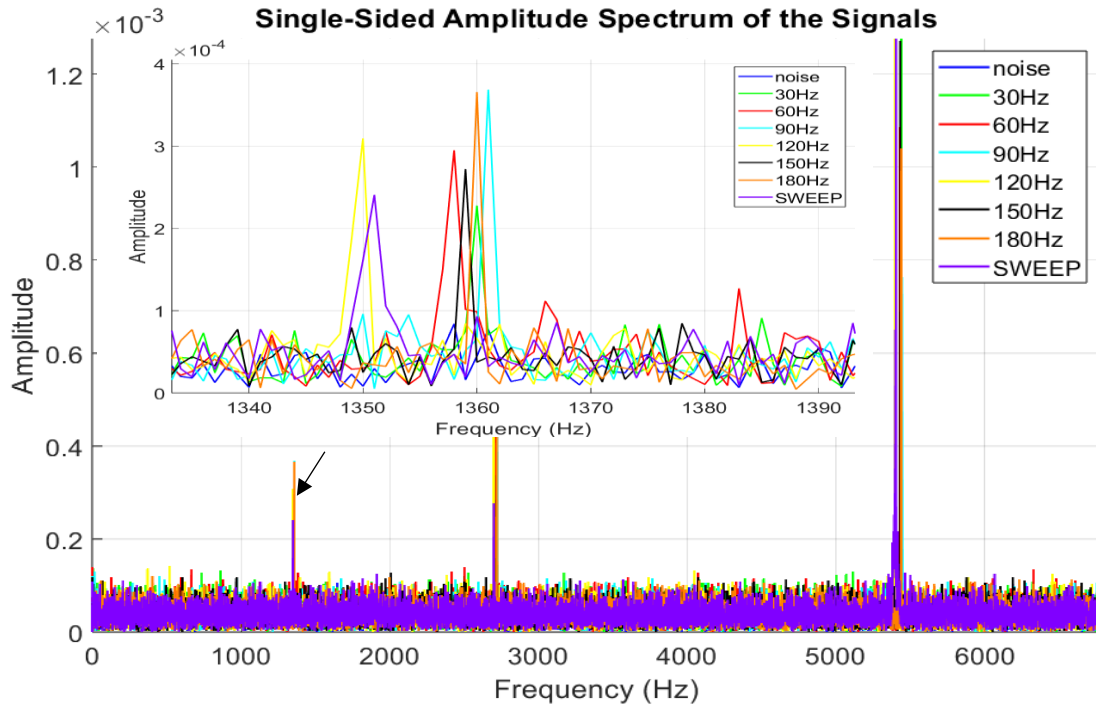
Σχήμα 4.2.10: Αναπαράσταση του FFT όλων των προφίλ διέγερσης προσεγγίζοντας την δεύτερη ψηλότερη κορυφή των μέσω του MATLAB



Σχήμα 4.2.11: Αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης προσεγγίζοντας την τρίτη ψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB



Σχήμα 4.2.12 :Αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης προσεγγίζοντας την τέταρτη υψηλότερη κορυφή μέσω του MATLAB



Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, σε όλα τα προφίλ διέγερσης παρατηρείται μεγαλύτερη συνεισφορά στις εξεταζόμενες κορυφές σε σχέση με τις αντίστοιχες κορυφές που αποδίδονται στον θόρυβο. Στο σχήμα (4.2.9) φαίνεται η ζώνη συχνοτήτων γύρω στα 5400 Hz με την υψηλότερη κορυφή να αντιπροσωπεύει το σήμα διέγερσης SWEEP (FFT με μωβ χρώμα). Στην περιοχή εκείνη είναι εμφανές, ότι και τα επτά εξεταζόμενα προφίλ διέγερσης του κινητήρα δόνησης υπερβαίνουν κατά πολύ τα επίπεδα του θορύβου (FFT με μπλε χρώμα). Στο σχήμα (4.2.10) αναπαρίσταται η περιοχή συχνοτήτων 200,000 Hz με την δεύτερη υψηλότερη κορυφή που αντιπροσωπεύει το σήμα διέγερσης των 30 Hz (FFT με πράσινο χρώμα). Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, το σήμα διέγερσης των 30 Hz είναι το μοναδικό προφίλ διέγερσης που παρουσιάζεται σε αυτήν την ζώνη συχνοτήτων. Για αυτό τον λόγο, η περιοχή αυτή δεν αποτελεί κριτήριο για τη σύγκριση της ισχύος των σημάτων διέγερσης σε σχέση με τον θόρυβο, καθώς η παρουσία της κορυφής των 30 Hz φαίνεται τυχαία ή μη ρεαλιστική. Στη συνέχεια, στο σχήμα (4.2.11) απεικονίζεται η τρίτη περιοχή συχνοτήτων γύρω στα 2700 Hz, όπου παρατηρούνται κορυφές για όλα τα προφίλ διέγερσης. Στην συγκεκριμένη περιοχή παρατηρείται ότι και τα επτά προφίλ εμφανίζουν κορυφές που υπερβαίνουν τα επίπεδα του θορύβου. Η διαφορά με τον θόρυβο διακρίνεται επίσης σε επόμενη περιοχή περίπου στα 1350 Hz και αποτελεί την παρουσία της τέταρτης υψηλότερης κορυφής όπως φαίνεται και στο σχήμα (4.2.12). Εφόσον σε όλες τις υψηλές κορυφές και σε όλες τις περιοχές συχνοτήτων παρατηρείται μεγαλύτερη συνεισφορά από τα σήματα διέγερσης μεταξύ του σήματος θορύβου, υπάρχει ένδειξη πως τα σήματα διέγερσης κυριαρχούν σε σχέση με τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.

Ωστόσο, είναι εξαιρετικής σημασίας ο προσδιορισμός του σήματος διέγερσης που πρωταγωνιστεί και παράλληλα ο προσδιορισμός εκείνου που πρωταγωνιστεί λιγότερο σε σχέση με τον θόρυβο. Κοιτάζοντας στα σχήματα (4.2.9), (4.2.11) τις κορυφές, δεν είναι εύκολο κανείς να συμπεράνει ποιο σήμα πρωταγωνιστεί με ακρίβεια. Συγκεκριμένα στην περιοχή της υψηλότερης κορυφής στο σχήμα (4.2.9) πρωταγωνιστεί το σήμα διέγερσης “Sweep” , ύστερα ακολουθεί το σήμα των 30 Hz και μετά το σήμα των 120 Hz. Στην επόμενη υψηλότερη κορυφή στο σχήμα (4.2.11) πρωταγωνιστεί το σήμα των 60 Hz , έπειτα ακολουθεί το σήμα των 90 Hz και στην συνέχεια το σήμα των 30 Hz. Καθώς είναι αδύνατον να υπάρχουν βάσιμες ενδείξεις από τα σχήματα (4.2.9), (4.2.11) για το ποιο προφίλ διέγερσης πρωταγωνιστεί ,πρέπει να υπολογιστούν οι ποσοστιαίες διαφορές στα πλάτη για όλες τις διεγέρσεις ,ως προς το υψηλότερο πλάτος ανά περιοχή. Αυτό γίνεται με την χρήση της υπερύψωσης όπου αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρος για την σχεδίαση συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Η υπερύψωση ορίζεται ως το ποσοστό της μέγιστης απόκλισης του συστήματος από την τελική τιμή. (Καλλιγεροπουλος,Δ, 2005)

$$U = \left(\frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} \right) \times 100\% \quad (4.2)$$

Με την διαμόρφωση της σχέσης (4.2) ως η διαδικασία υπολογισμού της ποσοστιαίας διαφοράς στα πλάτη των φασματικών συνιστωσών, έχουμε την εξής σχέση:

$$\Delta A = \left(\frac{A_{max} - A_i}{A_{max}} \right) \times 100\% \quad \text{για } i = 1, 2, \dots, 7 \quad (4.3)$$

, όπου i είναι η κορυφή της κάθε διέγερσης στην εξεταζόμενη περιοχή συχνοτήτων και A το πλάτος

Πίνακας 4.2.1: Εξεταζόμενες περιοχές ανά ημέρα μετρήσεων.

Ημέρα Περιοχές	1 ^η Ημέρα	2 ^η Ημέρα
1 ^η Περιοχή	2500 Hz	5400 Hz
2 ^η Περιοχή	5000 Hz	200.000 Hz
3 ^η Περιοχή	200.000 Hz	2700 Hz
4 ^η Περιοχή	36.000 Hz	1350 Hz

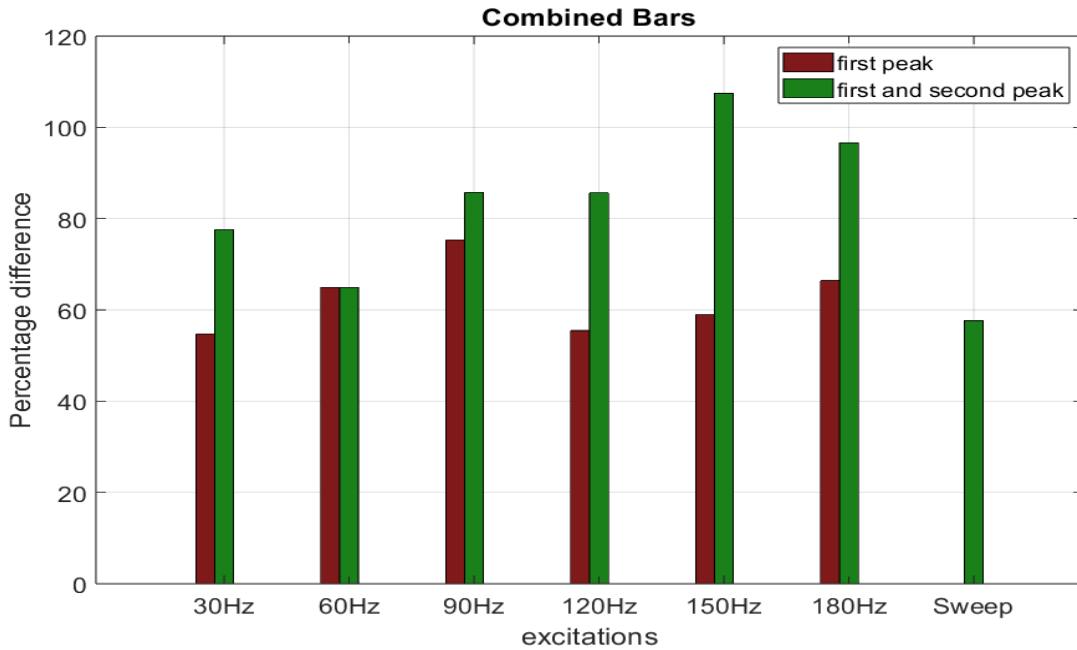
Καθώς έγιναν οι ίδιες μετρήσεις σε δύο ημέρες, μόνο οι δύο περιοχές από τις τέσσερις εμφανίζονταν ως κύριες και για τις δύο ημέρες. Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα (4.2.1) μπορούμε να διαπιστώσουμε πως οι πρώτες δύο περιοχές της πρώτης ημέρας μετρήσεων συμπίπτουν σχεδόν με την πρώτη και τρίτη περιοχή της άλλης ημέρας. Παρατηρείται επίσης, πως η τρίτη ζώνη συχνοτήτων της 1^{ης} ημέρας είναι όμοια με την δεύτερη ζώνη συχνοτήτων της 2^{ης} ημέρας. Ωστόσο στην δεύτερη ημέρα των μετρήσεων στην περιοχή των 200.000 Hz αναπαρίσταται μόνο η κορυφή που αντιστοιχεί στο σήμα διέγερσης 30 Hz, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.2.10) και έτσι δεν αποτελεί κριτήριο για τη σύγκριση της ισχύος των σημάτων διέγερσης σε σχέση με τον θόρυβο. Λόγω της εμφάνισης αναξιοπιστίας των μετρήσεων, η τέταρτη κορυφή, που σχετίζεται με την περιοχή των 1350 Hz στο σχήμα (4.2.12), δεν επιλέχθηκε ως κριτήριο για τη σύγκριση των προφίλ διέγερσης, αφού δεν συμπίπτει με την αντίστοιχη ζώνη των 36.000 Hz της 1^{ης} ημέρας. Ως εκ τούτου, η ανάλυση περιορίστηκε στις πρώτη και την τρίτη υψηλότερη κορυφή της 2^{ης} ημέρας στις οποίες παρουσιάζονται πιο συνεπή και αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τις αντίστοιχες ζώνες συχνοτήτων της 1^{ης} ημέρας.

Ακολουθεί ο πίνακας (4.2.2), στον οποίο αναγράφονται για κάθε διέγερση οι αντίστοιχες ποσοστιαίες διαφορές των πλατών ως προς την υψηλότερη κορυφή στις περιοχές συχνοτήτων της 2^{ης} ημέρας που επιλέχθηκαν. Σύμφωνα με τον πίνακα (4.2.2) στην περίπτωση μελέτης του αθροίσματος των δύο κορυφών η ελάχιστη ποσοστιαία απόσταση διακρίνεται στο σήμα διέγερσης του Sweep, ενώ η μεγαλύτερη ποσοστιαία απόσταση πλάτους παρατηρείται στο σήμα διέγερσης των 150Hz και 180Hz. Άρα αυτό που πρωταγωνιστεί περισσότερο είναι το SWEEP και εκείνα που πρωταγωνιστούν λιγότερο είναι τα σήματα διέγερσης των 150Hz και 180Hz. Αυτό φαίνεται επίσης και στα ραβδογράμματα στο σχήμα (4.2.13).

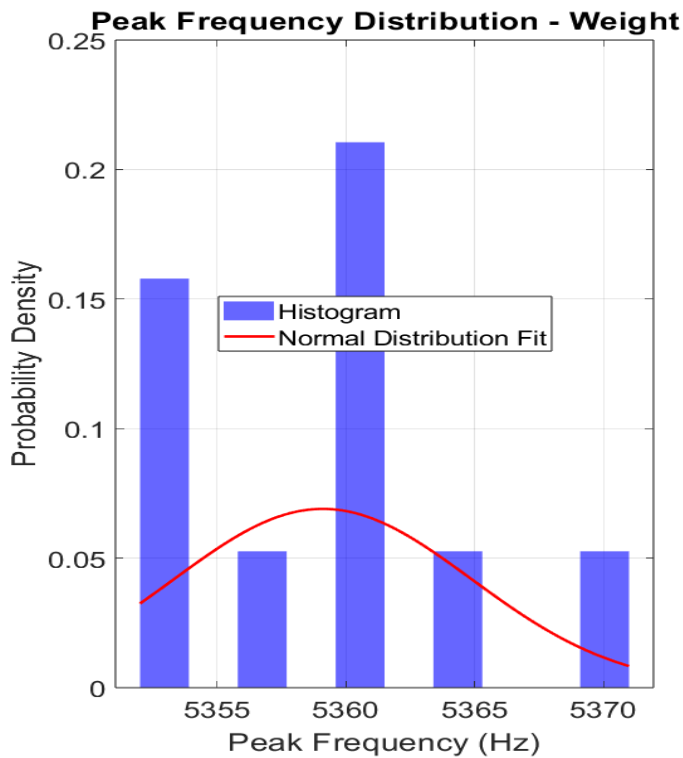
Πίνακας 4.2.2: Ποσοστιαία διαφορά των αποστάσεων ανά περιοχή από την υψηλότερη κορυφή για όλες τις διεγέρσεις.

Hz	1^η 5400Hz (%)	2^η 2700Hz (%)	Πρώτη (%)	Άθροισμα 2 πρώτων (%)
30	54.75	22.87	54.75	77.62
60	64.93	0	64.93	64.93
90	75.37	10.39	75.37	85.76
120	55.46	30.16	55.46	85.62
150	58.92	48.52	58.92	107.44
180	66.41	30.21	66.41	96.61
Sweep	0	57.6	0	57.6

Σχήμα 4.2.13: Ποσοστιαία διαφορά πλάτους ως προς το μέγιστο πλάτος για τις κορυφές συχνοτήτων που επιλέχθηκαν με βάση την 2^η ημέρα μετρήσεων.



Σχήμα 4.2.14: Αναπαράσταση ιστογράμματος σύγκρισης με την κανονική κατανομή.



Στο διπλανό σχήμα (4.2.14) παρουσιάζεται ένα ιστόγραμμα σύγκρισης, το οποίο εξετάζει κατά πόσο οι μετρήσεις που αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθούν την κανονική κατανομή (καμπύλη με κόκκινο χρώμα). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το σχήμα, ο αριθμός των μετρήσεων δεν επαρκεί για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την κατανομή των δεδομένων. Για μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση, απαιτούνται πολύ περισσότερες από 10 μετρήσεις, ώστε να γίνει σαφέστερο αν τα δεδομένα πλησιάζουν την καμπύλη της κανονικής κατανομής (καμπύλη με κόκκινο χρώμα).

4.3 Αναπαράσταση των μετρήσεων FFT και ανάλυση στα διαστήματα εύρους συχνοτήτων

Παρακάτω παρουσιάζεται ο οδηγός με τον οποίο ονομάζεται το κάθε είδος μέτρησης, με την κατηγοριοποίηση ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Ο οδηγός αυτός διευκολύνει την κατανόηση των διαφορετικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και των συγκεκριμένων παραμέτρων τους.

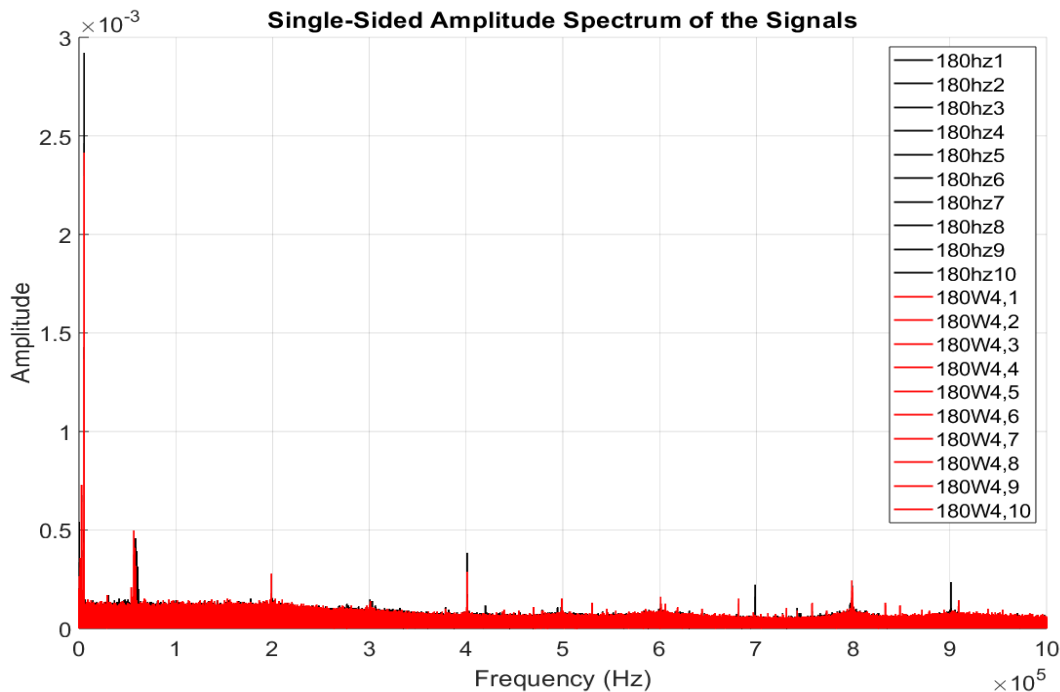
Μετρήσεις χωρίς την προσθήκη βάρους των εξεταζόμενων προφίλ διέγερσης:

1. Προφίλ διέγερσης των 180Hz,*i*:
 - Πρόκειται για το σήμα διέγερσης σε συχνότητα 180Hz.
 - Αριθμός μέτρησης (*i*) όπου υποδηλώνει την αλληλουχία των μετρήσεων.
Όπου $i = 1, \dots, 10$
2. Προφίλ διέγερσης SWEEP,*i* :
 - Πρόκειται για το σήμα διέγερσης με την σάρωση όλων των συχνοτήτων.
 - Αριθμός μέτρησης (*i*) όπου υποδηλώνει την αλληλουχία των μετρήσεων.
Όπου $i = 1, \dots, 10$

Μετρήσεις με την προσθήκη βάρους σε απόσταση 4 ,6, 8 cm για τα εξεταζόμενα προφίλ διέγερσης:

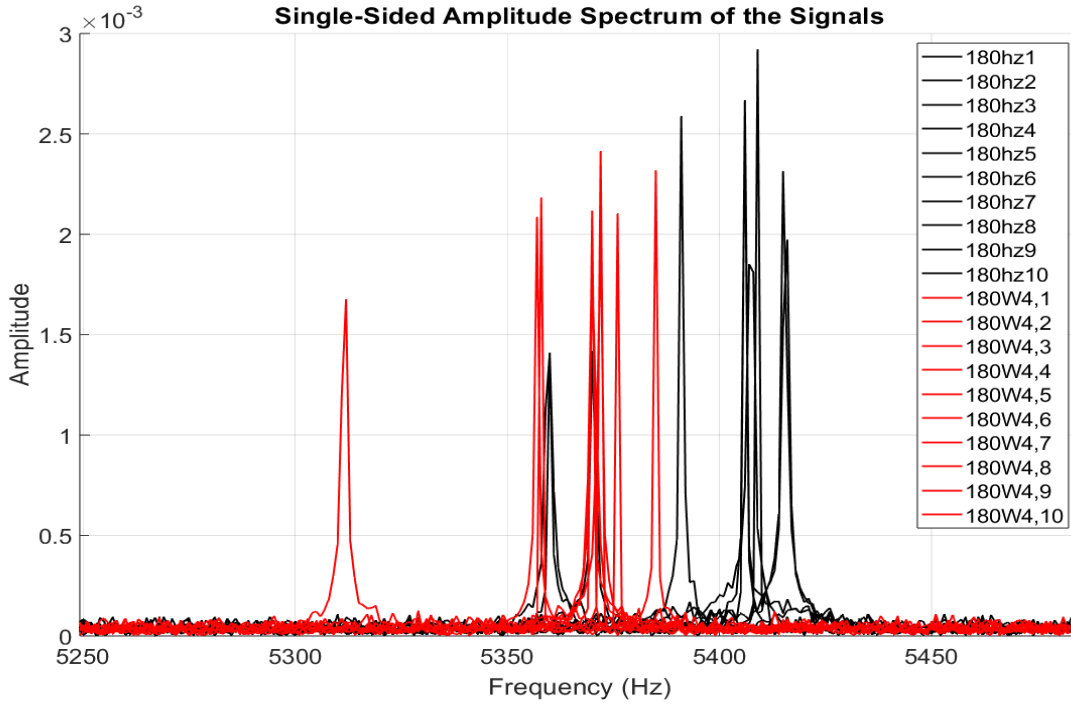
1. Προφίλ διέγερσης των 180W4,*i* 180W6,*i* 180W8,*i* :
 - Πρόκειται για το σήμα διέγερσης σε συχνότητα 180Hz.
 - Τα W4 , W6 , W8 συμβολίζουν την προσθήκη του βάρους σε απόσταση 4,6,8 cm από το μαγνητοελαστικό φιλμ.
 - Αριθμός μέτρησης (*i*) όπου υποδηλώνει την αλληλουχία των μετρήσεων.
Όπου $i = 1, \dots, 10$
2. Προφίλ διέγερσης SWEEPW4,*i* SWEEPW6,*i* SWEEPW8,*i* :
 - Πρόκειται για το σήμα διέγερσης με την σάρωση όλων των συχνοτήτων.
 - Τα W4, W6 , W8 , συμβολίζουν την προσθήκη του βάρους σε απόσταση 4,6,8 cm από το μαγνητοελαστικό φιλμ.
 - Αριθμός μέτρησης (*i*) όπου υποδηλώνει την αλληλουχία των μετρήσεων.
Όπου $i = 1, \dots, 10$

Σχήμα 4.3.1: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης στα 180 Hz για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 4 cm από το φιλμ (κόκκινο χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης των 180 Hz χωρίς το βάρους (μαύρο χρώμα).



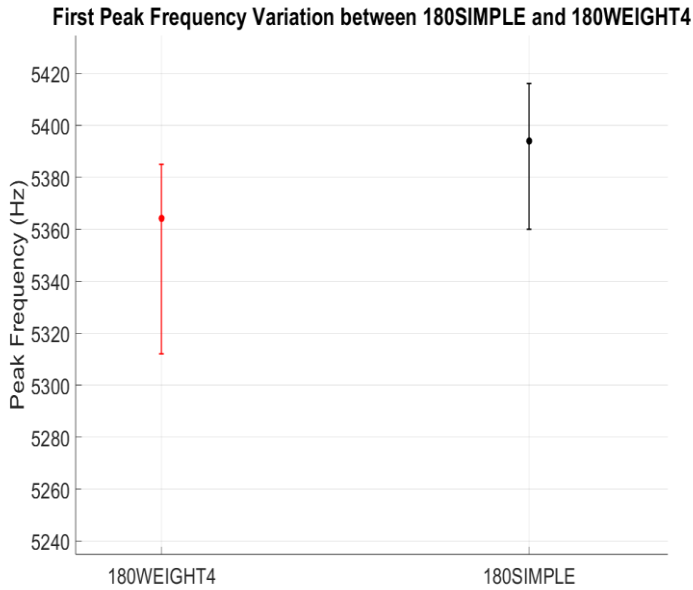
Αρχικά, έχουν προσεγγιστεί οι δύο υψηλότερες κορυφές, καθώς υπάρχει το βέβαιο συμπέρασμα από τις μετρήσεις όλων των προφίλ διέγερσης ότι πρόκειται για 2 ζώνες συχνοτήτων όπου αποτελούν τους κύριους συντελεστές των χαρακτηριστικών της διέγερσης. Αυτό δεν μπορεί να ισχύει και για τις χαμηλότερες σε συνεισφορά κορυφές, διότι δεν φαίνεται να αντιπροσωπεύουν με βεβαιότητα τις συχνότητες που περιέχονται στην διέγερση, λόγω της ασυνεπής εμφάνισης τους στις μετρήσεις. Συνεπώς, σχετικά με την πρώτη κορυφή, διαπιστώνεται από το σχήμα (4.3.2) πως βρίσκεται περίπου στην περιοχή των 5300-5425 Hz. Αντικρίζοντας τις 20 κορυφές από τις μετρήσεις του σήματος διέγερσης 180 Hz στην περίπτωση που προστίθεται το φορτίο στην δοκό σε απόσταση 4 cm από το φιλμ και τις μετρήσεις χωρίς την προσθήκη του φορτίου, μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι, τα διαστήματα εύρους συχνοτήτων δεν ταυτίζονται αλλά υπάρχει επικάλυψη μεταξύ τους. Το ίδιο παρατηρείται και στην περίπτωση της δεύτερης κορυφής όπου βρίσκεται στο εύρος 2650-2710 Hz δηλαδή στο σχήμα (4.3.4). Για την καλύτερη διάκριση αυτών των συμπερασμάτων έχουν δημιουργηθεί τα διαγράμματα μεταβολής εύρους κορυφών (errorbars) που φαίνονται στα σχήματα (4.3.3), (4.3.5) για την εκάστοτε ζώνη συχνοτήτων που εξετάζεται. Ως εκ τούτου η οπτική ένδειξη ότι τα διαστήματα διαφέρουν δεν μπορεί να είναι βάσιμη. Ωστόσο, για αυτόν τον λόγο, είναι εξαιρετικής σημασίας να εξετασθεί αν υπάρχει στατιστικός διαφορά μεταξύ των διαστημάτων εύρους. Όποτε δίνονται οι πίνακες (4.3.1), (4.3.2) που αφορούν τα μη παραμετρικά τεστ των (kolmogorov-smirnov) και (kruskal-wallis) με βαθμό σημαντικότητας p-value 0.05.

Σχήμα 4.3.2: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz.



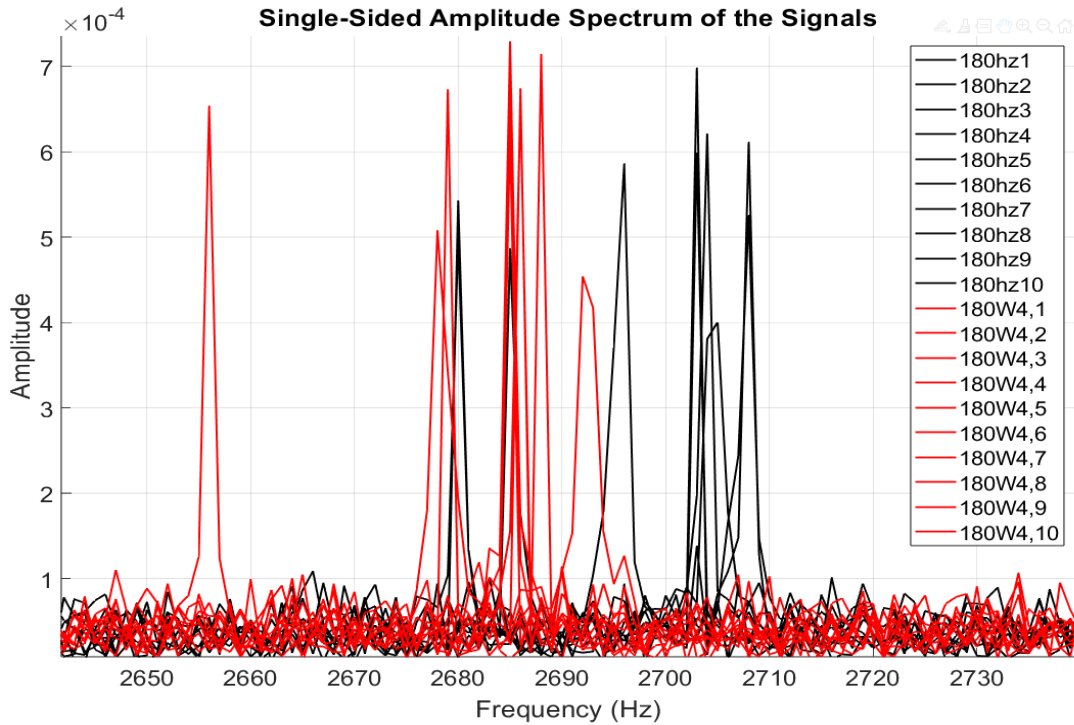
Σχήμα 4.3.3: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής

Πίνακας 4.3.1 : P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440 Hz) ανά τεστ.

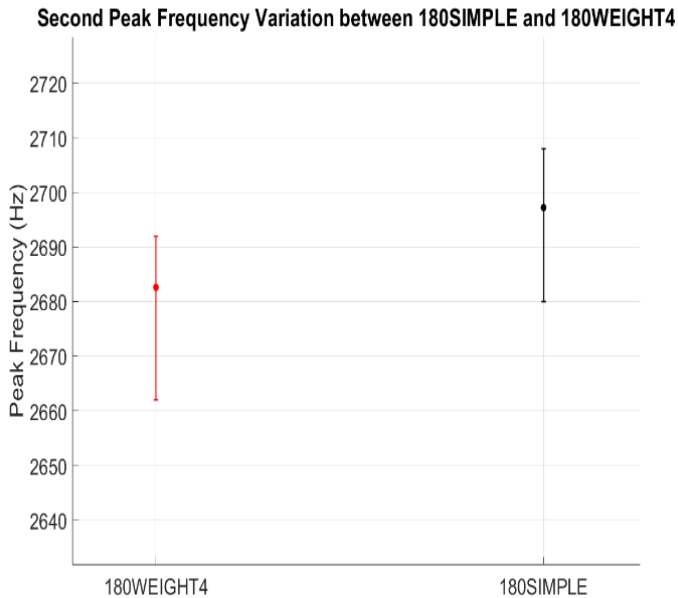


Test: (5300-5440 Hz)	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση 180W4	180S	180S
Αληθής υπόθεση	0.0068986	0.020507
	H ₁	H ₁

Σχήμα 4.3.4: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2660-2710) Hz



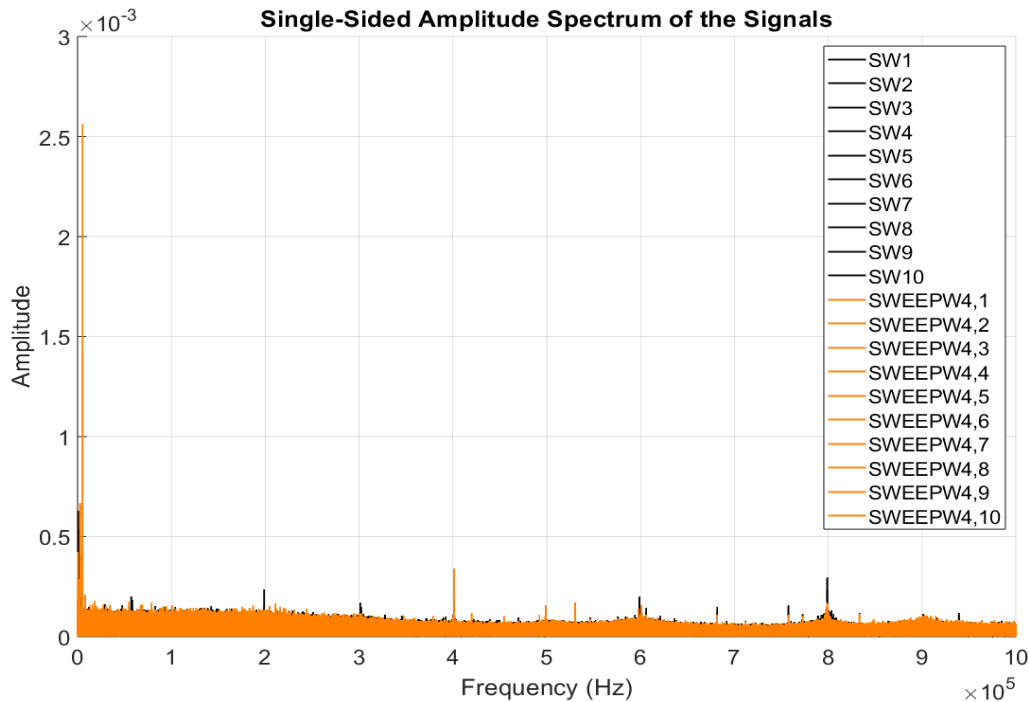
Σχήμα 4.3.5: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής



Πίνακας 4.3.2: P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2710) Hz ανά τεστ.

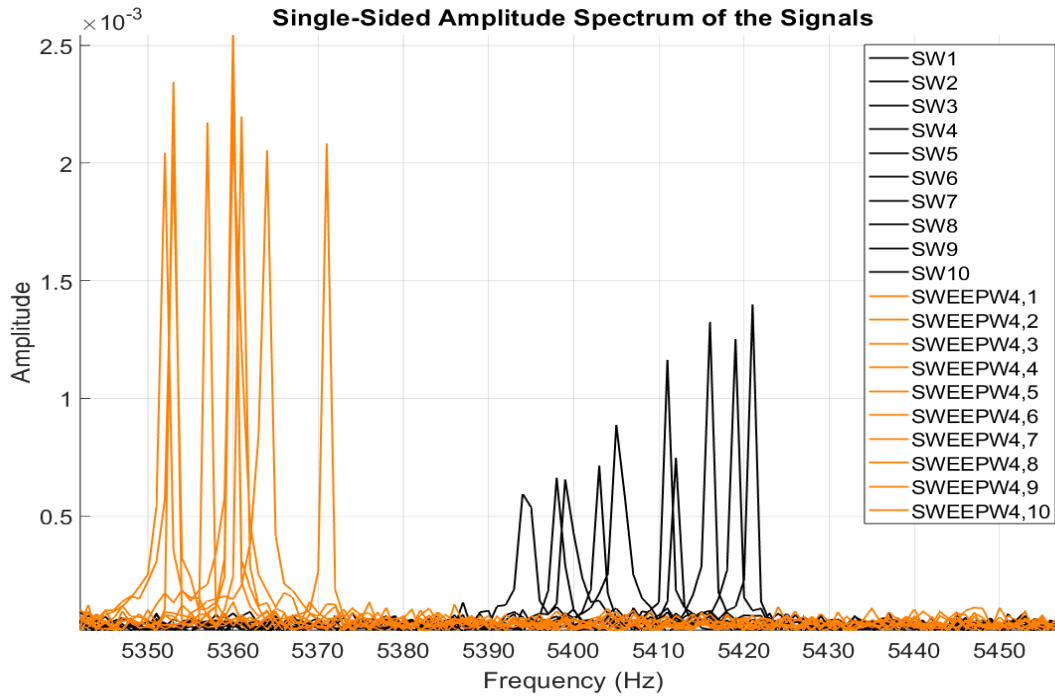
Test: (2660-2710) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση 180W4	180S	180S
	0.0068986	0.020459
Αληθής υπόθεση	H ₁	H ₁

Σχήμα 4.3.6: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης SWEEP για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 4 cm από το φιλμ (πορτοκαλί χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης SWEEP χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα).



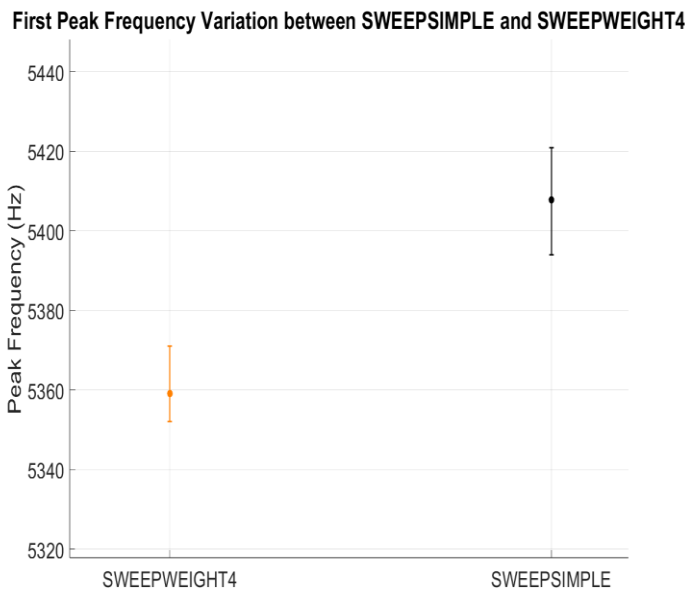
Όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με τα barchart (4.2.13) το προφίλ διέγερσης SWEEP δείχνει ότι παρέχει την καλύτερη δυνατή διέγερση σε σχέση με τα άλλα προφίλ διέγερσης, ενώ το σήμα διέγερσης των 180 Hz είναι από τα αυτά που πρωταγωνιστούν λιγότερο. Παρακάτω προσεγγίζονται οι δύο υψηλότερες κορυφές για την περίπτωση του SWEEP συμπεριλαμβάνοντας τα αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής εύρους και τον πίνακα όπου περιέχει τα αποτελέσματα από τους στατιστικούς ελέγχους. Στο σχήμα (4.3.7) αναπαρίσταται η πρώτη περιοχή συχνοτήτων στην περίπτωση που το φορτίο είναι τοποθετημένο σε απόσταση 4 cm από το φιλμ. Είναι εμφανές πως τα διαστήματα εύρους συχνοτήτων όχι μόνο δεν επικαλύπτονται, αλλά υπάρχει αρκετή απόσταση μεταξύ τους, γεγονός ότι είναι δυνατόν να ανιχνευθεί φορτίο μικρότερης μάζας. Αυτό φαίνεται επίσης διακρίνοντας το διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών (4.3.8), όπου η διαφορά των διαστημάτων είναι αρκετά μεγάλη. Στον πίνακα (4.3.3) υπογραμμίζονται τα αποτελέσματα των δύο τεστ τα όποια δείχνουν ότι απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση αφού δεν ξεπερνούν τον βαθμό σημαντικότητας. Το ίδιο συμβαίνει και για την δεύτερη περιοχή όπως φαίνεται στα διαγράμματα (4.3.9), (4.3.10), αλλά και στον πίνακα (4.3.4).

Σχήμα 4.3.7: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5330-5440) Hz



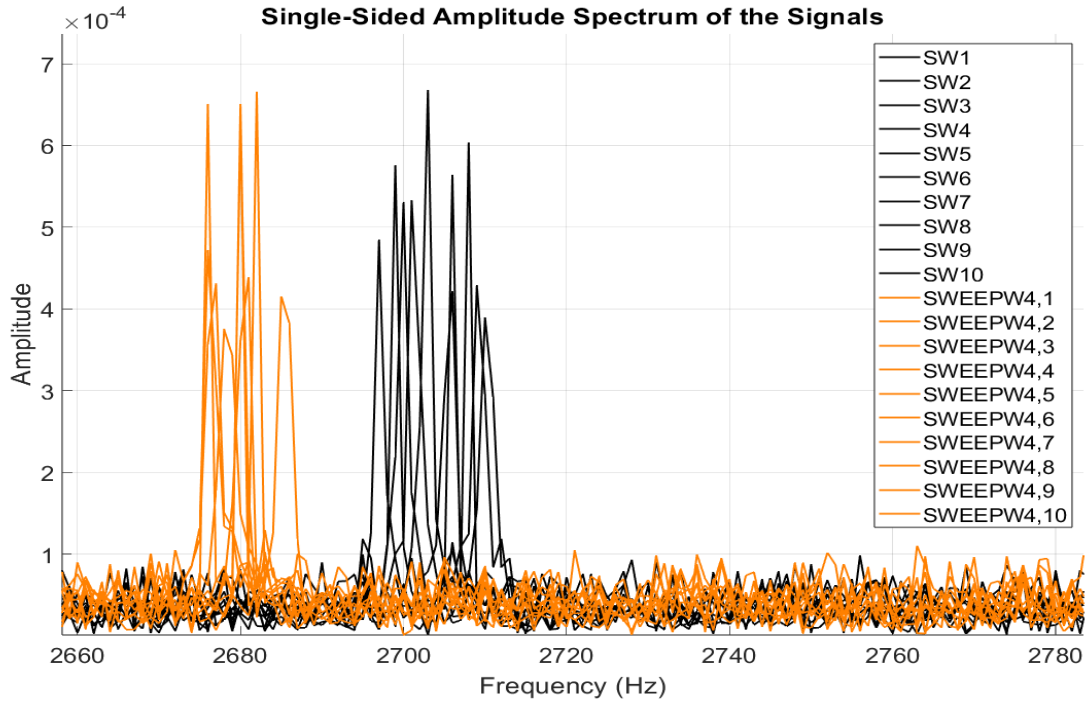
Σχήμα 4.3.8: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.

Πίνακας 4.3.3: P-values για το εύρος συχνοτήτων (5330-5440) Hz ανά τεστ.



Test: (5330-5440) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση SWEEPW4	SWEEP S	SWEEP S
	1.888e ⁻⁰⁵	0.00015262
Αληθής υπόθεση	H ₁	H ₁

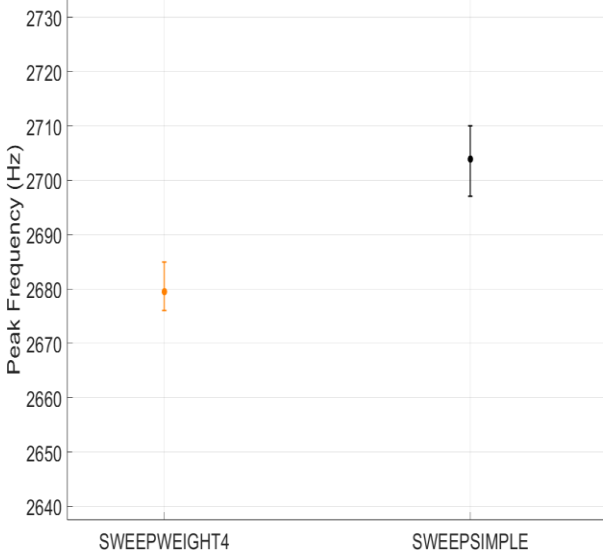
Σχήμα 4.3.9: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2670-2715) Hz.



Σχήμα 4.3.10: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.

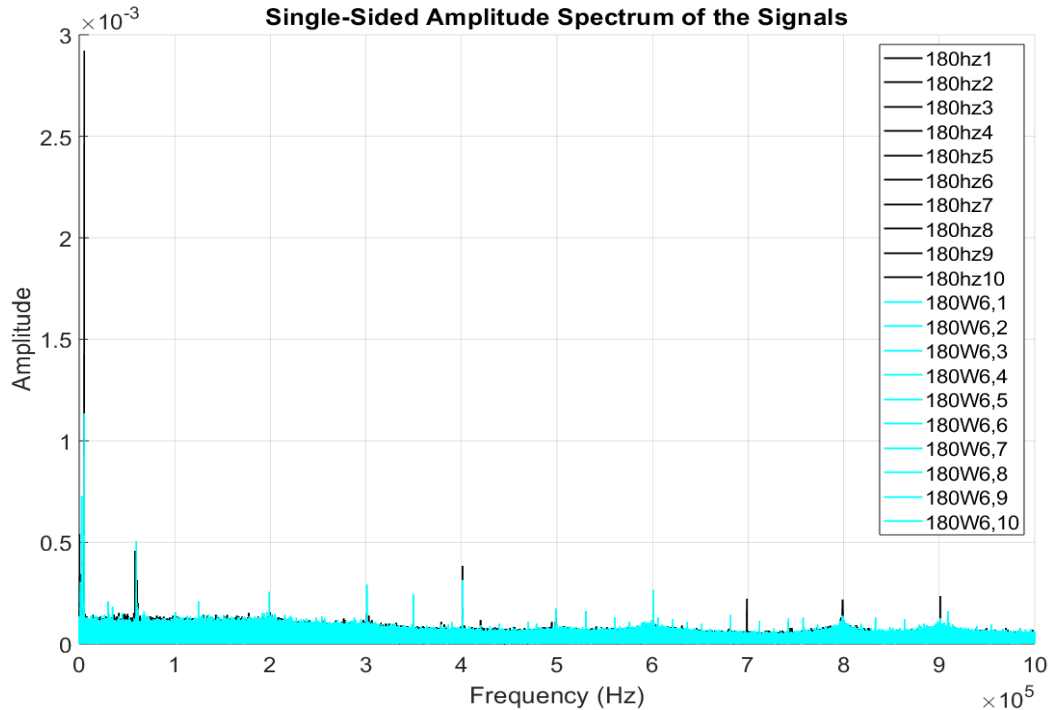
Πίνακας 4.3.4: P-values για το εύρος συχνοτήτων (2670-2715) Hz ανά τεστ.

Second Peak Frequency Variation between SWEEPSIMPLE and SWEEPWEIGHT4



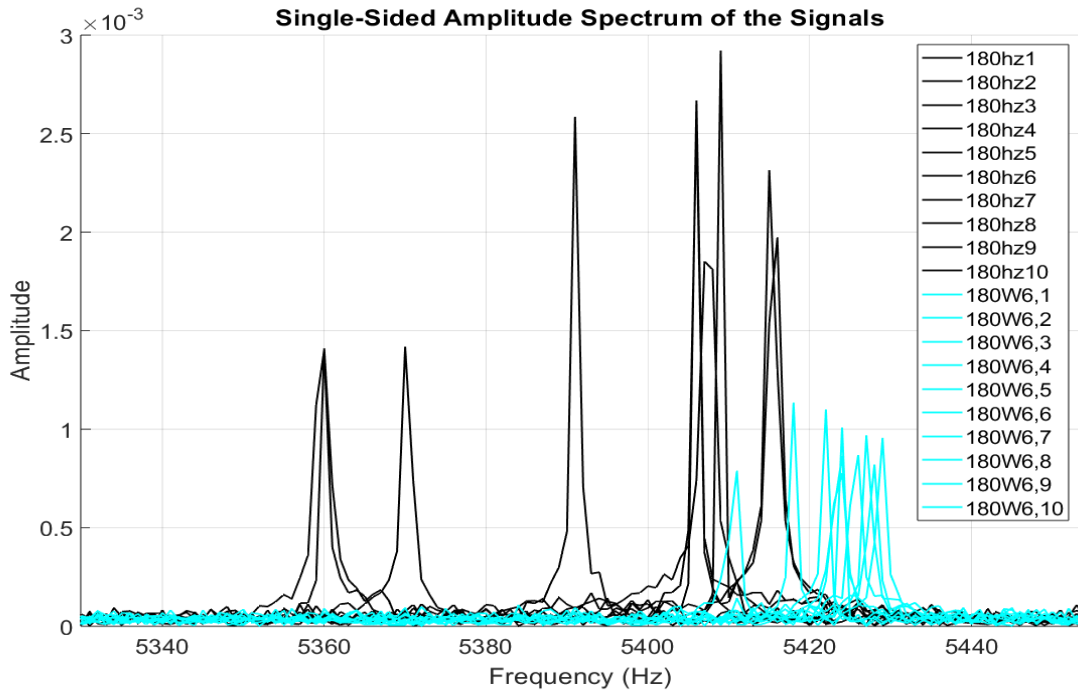
Test: (2670-2715) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση SWEEPW4	SWEEP S	SWEEP S
Αληθής υπόθεση	$1.888e^{-05}$	0.00015174
	H_1	H_1

Σχήμα 4.3.11: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης στα 180 Hz για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 6 cm από το φιλμ(πετρολ χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης των 180 Hz χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα).

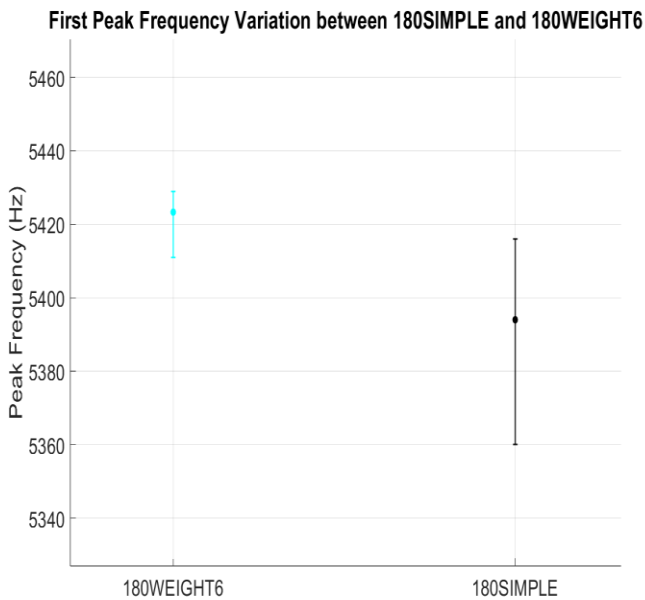


Όπως φαίνεται στο σχήμα (4.3.12), όταν το φορτίο απομακρύνεται σε απόσταση 6 cm από το φιλμ, οι κορυφές που οφείλονται στο σήμα διέγερσης των 180 Hz συνεχίζουν να επικαλύπτονται μεταξύ τους. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι κορυφές που οφείλονται στην τοποθέτηση του φορτίου έχουν μετακινηθεί δεξιότερα σε σχέση με τις κορυφές της περίπτωσης των 4 cm, όπως φαίνεται στα σχήματα (4.3.12) και (4.3.13). Επιπλέον, τα διαστήματα εύρους συχνοτήτων είναι στατιστικά διακριτά, σύμφωνα με τον πίνακα (4.3.5). Όσο απομακρύνεται το φορτίο από το φιλμ, τόσο πιο δύσκολο γίνεται για το αισθητήριο να ανιχνεύσει τα φορτία, λόγω της μειωμένης ευαισθησίας του. Το ίδιο παρατηρείται και στην περιοχή των 2670-2720 Hz όπως φαίνεται στα σχήματα (4.3.14), (4.3.15).

Σχήμα 4.3.12: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz.

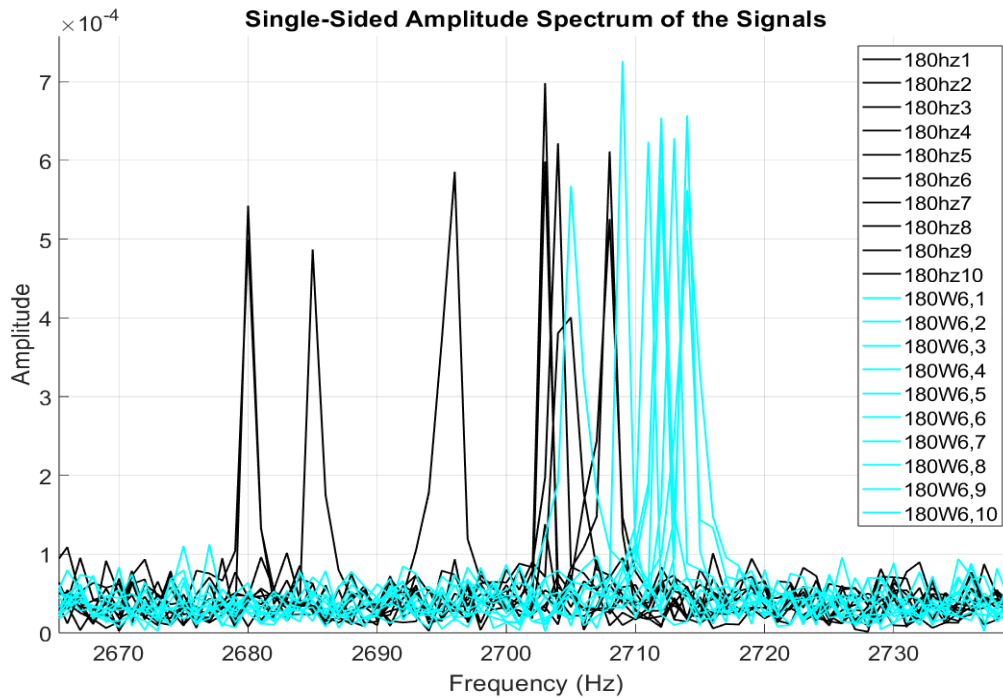


Σχήμα 4.3.13: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής. Πίνακας 4.3.5: P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440 Hz) ανά τεστ



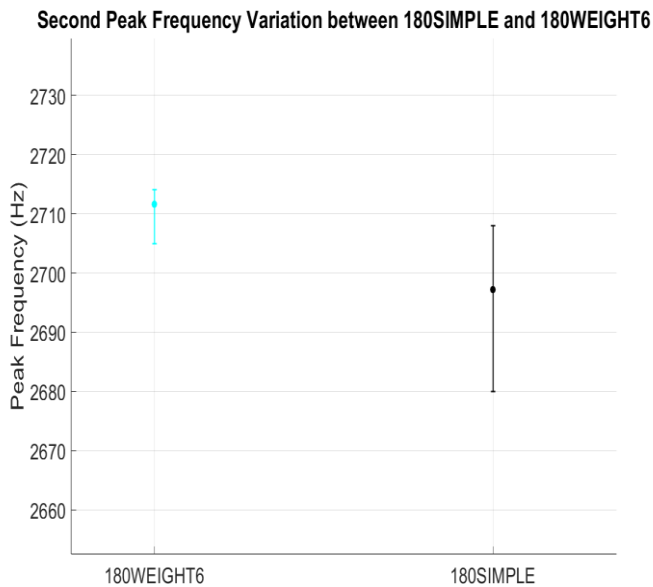
Test: (5300-5440 Hz)	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση 180W6	180S	180S
	0.00017012	0.00027618
Αληθής υπόθεση	H ₁	H ₁

Σχήμα 4.3.14: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2670-2720) Hz.



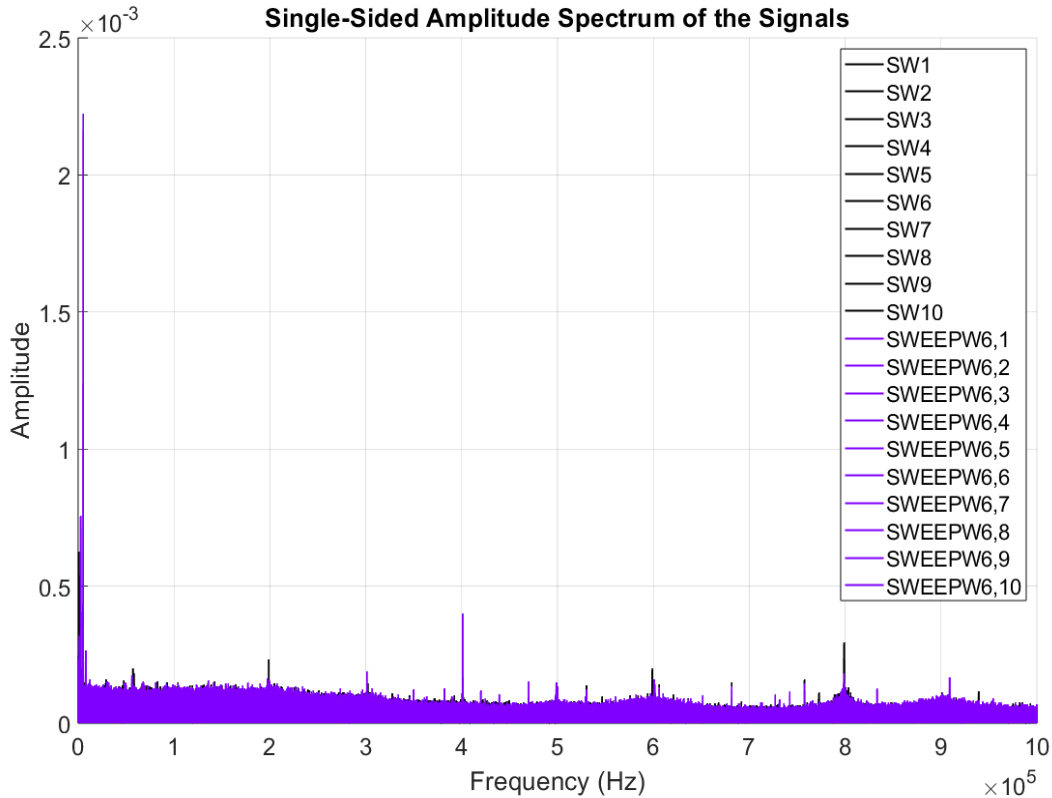
Σχήμα 4.3.15: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.

Πίνακας 4.3.6: P-values για το εύρος συχνοτήτων (2670-2720) Hz ανά τεστ.



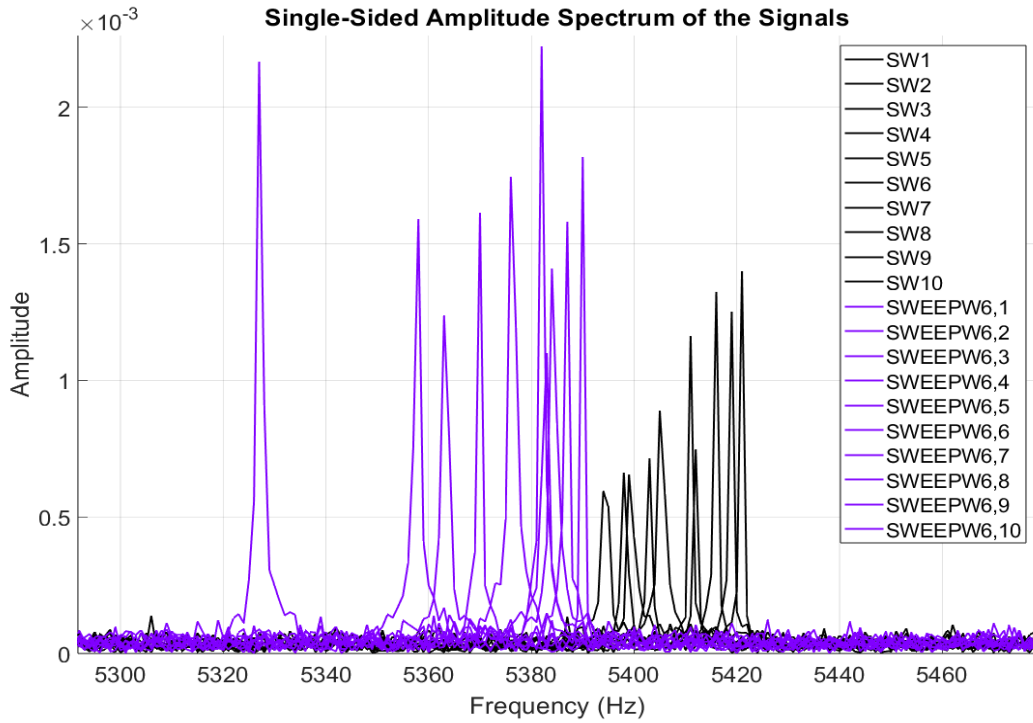
Test: (2670-2720) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση 180W6	180S	180S
Αληθής υπόθεση	0.00017012	0.00030979
	H ₁	H ₁

Σχήμα 4.3.16: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης SWEEP για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 6 cm από το φιλμ(μωβ χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης SWEEP χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα).



Καθώς απομακρύνεται το φορτίο από το φιλμ παρατηρείται πως οι κορυφές του σήματος διέγερσης SWEEP που οφείλονται στην τοποθέτηση του φορτίου μετατοπίζονται δεξιότερα σε σχέση με εκείνες της προηγούμενης θέσης του φορτίου. Αυτό είναι εμφανές στα διαγράμματα (4.3.17), (4.3.18) για την πρώτη περιοχή συχνοτήτων αλλά και για την δεύτερη περιοχή στα σχήματα (4.3.19), (4.3.20). Ωστόσο οι κορυφές δεν επικαλύπτονται με τις αντίστοιχες που οφείλονται στην περίπτωση χωρίς το φορτίο αλλά αυτήν την φορά δεν υπάρχει μεγάλο διάστημα μεταξύ τους, ώστε να είναι δυνατόν να ανιχνευθεί φορτίο μικρότερης μάζας. Σύμφωνα με τα στατιστικά τεστ στους πίνακες (4.3.7) και (4.3.8) απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και τα διαστήματα εύρους συχνοτήτων είναι μεταξύ τους διακριτά.

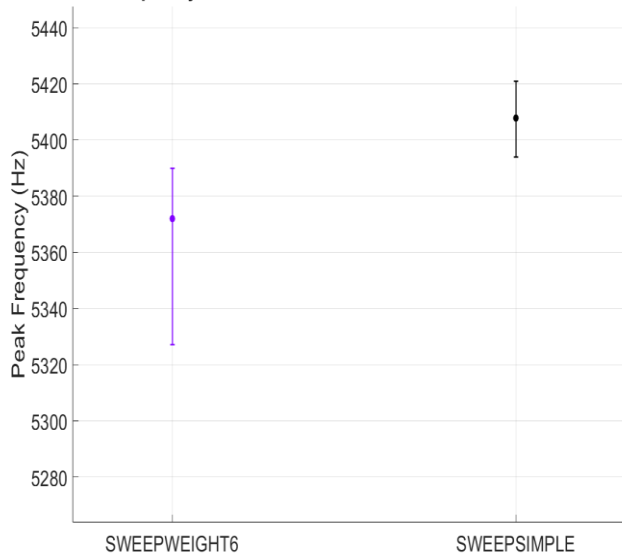
Σχήμα 4.3.17: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz



Σχήμα 4.3.18: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.

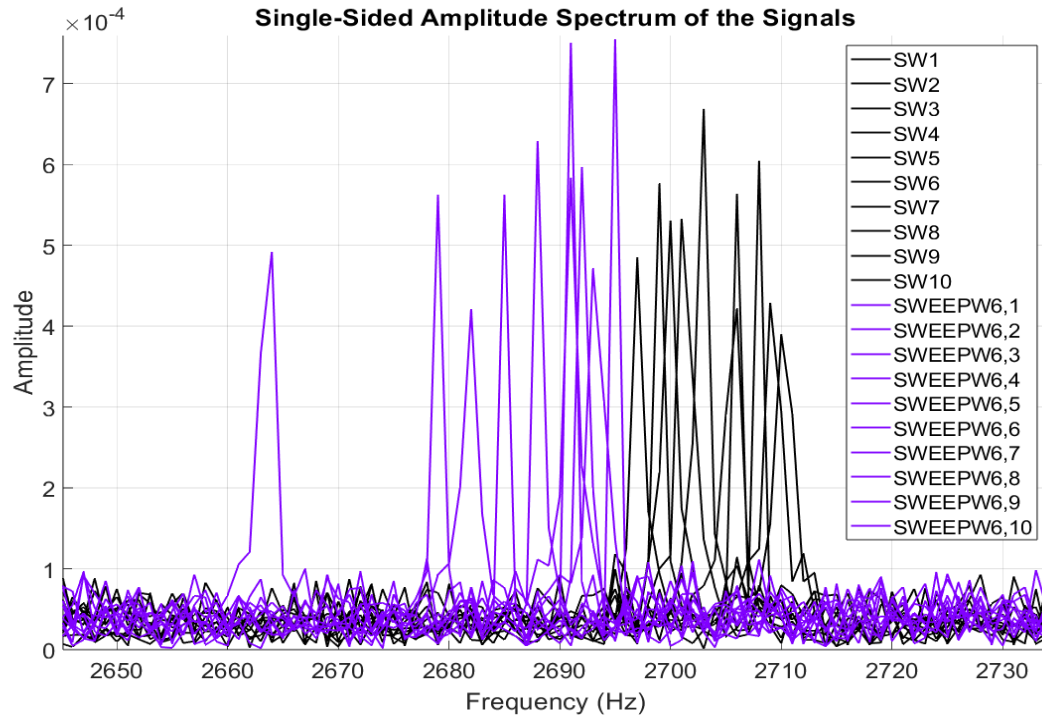
Πίνακας 4.3.7: P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440) Hz ανά τεστ.

First Peak Frequency Variation between SWEEPSIMPLE and SWEEPWEIGHT6



Test: (5300-5440) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση SWEEPW6	SWEEP S	SWEEP S
Αληθής υπόθεση	$1.888e^{-05}$	0.00015705
	H_1	H_1

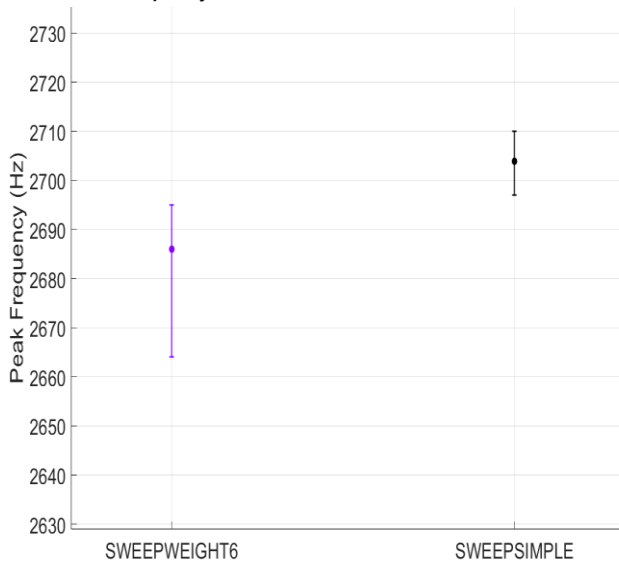
Σχήμα 4.3.19: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2660-2715) Hz.



Σχήμα 4.3.20: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.

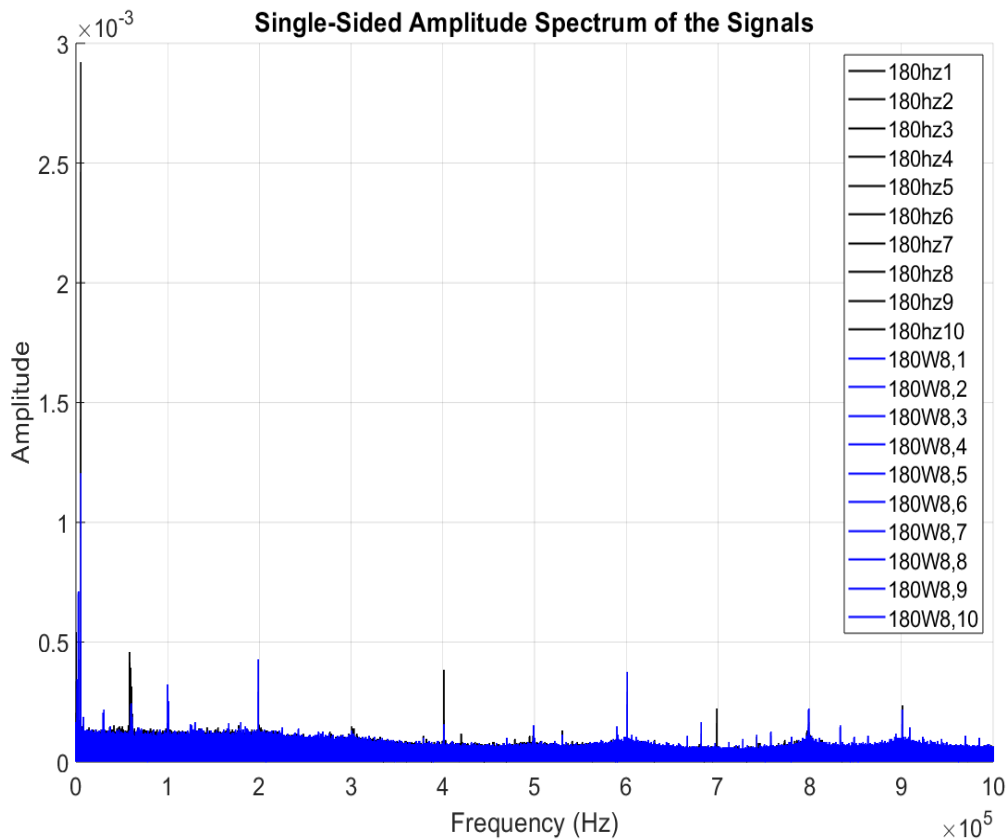
Πίνακας 4.3.8: P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2715) Hz ανά τεστ.

Second Peak Frequency Variation between SWEEPSIMPLE and SWEEPWEIGHT6



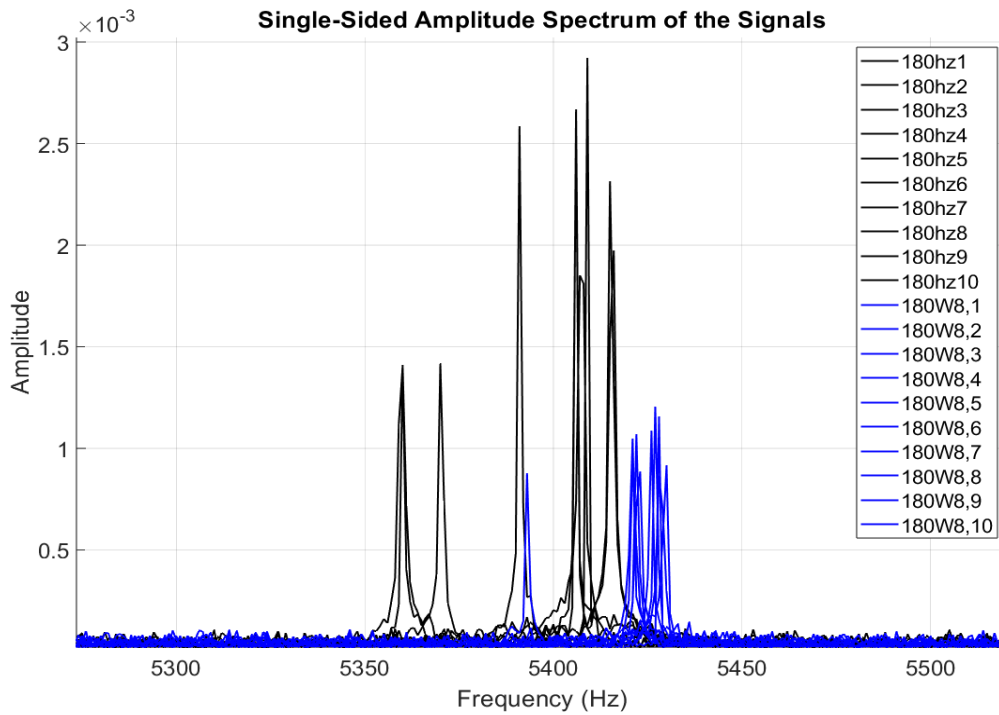
Test: (2660-2715) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση SWEEPW6	SWEEP S	SWEEP S
Αληθής υπόθεση	1.888e⁻⁰⁵	0.00015527
	H₁	H₁

Σχήμα 4.3.21: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης στα 180 Hz για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 8 cm από το φιλμ(μπλε χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης των 180 Hz χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα).



Παρατηρώντας τα σχήματα (4.3.22), (4.3.23) που αφορούν τις μετρήσεις για το σήμα διέγερσης 180 Hz με το φορτίο να είναι τοποθετημένο στα 8 cm μπορεί να διαπιστώσει κανείς ότι δεν υπάρχει κάποια μετατόπιση των κορυφών σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου το φορτίο ήταν σε απόσταση 6 cm από το φιλμ. Παρόλο που οι κορυφές που οφείλονται στο βάρος (μπλε χρώμα) επικαλύπτονται με εκείνες που οφείλονται στην περίπτωση χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα) τα στατιστικά τεστ δείχνουν να απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και έτσι δεν συμφωνούν με τα διαγράμματα. Αυτό φαίνεται στο πίνακα (4.3.9) όπου σύμφωνα με το Kolmogorov-Smirnov η τιμή P-value είναι ίδια με εκείνη στον πίνακα (4.3.5) που αφορά την περίπτωση για την ίδια περιοχή συχνοτήτων, αλλά με το φορτίο να είναι στα 6 cm απομακρυσμένο από το φιλμ. Ενώ κατά το Kruskal Wallis παρατηρείται ελάχιστη μεγαλύτερη τιμή P-value σε σχέση με την περίπτωση των 6 cm. Το ίδιο συμβαίνει και στην δεύτερη περιοχή συχνοτήτων όπως φαίνεται στα σχήματα (4.3.24), (4.3.25) και στον πίνακα (4.3.10).

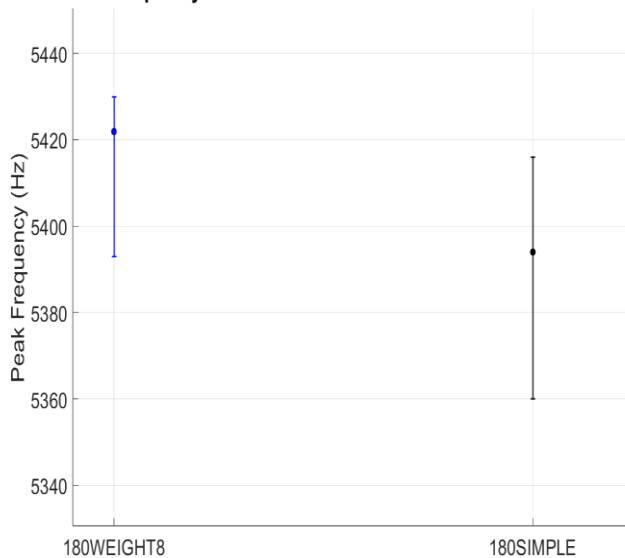
Σχήμα 4.3.22: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz



Σχήμα 4.3.23: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.

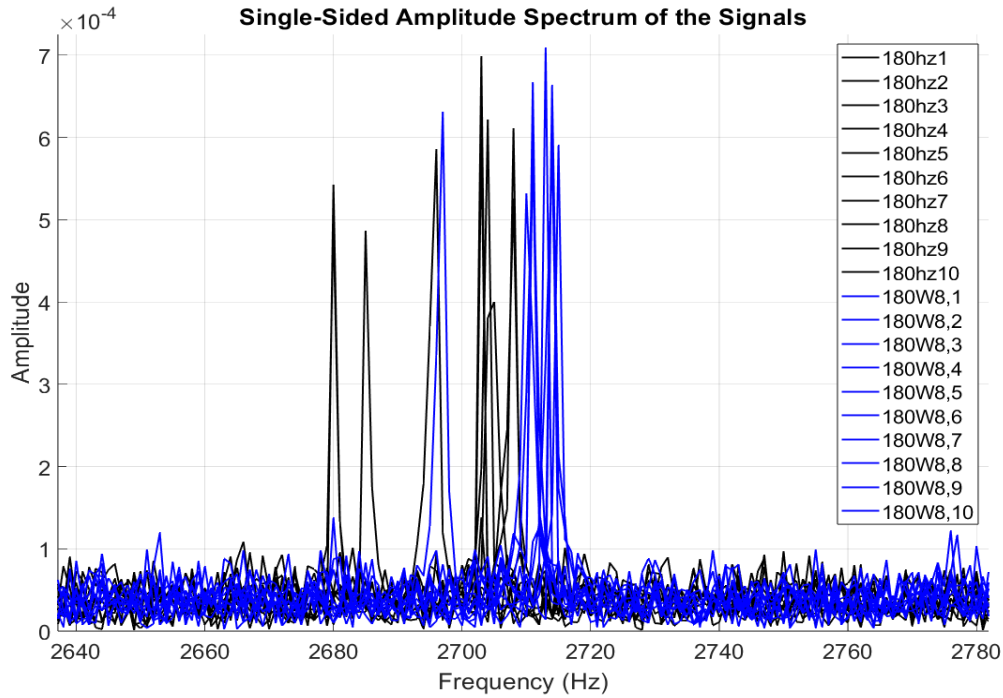
Πίνακας 4.3.9: P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440) Hz ανά τεστ.

First Peak Frequency Variation between 180SIMPLE and 180SWEEPWEIGHT8



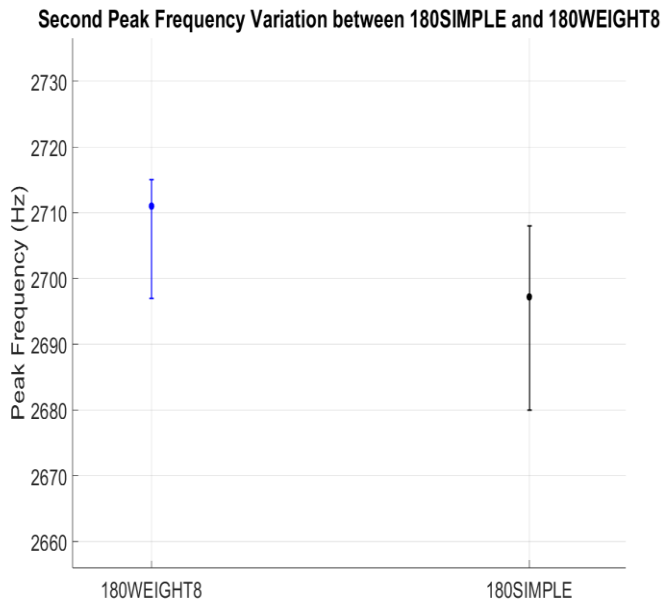
Test: (5300-5440) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση	180S	180S
180W8	0.00017012	0.00086503
Αληθής υπόθεση	H ₁	H ₁

Σχήμα 4.3.24: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2660-2720) Hz.



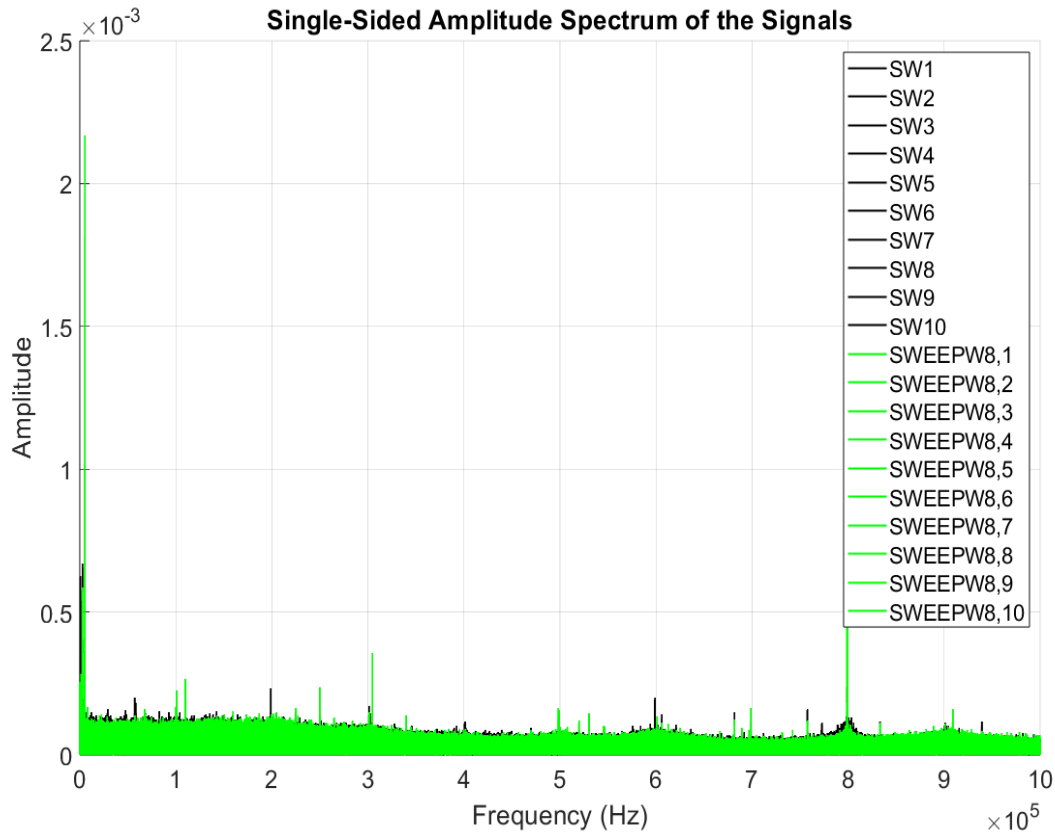
Σχήμα 4.3.25: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.

Πίνακας 4.3.10: P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2720) Hz ανά τεστ.



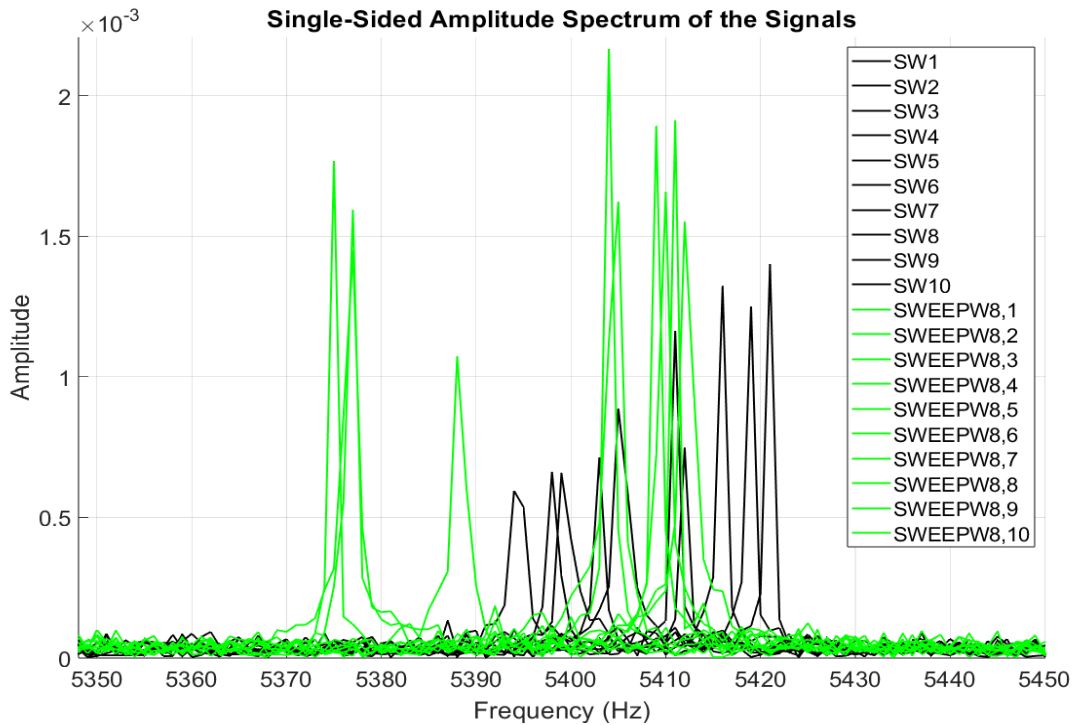
Test: (2660-2720) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση	180S	180S
180W8	0.00017012	0.000838
Αληθής υπόθεση	H ₁	H ₁

Σχήμα 4.3.26: Αναπαράσταση των FFT του σήματος διέγερσης SWEEP για τις δύο εξής περιπτώσεις: Προσθήκη βάρους σε απόσταση 8 cm από το φιλμ(πράσινο χρώμα) σε κοινό διάγραμμα με το σήμα διέγερσης SWEEP χωρίς το βάρος (μαύρο χρώμα).



Σύμφωνα με τα σχήματα (4.3.27), (4.3.28) που αφορούν την πρώτη εξεταζόμενη περιοχή συχνοτήτων, φαίνεται πως οι κορυφές του σήματος διέγερσης SWEEP έχουν μετατοπιστεί δεξιότερα σε σχέση με τις προηγούμενες θέσεις των φορτίων. Στον πίνακα (4.3.11) παρατηρείται πως τα στατιστικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα διαγράμματα, καθώς οι κορυφές που οφείλονται στην τοποθέτηση του φορτίου στην θέση 8 cm (πράσινο χρώμα) επικαλύπτονται με εκείνες που οφείλονται στην μη τοποθέτηση φορτίου (μαύρο χρώμα). Αυτό όμως δεν συμβαίνει για την περίπτωση των 180 Hz γεγονός που προκαλεί ερωτήματα. Το ίδιο παρατηρείται και στις περιοχές των 2660-2720 Hz στα σχήματα (4.3.29), (4.3.30) όπου σύμφωνα με τα στατιστικά αποτελέσματα τα διαστήματα εύρους συχνοτήτων είναι αδιάκριτα.

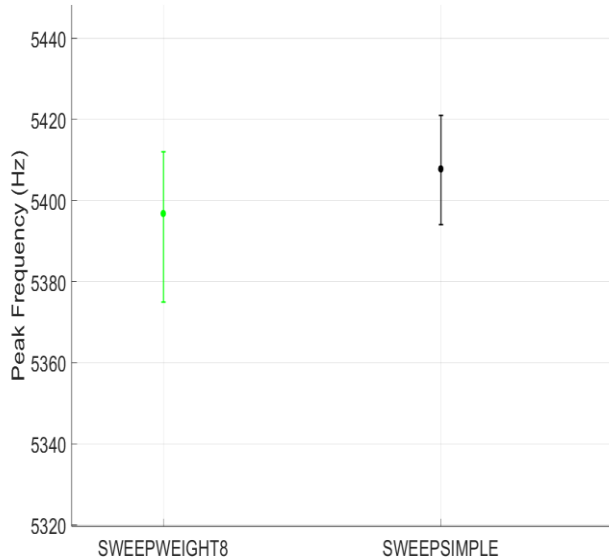
Σχήμα 4.3.27: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz



Σχήμα 4.3.28: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής.

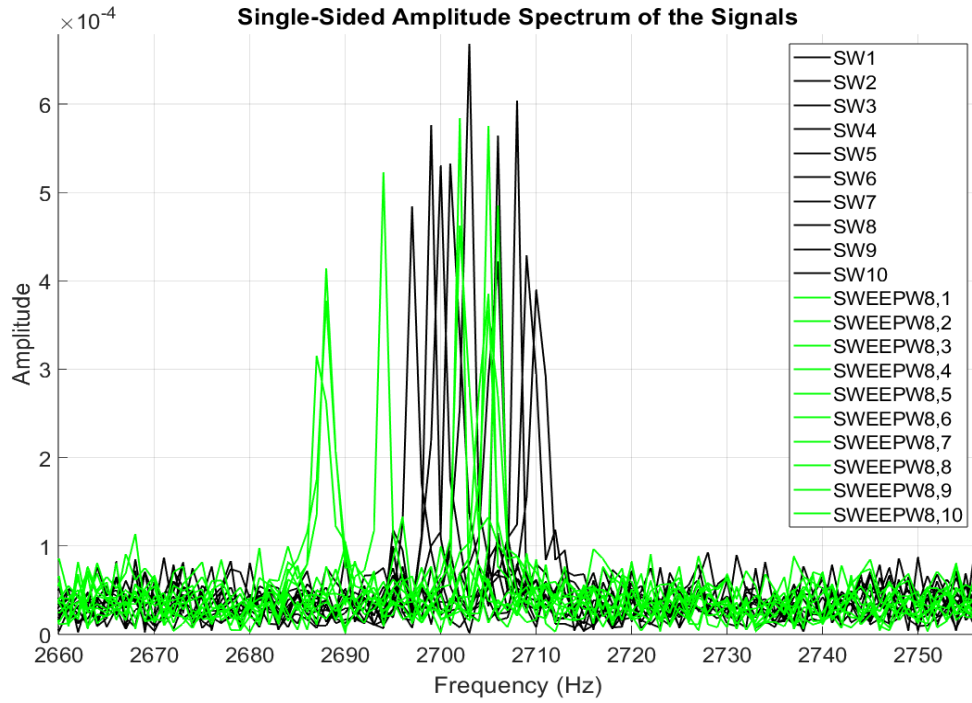
Πίνακας 4.3.11: P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440) Hz ανά τεστ.

First Peak Frequency Variation between SWEEPSIMPLE and SWEEPWEIGHT8



Test: (5300-5440) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση	SWEEP S	SWEEP S
SWEEPW8	0.31285	0.13987
Αληθής υπόθεση	H ₀	H ₀

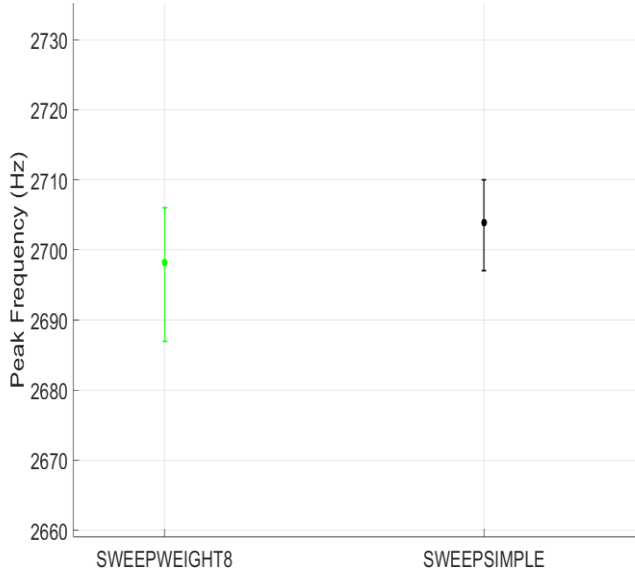
Σχήμα 4.3.29: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής (2660-2720) Hz.



Σχήμα 4.3.30: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής.

Πίνακας 4.3.12: P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2720) Hz ανά τεστ.

Second Peak Frequency Variation between SWEEPSIMPLE and SWEEPWEIGHT8



Test: (2660-2720) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση SWEEPW8	0.31285	0.11106
Αληθής υπόθεση	H ₀	H ₀

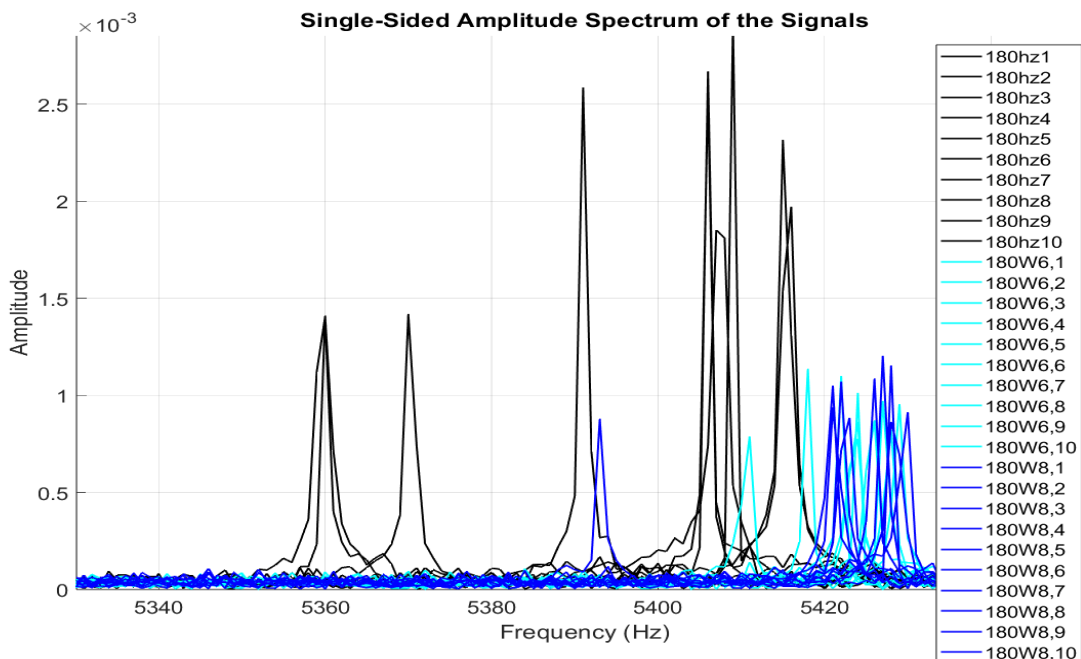
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Μελετώντας την περίπτωση του σήματος διέγερσης τύπου SWEEP προκύπτει ότι στην θέση των 4 cm παρατηρείται σημαντική διαφορά στα διαστήματα εύρους κορυφών (4.3.7), (4.3.9) και στις δύο εξεταζόμενες περιοχές, γεγονός που υποδηλώνει τη δυνατότητα ανίχνευσης ακόμα μικρότερων φορτίων σε αυτή την θέση. Ωστόσο καθώς το φορτίο βρίσκεται πιο κοντά στον κινητήρα διέγερσης μειώνεται και η ευαισθησία του αισθητηρίου. Έτσι στην θέση των 6 cm παρατηρείται πως τα διαστήματα δεν επικαλύπτονται αλλά βρίσκονται κοντά το ένα με το άλλο. Όπως φαίνεται στα σχήματα (4.3.17), (4.3.19) για την θέση 6 cm δεν θα μπορούσε να ανιχνευθεί μικρότερο βάρος διότι τα διαστήματα θα είχαν επικαλυφθεί. Στην περίπτωση της θέσης των 8 cm μπορεί να συμπεράνει κανείς από τα σχήματα (4.3.27), (4.3.29) πως τα διαστήματα εύρους κορυφών επικαλύπτονται αρκετά και δεν είναι στατιστικά διακριτά.

Στην περίπτωση του σήματος διέγερσης 180 Hz τα αποτελέσματα διαφέρουν σε σχέση με τα αναμενόμενα του σήματος διέγερσης τύπου SWEEP. Στην θέση των 4 cm όπως φαίνεται και στα διαγράμματα (4.3.2), (4.3.4) τα διαστήματα επικαλύπτονται μερικώς αλλά είναι στατιστικά διακριτά. Στην συνέχεια διαπιστώνεται πως για τις θέσεις των 6 και 8 cm οι κορυφές που αφορούν τις μετρήσεις με τα φορτία στις αντίστοιχες θέσεις έχουν μετατοπιστεί δεξιότερα από ότι αναμενόταν. Το γεγονός αυτό συμβαίνει και για τις δύο εξεταζόμενες περιοχές και στο παρακάτω σχήμα (4.3.31) φαίνεται το πόσο όμοια είναι τα διαστήματα εύρους κορυφών της πρώτης ζώνης συχνοτήτων μεταξύ των δύο θέσεων (πετρολ – μπλε χρώμα).

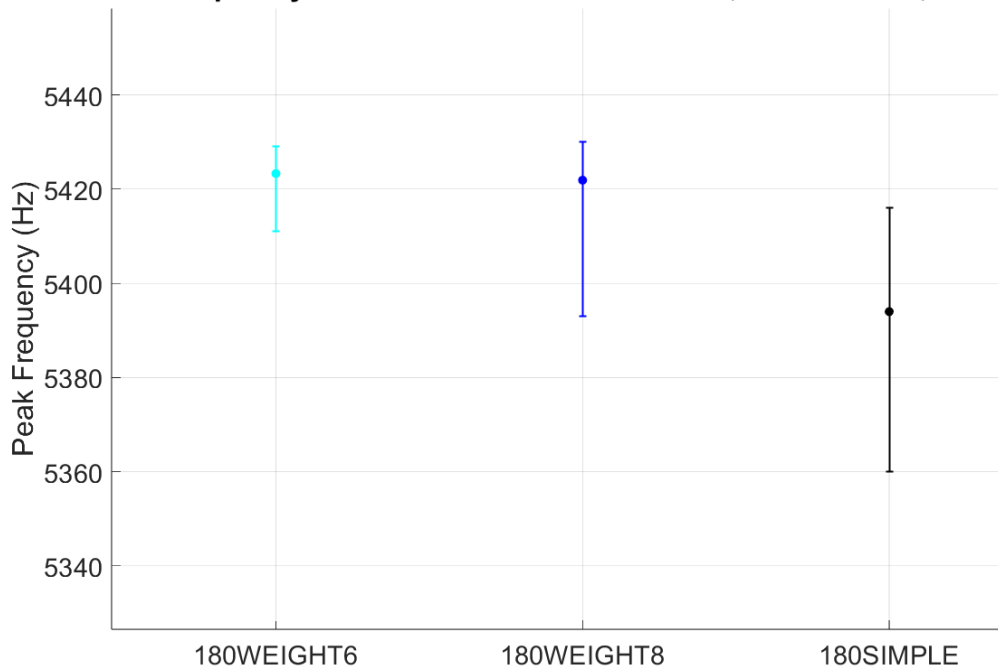
Σχήμα 4.3.31: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (5300-5440) Hz για τις θέσεις των 6 και 8 cm σε κοινό διάγραμμα.



Στο παρακάτω σχήμα (4.3.32) αναπαρίσταται το διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για τις περιπτώσεις των 6 και 8 cm. Όπως φαίνεται οι μέσοι όροι των δύο περιπτώσεων σχεδόν συμπίπτουν, γεγονός που υποδηλώνει πως τα διαστήματα δεν είναι διακριτά μεταξύ τους παρόλο που φαίνεται ότι διαφέρουν λίγο οπτικά. Αυτό φαίνεται και στατιστικά στον πίνακα (4.3.13) παρακάτω. Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι, παρόλο που οι θέσεις διαφέρουν κατά 2 cm, η ευαισθησία του αισθητηρίου παραμένει αμετάβλητη και στις δύο θέσεις. Αυτό δεν παρατηρείται στην περίπτωση του σήματος διέγερσης του Sweep. Η εξήγηση μπορεί να οφείλεται στην υψηλή ισχύ του σήματος διέγερσης των 180 Hz, όπου οι μικρές αλλαγές στη θέση του φορτίου μετά τα 4 cm δεν αλλάζουν σημαντικά την απόκριση της δοκού και έτσι οι διαφορές αυτές «καλύπτονται» από το ισχυρό σήμα. Το ίδιο συμβαίνει και στην δεύτερη υψηλότερη κορυφή όπως φαίνεται στα διαγράμματα (4.3.33), (4.3.34) και στον πίνακα (4.3.14).

Σχήμα 4.3.32: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής για τις θέσεις των 6 και 8 cm σε κοινό διάγραμμα.

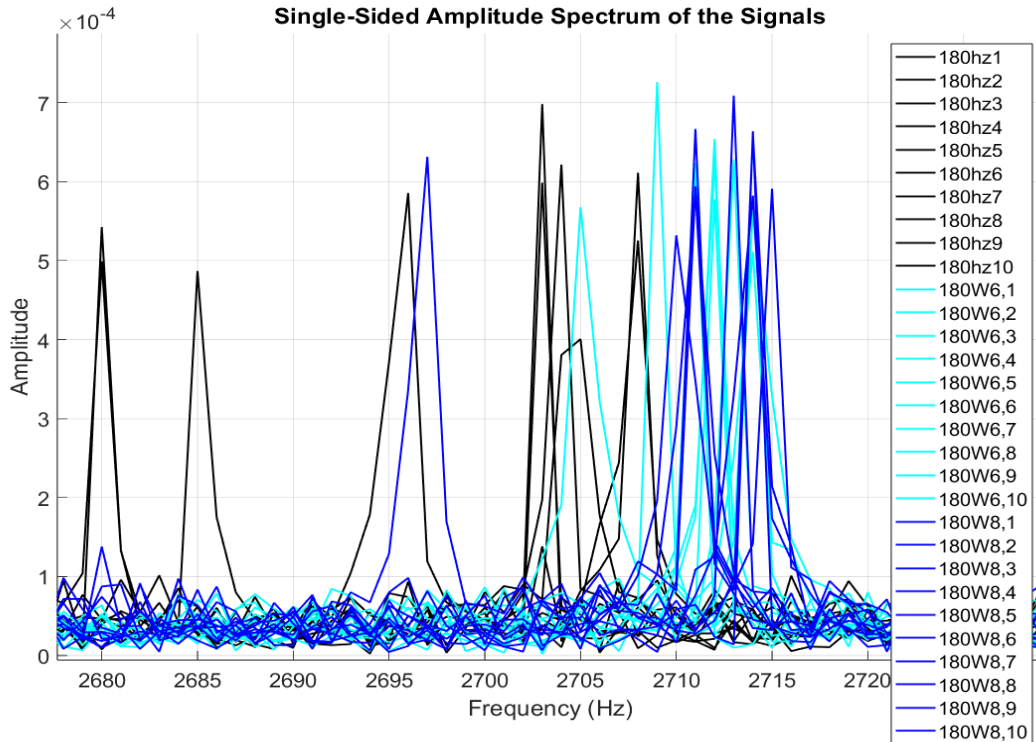
First Peak Frequency Variation between 180SIMPLE,180WEIGHT6,180WEIGHT8



Πίνακας 4.3.13: P-values για το εύρος συχνοτήτων (5300-5440) Hz ανά τεστ.

Test: (5300-5440) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση	180W6	180W6
180W8	0.97479	0.96971
Αληθής υπόθεση	H ₀	H ₀

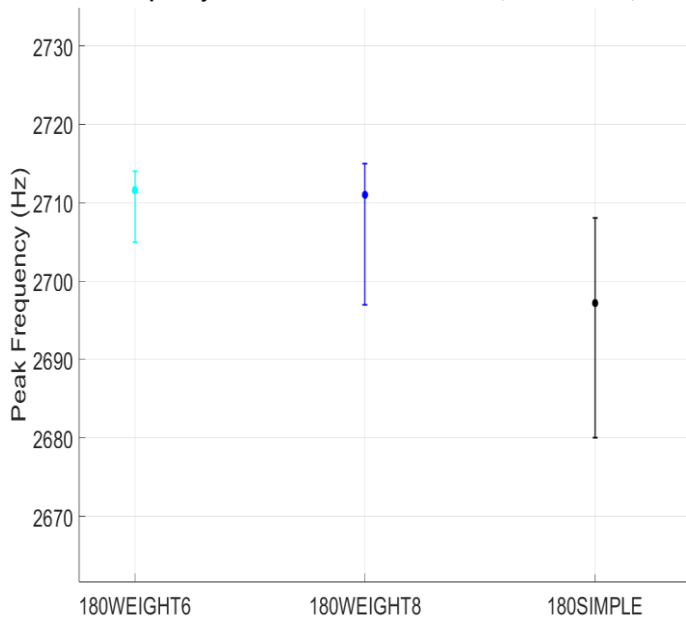
Σχήμα 4.3.33: Αναπαράσταση των FFT στο εύρος συχνοτήτων της υψηλότερης κορυφής (2660-2720) Hz για τις θέσεις των 6 και 8 cm σε κοινό διάγραμμα.



Σχήμα 4.3.34: Διάγραμμα μεταβολής εύρους κορυφών για την περίπτωση του εύρους συχνοτήτων της δεύτερης υψηλότερης κορυφής για τις θέσεις των 6 και 8 cm σε κοινό διάγραμμα.

Πίνακας 4.3.14: P-values για το εύρος συχνοτήτων (2660-2720) Hz ανά τεστ.

First Peak Frequency Variation between 180SIMPLE, 180WEIGHT6, 180WEIGHT8



Test: (2660-2720) Hz	Kolmogorov Smirnov	Kruskal Wallis
Διέγερση	180W6	180W6
180W8	0.97479	0.90798
Αληθής υπόθεση	H₀	H₀

5.2 Μελλοντικές προτάσεις και προκλήσεις

Κατά τη διάρκεια της μελέτης, παρατηρήθηκε ότι ο θόρυβος συνεχίζει να αποτελεί πρόκληση, επηρεάζοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τα σφάλματα που προκύπτουν δεν προέρχονται μόνο από τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, αλλά και από τα ηλεκτρικά κυκλώματα που δημιουργήθηκαν για κάθε προφίλ διέγερσης. Το Arduino που χρησιμοποιήθηκε ως παλμογεννήτρια στην παρούσα μελέτη αποτελεί μια λύση χαμηλού κόστους, η οποία ωστόσο συνοδεύεται από ορισμένους περιορισμούς σε ό,τι αφορά την αξιοπιστία και την ακρίβεια. Δεδομένου ότι το Arduino δεν έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας στη δημιουργία σημάτων διέγερσης, η απόδοσή του υπολείπεται συγκριτικά με εξειδικευμένους μηχανικούς διεγέρτες, παλμογεννήτριες και άλλους μικροελεγχτές που παρέχουν μεγαλύτερη σταθερότητα και ακρίβεια στη διαμόρφωση παλμών. Ως αποτέλεσμα, τα σήματα που παράγονται από το Arduino μπορεί να περιέχουν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις ή αποκλίσεις, κάτι που επιδρά αρνητικά στη συνολική αξιοπιστία των πειραματικών μετρήσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πειράματα που έγιναν σε διαφορετικές ημέρες έδωσαν διαφορετικά αποτελέσματα, πιθανότατα λόγω της μεταβολής του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, ο οποίος αλλάζει καθημερινά. Ο θόρυβος αυτός επηρεάζει τόσο το αισθητήριο όσο και τα ηλεκτρικά κυκλώματα, προκαλώντας αστάθεια στα δεδομένα. Αυτή η αστάθεια κάνει δύσκολη την επανάληψη των ίδιων αποτελεσμάτων, δείχνοντας ότι είναι απαραίτητο να απομονωθεί καλύτερα το σύστημα από εξωτερικές παρεμβολές ή να σταθεροποιηθούν οι συνθήκες του πειράματος για να λαμβάνονται πιο αξιόπιστα και σταθερά δεδομένα.

Ιδιαίτερη πρόκληση προέκυψε στο προφίλ διέγερσης στα 180 Hz, όπου η υψηλή ισχύς της διέγερσης καθιστά δυσκολότερη την ανίχνευση των φορτίων όταν αυτά βρίσκονται μετά τα 4 cm. Συγκεκριμένα, στα 6 και 8 cm η ανίχνευση φορτίων καθίσταται πολύ πιο αβέβαιη, υποδεικνύοντας ότι η ευαισθησία του αισθητηρίου μειώνεται σημαντικά καθώς το φορτίο απομακρύνεται όταν εφαρμόζεται υψηλή ισχύς από το σήμα διέγερσης των 180 Hz.

Το υλικό της δοκού που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν ένας ελαστικός πλαστικός χάρακας, ο οποίος, δεν αντικατοπτρίζει τα υλικά που συναντώνται σε πραγματικές κατασκευές, όπως κτίρια ή άλλες δομές. Δεδομένου ότι το υλικό αυτό είναι λεπτό και εύκαμπτο, δεν μπορεί να προσφέρει πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς του αισθητηρίου σε πιο σκληρά και άκαμπτα υλικά. Ως μελλοντική πρόταση, θα ήταν χρήσιμο να μελετηθεί η απόκριση του αισθητηρίου σε δοκούς κατασκευασμένες από άλλα είδη υλικών όπως, τα μεταλλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή κτιρίων. Η χρήση μεταλλικών δοκών μπορεί να προσφέρει πιο ρεαλιστική αποτύπωση της συμπεριφοράς του αισθητηρίου σε πραγματικές συνθήκες, βελτιώνοντας τη δυνατότητα διάγνωσης σφαλμάτων και ενισχύοντας τη χρησιμότητα του αισθητηρίου σε πρακτικές εφαρμογές.

Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία

- Davrados A, Sultana R, Dimogianopoulos D, Evaluating Contact-Less Sensing and Fault Diagnosis Characteristics in Vibrating Thin Cantilever Beams with a MetGlas® 2826MB Ribbon, *Vibration*, (2024, January 6), doi:<https://doi.org/10.3390/vibration7010002>
- Suvorov A, Bulanov N, Shvedova A, Statistical hypothesis testing: general approach in medical research, *Basic aspects of meta-analysis. Part 1*, (2022), doi:[10.47093/2218-7332.2023.14.1.4-14](https://doi.org/10.47093/2218-7332.2023.14.1.4-14)
- Dimitrova D, Kaishev V, Tan S Computing the Kolmogorov-Smirnov Distribution When the Underlying CDF is Purely Discrete, Mixed or Continuous, *Journal of Statistical Software*, (2020, October 7), doi:[10.18637/jss.v095.i10](https://doi.org/10.18637/jss.v095.i10)
- Dimogianopoulos D, Mouzakis D, *Nondestructive Contactless Monitoring of Damage in Joints between Composite Structural Components Incorporating Sensing Elements via 3D-Printing*, *Appl. Sciences*, (2021 A, April 3), <https://doi.org/10.3390/app11073230>
- Dimogianopoulos D, Mouzakis D, Versatile Interrogation-Free Magnetoelastic Resonator Design for Detecting Deterioration-Inducing Agents. *Proceedings of 1st International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment*, (2021 B, January). doi:https://doi.org/10.1007/978-981-15-9121-1_9
- Dimogianopoulos D, Sensors and Energy Harvesters Utilizing the Magnetoelastic Principle: Review of Characteristic Applications and Patents, *Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering*, (2012, January 12). doi:[10.2174/2213111611205020103](https://doi.org/10.2174/2213111611205020103)
- Dimogianopoulos D, Charitidis P, Mouzakis D, Inducing Damage Diagnosis Capabilities in Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites by Magnetoelastic Sensor Integration via 3D Printing, *Appl. Sciences*, (2020, February 4), doi:<https://doi.org/10.3390/app10031029>
- Orcan F, Parametric or Non-parametric: Skewness to Test Normality for Mean Comparison. *International Journal of Assessment Tools in Education*, *Open Journal of Statistics*, (2020, juni 13), doi:<https://doi.org/10.21449/ijate.656077>
- Jarmakowska-Kostrzanowska L, Statistical power of a test – an analysis of a test's power, its role in the research methodology and the interpretation of (non-)significance in a low- (high-) powered test, *Przegląd Psychologiczny*, (2021, December 30), doi:[10.31648/przegldpsychologiczny.7889](https://doi.org/10.31648/przegldpsychologiczny.7889)
- Weaver K, An Introduction to Statistical Analysis in Research With Applications in the Biological and Life Sciences, (2017, July 28), doi:[10.1002/9781119454205](https://doi.org/10.1002/9781119454205)

- Jayanathan P, Shrivankumar C, Torsional vibration characteristics of power transmission system, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (2018), doi:10.1088/1757-899X/402/1/012144
- Saiz P, Magnetoelastic Resonance Sensors: Principles, Applications, and Perspectives, *ACS Sensors 2022*, (2022, April 22) doi:https://doi.org/10.1021/acssensors.2c00032
- Sultana R, Dimogianopoulos D, Contact-Less Sensing and Fault Detection/Localization in Long Flexible Cantilever Beams via Magnetoelastic Film and AR model-based Methodology. *Recent Developments in Model-Based and Data-Driven Methods for Advanced Control and Diagnosis*, (2023, June 14), doi: 10.1007/978-3-031-27540-1_16
- Smith S, The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishings, (1997), Ανάκτηση από <https://www.dspguide.com>
- Bolen T, An Investigation of the Kolmogorov-Smirnov Two Sample Test using SAS®. *Computer Science, Mathematics*, (2014), Ανάκτηση από <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Investigation-of-the-Kolmogorov-Smirnov-Two-Test-Bolen-Mulugeta/9f2d1a355006a194bdcfd9dd3200b72fa73f7bab>
- Jiang Z, Park K, Hwang S, Design and Analysis of Novel Low-Cost Linear Vibration Motor for an Electronic Cigarette, *Modeling, Design and Control of Electric Machines*, (2020, December 14), doi: <https://doi.org/10.3390/app10248915>
- Βελώνη Α, Ψηφιακή επεξεργασία σήματος, Αθήνα: ΤΖΙΟΛΑ, (2018), Ανάκτηση από <https://www.tziola.gr/book/psifiaki-epexergasia-simatos/>
- Καλλιγεροπουλος Δ, *Συστήματα Αυτοματου Ελέγχου II*. Αθήνα: Συγχρονη εκδοτική, (2005)
- Κανδρής Δ, Βελώνη Α, *Συστήματα αυτόματου ελέγχου*, ΤΖΙΟΛΑ, (2017), Ανάκτηση από <https://www.tziola.gr/book/systimata-avtomatou-elegchou/>
- Καλοφωλιάς Δ, *Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή AVR ATmega328 με την χρήση της πλατφόρμας ARDUINO*. ΤΖΟΛΙΑ, (2017), Ανάκτηση από <https://www.tziola.gr/book/programmatismos-avr-atmega-328-arduino/>
- Καραϊσκος Χ, Κάντζος Δ, *ΣΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ*. Αθήνα: ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΔΟΤΙΚΗ, (2015), Ανάκτηση από <http://www.synekdot.gr/product/978-960-6674-99-0/>
- Μπουτσίκας Μ, *ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ*, (2020), Ανάκτηση από [https://oldsite.unipi.gr/faculty/mbouts/Boutsikas\(2020\)Time_Series.pdf](https://oldsite.unipi.gr/faculty/mbouts/Boutsikas(2020)Time_Series.pdf)

Κεφάλαιο 7: Παραρτήματα και κώδικες

7.1 Κώδικας στο ARDUINO

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας από το περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού του ARDUINO για κάθε προφίλ διέγερσης.

```
TRIANGULAR_delay30hz.ino
1 int Vc; // Declare an integer variable Vc to store the analog reading from the sensor connected to pin A1.
2 void setup() {
3     pinMode(13, OUTPUT); // Set pin 13 as an output pin. This pin will be used for digital output (HIGH or LOW).
4     pinMode(A1, INPUT); // Set pin A1 as an input pin. This pin will be used to read analog input values.
5     Serial.begin(9600); // Initialize the serial communication at a baud rate of 9600 bits per second for data transmission.
6
7 }
8 void loop() {
9     Vc = analogRead(A1); // Read the analog value from pin A1 and store it in the variable Vc.
10    // 30Hz
11    digitalWrite(13, HIGH); // Set pin 13 to HIGH, turning on the digital output
12    delay(16); // Wait for 16 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
13    delayMicroseconds(500); // Wait for 500 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
14    digitalWrite(13, LOW); // Set pin 13 to LOW, turning off the digital output.
15    delay(16); // Wait for 16 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
16    delayMicroseconds(500); // Wait for 500 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
17    Serial.println(Vc); // Send the value of Vc (the analog reading) to the serial monitor for debugging or analysis.
18 }
```

```
TRIANGULAR_delay60hz.ino
1 int Vc; // Declare an integer variable Vc to store the analog reading from the sensor connected to pin A1.
2 void setup() {
3     pinMode(12, OUTPUT); // Set pin 12 as an output pin. This pin will be used for digital output (HIGH or LOW).
4     pinMode(A1, INPUT); // Set pin A1 as an input pin. This pin will be used to read analog input values.
5     Serial.begin(9600); // Initialize the serial communication at a baud rate of 9600 bits per second for data transmission.
6
7 }
8 void loop() {
9     Vc = analogRead(A1); // Read the analog value from pin A1 and store it in the variable Vc.
10    digitalWrite(12, HIGH); // Set pin 12 to HIGH, turning on the digital output.
11    delay(8); // Wait for 8 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
12    delayMicroseconds(200); // Wait for 200 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
13    digitalWrite(12, LOW); // Set pin 12 to LOW, turning off the digital output.
14    delay(8); // Wait for 8 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
15    delayMicroseconds(200); // Wait for 200 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
16    Serial.println(Vc); // Send the value of Vc (the analog reading) to the serial monitor for debugging or analysis.
17 }
```

TRIANGULAR_delay90hz.ino

```
1 int Vc; // Declare an integer variable Vc to store the analog reading from the sensor connected to pin A1.
2 void setup() {
3   pinMode(11, OUTPUT); // Set pin 11 as an output pin. This pin will be used for digital output (HIGH or LOW).
4   pinMode(A1, INPUT); // Set pin A1 as an input pin. This pin will be used to read analog input values.
5   Serial.begin(9600); // Initialize the serial communication at a baud rate of 9600 bits per second for data transmission.
6
7 }
8 void loop() {
9   Vc = analogRead(A1); // Read the analog value from pin A1 and store it in the variable Vc.
10  digitalWrite(11, HIGH); // Set pin 11 to HIGH, turning on the digital output.
11  delay(5); // Wait for 5 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
12  delayMicroseconds(400); // Wait for 400 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
13  digitalWrite(11, LOW); // Set pin 11 to LOW, turning off the digital output.
14  delay(5); // Wait for 5 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
15  delayMicroseconds(400); // Wait for 400 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
16  Serial.println(Vc); // Send the value of Vc (the analog reading) to the serial monitor for debugging or analysis.
17 }
```

TRIANGULAR_delay120hz.ino

```
1 int Vc; // Declare an integer variable Vc to store the analog reading from the sensor connected to pin A1.
2 void setup() {
3   pinMode(10, OUTPUT); // Set pin 10 as an output pin. This pin will be used for digital output (HIGH or LOW).
4   pinMode(A1, INPUT); // Set pin A1 as an input pin. This pin will be used to read analog input values.
5   Serial.begin(9600); // Initialize the serial communication at a baud rate of 9600 bits per second for data transmission.
6
7 }
8 void loop() {
9   Vc = analogRead(A1); // Read the analog value from pin A1 and store it in the variable Vc.
10  digitalWrite(10, HIGH); // Set pin 10 to HIGH, turning on the digital output
11  delay(4); // Wait for 4 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
12  //delayMicroseconds(200);
13  digitalWrite(10, LOW); // Set pin 10 to LOW, turning off the digital output.
14  delay(4); // Wait for another 4 milliseconds. This delay controls how long the pin stays LOW.
15  //delayMicroseconds(200);
16  Serial.println(Vc); // Send the value of Vc (the analog reading) to the serial monitor for debugging or analysis.
17 }
```

TRIANGULAR_delay150hz.ino

```
1 int Vc;// Declare an integer variable Vc to store the analog reading from the sensor connected to pin A1.
2 void setup() {
3   pinMode(9, OUTPUT);// Set pin 9 as an output pin. This pin will be used for digital output (HIGH or LOW).
4   pinMode(A1, INPUT);//Set pin A1 as an input pin. This pin will be used to read analog input values.
5   Serial.begin(9600);// Initialize the serial communication at a baud rate of 9600 bits per second for data transmission.
6
7 }
8 void loop() {
9   Vc = analogRead(A1);// Read the analog value from pin A1 and store it in the variable Vc.
10  digitalWrite(9,HIGH);// Set pin 9 to HIGH, turning on the digital output.
11  delay(3);// Wait for 3 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
12  delayMicroseconds(200);// Wait for 200 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
13  digitalWrite(9,LOW);// Set pin 9 to LOW, turning off the digital output.
14  delay(3);//Wait for 3 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
15  delayMicroseconds(200);// Wait for 200 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
16  Serial.println(Vc);// Send the value of Vc (the analog reading) to the serial monitor for debugging or analysis.
17 }
```

TRIANGULAR_delay180hz.ino

```
1 int Vc;// Declare an integer variable Vc to store the analog reading from the sensor connected to pin A1.
2 void setup() {
3   pinMode(8, OUTPUT);// Set pin 8 as an output pin. This pin will be used for digital output (HIGH or LOW).
4   pinMode(A1, INPUT);//Set pin A1 as an input pin. This pin will be used to read analog input values.
5   Serial.begin(9600);// Initialize the serial communication at a baud rate of 9600 bits per second for data transmission.
6
7 }
8 void loop() {
9   Vc = analogRead(A1);// Read the analog value from pin A1 and store it in the variable Vc.
10  digitalWrite(8,HIGH);// Set pin 8 to HIGH, turning on the digital output.
11  delay(2);// Wait for 2 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
12  delayMicroseconds(625);// Wait for 625 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
13  digitalWrite(8,LOW);// Set pin 8 to LOW, turning off the digital output.
14  delay(2);//Wait for 2 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
15  delayMicroseconds(625);// Wait for 625 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
16  Serial.println(Vc);// Send the value of Vc (the analog reading) to the serial monitor for debugging or analysis.
17 }
```

SWEEP_Rectangular_delayino.ino

```
1 int Vc; // Declare an integer variable Vc to store the analog reading from the sensor connected to pin A1.
2 void setup() {
3   pinMode(7, OUTPUT); // Set pin 7 as an output pin. This pin will be used for digital output (HIGH or LOW).
4   pinMode(A1, INPUT); // Set pin A1 as an input pin. This pin will be used to read analog input values.
5   Serial.begin(9600); // Initialize the serial communication at a baud rate of 9600 bits per second for data transmission.
6
7 }
8 void loop() {
9   Vc = analogRead(A1); // Read the analog value from pin A1 and store it in the variable Vc.
10  // 30Hz
11  digitalWrite(7, HIGH); // Set pin 7 to HIGH, turning on the digital output.
12  delay(16); // Wait for 16 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
13  delayMicroseconds(500); // Wait for 500 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
14  digitalWrite(7, LOW); // Set pin 7 to LOW, turning off the digital output.
15  delay(16); // Wait for 16 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
16  delayMicroseconds(500); // Wait for 500 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
17  // 60Hz
18  digitalWrite(7, HIGH); // Set pin 7 to HIGH, turning on the digital output.
19  delay(8); // Wait for 8 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
20  delayMicroseconds(200); // Wait for 200 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
21  digitalWrite(7, LOW); // Set pin 7 to LOW, turning off the digital output.
22  delay(8); // Wait for 8 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
23  delayMicroseconds(200); // Wait for 200 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
24  // 90Hz
25  digitalWrite(7, HIGH); // Set pin 7 to HIGH, turning on the digital output.
26  delay(5); // Wait for 5 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
27  delayMicroseconds(400); // Wait for 400 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
28  digitalWrite(7, LOW); // Set pin 7 to LOW, turning off the digital output.
29  delay(5); // Wait for 5 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
30  delayMicroseconds(400); // Wait for 400 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
31  // 120Hz
32  digitalWrite(7, HIGH); // Set pin 7 to HIGH, turning on the digital output.
33  delay(4); // Wait for 4 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
34  digitalWrite(7, LOW); // Set pin 7 to LOW, turning off the digital output.
35  delay(4); // Wait for 4 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
36  // 150Hz
37  digitalWrite(7, HIGH); // Set pin 7 to HIGH, turning on the digital output.
38  delay(3); // Wait for 3 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
39  delayMicroseconds(200); // Wait for 200 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
40  digitalWrite(7, LOW); // Set pin 7 to LOW, turning off the digital output.
41  delay(3); // Wait for 3 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
42  delayMicroseconds(200); // Wait for 200 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
43  // 180Hz
44  digitalWrite(7, HIGH); // Set pin 7 to HIGH, turning on the digital output.
45  delay(2); // Wait for 2 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays HIGH.
46  delayMicroseconds(625); // Wait for 625 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays HIGH.
47  digitalWrite(7, LOW); // Set pin 7 to LOW, turning off the digital output.
48  delay(2); // Wait for 2 milliseconds. The delay value controls how long the pin stays LOW.
49  delayMicroseconds(625); // Wait for 625 microseconds. Additional delay for controlling how long the pin stays LOW.
50  Serial.println(Vc); // Send the value of Vc (the analog reading) to the serial monitor for debugging or analysis.
51 }
```


7.2 Κώδικας στο MATLAB®

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι πληροφορίες που περιλαμβάνει το αρχείο CSV από την κάθε μέτρηση στο παλμογράφο. Το κάθε αρχείο εισάγεται στο MATLAB® και περιέχει 2.000.018 γραμμές και 2 στήλες. Οι πρώτες 18 γραμμές περιλαμβάνουν διάφορες πληροφορίες σχετικά με την μέτρηση όπως για παράδειγμα την περίοδο δειγματοληψίας, το κανάλι, τις μονάδες μέτρησης, την ημερομηνία της μέτρησης κ.α.. Στις επόμενες στήλες ακολουθούν $2 \cdot 10^6$ δείγματα τάσης.

	A	B
	DSnoise	
	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	1.000E-01
9	Vertical Pos...	-2.000E-02
10	Horizontal ...	S
11	Horizontal ...	1.000E-01
12	Horizontal ...	0.000E+00
13	Horizontal ...	Roll Mode
14	Sampling P...	5.000E-07
15	Firmware	V1.19
16	Time	24-May-24 ...
17	Mode	Detail
18	Waveform ...	
19	-5.000000e-...	-8.00e-03
20	-4.999995e-...	-2.00e-02

Πληροφορίες σχετικά με την μέτρηση

Δείγματα από την μέτρηση

Δεδομένα στο χρόνο Δείγματα τάσης

Ο παρακάτω κώδικας αφορά την αναπαράσταση των δεδομένων στον χρόνο. Αγνοώντας τις πρώτες 18 γραμμές και αφαιρώντας το dc offset τα δεδομένα είναι έτοιμα για την αναπαράστασή τους. Ύστερα αποτυπώνεται ο κώδικας που αφορά την αναπαράσταση των δεδομένων στο χρόνο σε κοινό διάγραμμα.

```
file_path1 = 'DS30.CSV';

% Read data from CSV files, ignoring the first 18 header lines
DS30 = readtable(file_path1, 'HeaderLines', 18);
data1 = table2array(DS30(:, 2));
dc_offset1 = mean(data1);
data1_without_dc = data1 - dc_offset1;

% Plot data without DC offset
figure;
plot(data1_without_dc, 'r');
title('signal of 30Hz');
xlabel('Time', 'FontSize', 16);
ylabel('Volts', 'FontSize', 16);
set(gca, 'FontSize', 16);
```

```
file_path1 = 'DS30.CSV';
file_path2 = 'DSnoise.CSV';

% Read data from the first CSV file, ignoring the first 18 header lines
DS30 = readtable(file_path1, 'HeaderLines', 18);
data1 = table2array(DS30(:, 2));
dc_offset1 = mean(data1);
data1_without_dc = data1 - dc_offset1;

% Read data from the second CSV file, ignoring the first 18 header lines
DSnoise = readtable(file_path2, 'HeaderLines', 18);
data2 = table2array(DSnoise(:, 2));
dc_offset2 = mean(data2);
data2_without_dc = data2 - dc_offset2;

% Plot both signals without DC offset in the same figure
figure;
plot(data2_without_dc, 'b');
hold on;
plot(data1_without_dc, 'r');
hold off;

title('Signal of 30Hz and Noise');
xlabel('Time', 'FontSize', 16);
ylabel('Volts', 'FontSize', 16);
legend('30Hz Signal', 'Noise');
set(gca, 'FontSize', 16);
```

Παρακάτω δίνεται ο αλγόριθμος FFT που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης.

```
% Define file path for the noise CSV file
file_path = 'DS30.CSV';

% Read data from the CSV file, ignoring the first 18 header lines
DS30 = readtable(file_path, 'HeaderLines', 18);

% Extract data from the second column of the table
data = table2array(DS30(:, 2));

% Assume the sampling frequency (Fs) is 2 MHz
Fs = 2000000;

% Remove DC offset
dc_offset = mean(data);
data_without_dc = data - dc_offset;

% Perform FFT
Y_fft = fft(data_without_dc);
L = length(data_without_dc);
P2 = abs(Y_fft / L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2 * P1(2:end-1);
f = Fs * (0:(L/2)) / L;

% Plot FFT result
figure;
plot(f, P1, 'r', 'LineWidth', 1.5);

% Customize plot properties for better visualization
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize', 16);
ylabel('Amplitude', 'FontSize', 16);
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of the DS30');
grid on;
set(gca, 'FontSize', 16);% Set font size for axis labels and ticks
```

Παρακάτω δίνεται ο αλγόριθμος FFT που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των FFT όλων των προφίλ διέγερσης σε κοινό διάγραμμα.

```
% Define file paths for CSV files
file_paths = {'DSnoise.CSV', 'DS30.CSV', 'DS60.CSV', 'DS90.CSV', 'DS120.CSV', 'DS150.CSV', 'DS180.CSV', 'DSsweep.CSV',}

% Define custom legend labels for each signal
legend_labels = {'noise', '30Hz', '60Hz', '90Hz', '120Hz', '150Hz', '180Hz', 'SWEEP',}

% Predefine colors for each signal
colors = {'b', 'g', 'r', 'c', 'y', 'k', [1, 0.5, 0],[0.5, 0, 1]};
% Blue, Green, Red, Cyan, Magenta, Yellow, Black, Orange

% Initialize figure
figure;
hold on;
```

```
% Loop through each CSV file
for i = 1:length(file_paths)
    % Read data from CSV file, ignoring the first 18 header lines
    DS = readtable(file_paths{i}, 'HeaderLines', 18);

    % Extract data from the second column of the table
    data = table2array(DS(:, 2));

    % Assume the sampling frequency (Fs) is 2 MHz
    Fs = 2000000;

    % Remove DC offset
    dc_offset = mean(data);
    data_without_dc = data - dc_offset;

    % Perform FFT
    Y_fft = fft(data_without_dc);
    L = length(data_without_dc);
    P2 = abs(Y_fft / L);
    P1 = P2(1:L/2+1);
    P1(2:end-1) = 2 * P1(2:end-1);
    f = Fs * (0:(L/2)) / L;

    % Plot FFT result with specified color and custom legend label
    plot(f, P1, 'Color', colors{i}, 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', legend_labels{i});
end
```

```
% Customize plot properties
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize', 18);
ylabel('Amplitude', 'FontSize', 18);

% Display legend with custom labels
legend('show');
grid on; % Add grid lines for better visualization
set(gca, 'FontSize', 18);
```

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας για την δημιουργία των διαγραμμάτων μεταβολής εύρους κορυφών errorbar μαζί με το διάγραμμα FFT της εξεταζόμενης περίπτωσης, καθώς εκτυπώνονται και οι εξεταζόμενες κορυφές.

```

% Define file paths for CSV files
file_paths = {'180_SIMPLE1.CSV', '180_SIMPLE2.CSV', '180_SIMPLE3.CSV', '180_SIMPLE4.CSV', '180_SIMPLE5.CSV', '180_
            '180_WEIGHT4,1.CSV', '180_WEIGHT4,2.CSV', '180_WEIGHT4,3.CSV', '180_WEIGHT4,4.CSV', '180_WEIGHT4,5.CSV'};

% Define variables to store peak frequencies and their ranges
peak_freqs_all = zeros(length(file_paths), 1);
peak_freq_ranges_all = zeros(length(file_paths), 2); % Store min and max ranges

% Loop through each CSV file
for i = 1:length(file_paths)
    % Read data from CSV file, ignoring the first 18 header lines
    DS = readtable(file_paths{i}, 'HeaderLines', 18);
    % Extract data from the second column of the table
    data = table2array(DS(:, 2));
    % Assume the sampling frequency (Fs) is 2 MHz
    Fs = 2000000;
    % Remove DC offset
    dc_offset = mean(data);
    data_without_dc = data - dc_offset;
    % Perform FFT
    Y_fft = fft(data_without_dc);
    L = length(data_without_dc);
    P2 = abs(Y_fft / L);
    P1 = P2(1:L/2+1);
    P1(2:end-1) = 2 * P1(2:end-1);
    f = Fs * (0:(L/2)) / L;
    % Select the frequency range of interest
    roi_indices = find(f >= 2660 & f <= 2710); % Change the frequency range as needed
    roi_values = P1(roi_indices); % Extract values within the ROI
    % Find peak frequency and its range
    [peak_val, peak_idx] = max(roi_values);
    peak_freq = f(roi_indices(peak_idx));
    peak_range_min = f(roi_indices(1)); % Lower bound is the first frequency in the ROI
    peak_range_max = f(roi_indices(end)); % Upper bound is the last frequency in the ROI
    % Store peak frequency and its range
    peak_freqs_all(i) = peak_freq;
    peak_freq_ranges_all(i, :) = [peak_range_min, peak_range_max];
    % Print peak frequency and its range for verification
    fprintf('File:%s,PeakFrequency:%.2fHz,Range:[%.2f, %.2f]Hz\n',file_paths{i},peak_freq,peak_range_min,peak_range_max);
end

```

```

% Define the number of files per group
num_files_per_group = 10;
% Define the indices for the two groups
simple_group_indices = 1:num_files_per_group;
weight_group_indices = (num_files_per_group + 1):(2 * num_files_per_group);
% Compute the first (minimum) and last (maximum) peaks for each group
first_peak_simple = min(peak_freqs_all(simple_group_indices));
last_peak_simple = max(peak_freqs_all(simple_group_indices));
first_peak_weight = min(peak_freqs_all(weight_group_indices));
last_peak_weight = max(peak_freqs_all(weight_group_indices));
% Define variables for error bars based on the smallest and largest peaks in each group
errorbar_min_simple = mean(peak_freqs_all(simple_group_indices)) - first_peak_simple;
errorbar_max_simple = last_peak_simple - mean(peak_freqs_all(simple_group_indices));
errorbar_min_weight = mean(peak_freqs_all(weight_group_indices)) - first_peak_weight;
errorbar_max_weight = last_peak_weight - mean(peak_freqs_all(weight_group_indices));
% Compute the mean peak frequencies for plotting
mean_peak_simple = mean(peak_freqs_all(simple_group_indices));
mean_peak_weight = mean(peak_freqs_all(weight_group_indices));

% Create a figure
figure;
hold on;
% Plot the mean peak frequencies with error bars for 180WEIGHT4 (red)
errorbar(1, mean_peak_weight, errorbar_min_weight, errorbar_max_weight, ...
    'o', 'MarkerFaceColor', 'r', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'Linewidth', 1.5, 'Color', 'r');
% Plot the mean peak frequencies with error bars for 180SIMPLE (black)
errorbar(2, mean_peak_simple, errorbar_min_simple, errorbar_max_simple, ...
    'o', 'MarkerFaceColor', 'k', 'MarkerEdgeColor', 'k', 'Linewidth', 1.5, 'Color', 'k');
% Set axis labels and title
ylabel('Peak Frequency (Hz)', 'FontSize', 22);
title('Second Peak Frequency Variation between 180SIMPLE and 180WEIGHT4');
% Set x-axis ticks and labels
xticks([1, 2]);
xticklabels({'180WEIGHT4', '180SIMPLE'});
% Display the grid
grid on;
% Calculate the minimum and maximum y-axis limits based on peak frequencies
y_min = min([first_peak_simple, first_peak_weight]) - 10; % Adding a small buffer for better visualization
y_max = max([last_peak_simple, last_peak_weight]) + 10; % Adding a small buffer for better visualization
% Define the limits for the y-axis
ylim([y_min, y_max]);
hold off;
set(gca, 'FontSize', 22);

```

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας για το μη παραμετρικό τεστ Kolmogorov-Smirnov μαζί με την δημιουργία των διαγραμμάτων FFT της εξεταζόμενης περίπτωσης, καθώς εκτυπώνονται και οι εξεταζόμενες κορυφές.

```
% Define file paths for CSV files
file_paths = {'180_SIMPLE1.CSV', '180_SIMPLE2.CSV', '180_SIMPLE3.CSV', '180_SIMPLE4.CSV', '180_SIMPLE5.CSV',
             '180_WEIGHT4,1.CSV', '180_WEIGHT4,2.CSV', '180_WEIGHT4,3.CSV', '180_WEIGHT4,4.CSV', '180_WEIGHT4,5.CSV',
             '180_WEIGHT4,6.CSV', '180_WEIGHT4,7.CSV', '180_WEIGHT4,8.CSV', '180_WEIGHT4,9.CSV', '180_WEIGHT4,10.CSV'};

% Define custom legend labels for each signal
legend_labels = {'180hz1', '180hz2', '180hz3', '180hz4', '180hz5', '180hz6', '180hz7', '180hz8', '180hz9', '180hz10',
                '180W4,1', '180W4,2', '180W4,3', '180W4,4', '180W4,5', '180W4,6', '180W4,7', '180W4,8', '180W4,9', '180W4,10'};

% Predefine colors for each signal
colors = {'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', ...
         'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r'};

% Initialize figure
figure;
hold on;

% Sampling frequency
Fs = 2000000;

% Preallocate arrays for storing peak frequencies
num_files = length(file_paths);
num_signals = num_files / 2;
peak_freqs_all = zeros(num_files, 1);

% Loop through each CSV file
for i = 1:num_files
    % Read data from CSV file, ignoring the first 18 header lines
    DS = readtable(file_paths{i}, 'HeaderLines', 18);
    % Extract data from the second column of the table
    data = table2array(DS(:, 2));
    % Remove DC offset
    dc_offset = mean(data);
    data_without_dc = data - dc_offset;
    % Perform FFT
    Y_fft = fft(data_without_dc);
    L = length(data_without_dc);
    P2 = abs(Y_fft / L);
    P1 = P2(1:L/2+1);
    P1(2:end-1) = 2 * P1(2:end-1);
    f = Fs * (0:(L/2)) / L;
    % Select the frequencies between 2664 Hz and 2715 Hz
    roi_indices = find(f >= 2655 & f <= 2710);
    roi_values = P1(roi_indices);
    % Find the peak frequency within the region of interest
    [peak_val, peak_idx] = max(roi_values);
    peak_freq = f(roi_indices(peak_idx));
    % Store the peak frequency
    peak_freqs_all(i) = peak_freq;

    % Plot FFT result with specified color and custom legend label
    plot(f, P1, 'Color', colors{i}, 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', legend_labels{i});

    % Print the peak frequency for the current signal
    disp(['Peak frequency for ', legend_labels{i}, ': ', num2str(peak_freq), ' Hz']);
end
```

```

% Customize plot properties
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Amplitude');
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of the Signals');

% Display legend with custom labels
legend('show');
grid on; % Add grid lines for better visualization

% Define the number of files per group
num_files_per_group = 10;

% Define the indices for the two groups
simple_group_indices = 1:num_files_per_group;
weight_group_indices = (num_files_per_group + 1):(2 * num_files_per_group);

% Extract peak frequencies for each group
peak_freqs_simple = peak_freqs_all(simple_group_indices);
peak_freqs_weight = peak_freqs_all(weight_group_indices);

% Perform the Kolmogorov-Smirnov test on the peak frequencies
[h, p] = kstest2(peak_freqs_simple, peak_freqs_weight);

% Display the results of the K-S test
if h == 0
    disp('The two distributions are not statistically different (accepting the null hypothesis).');
else
    disp('The two distributions are statistically different (reject the null hypothesis).');
end
disp(['p-value: ', num2str(p)]);

```


Παρακάτω δίνεται ο κώδικας για το μη παραμετρικό τεστ Kruskal Wallis μαζί με την δημιουργία των διαγραμμάτων FFT της εξεταζόμενης περίπτωσης, καθώς εκτυπώνονται και οι εξεταζόμενες κορυφές.

```
% Define file paths for CSV files
file_paths = {'180_SIMPLE1.CSV', '180_SIMPLE2.CSV', '180_SIMPLE3.CSV', '180_SIMPLE4.CSV', '180_SIMPLE5.CSV', '180_WEIGHT4,1.CSV', '180_WEIGHT4,2.CSV', '180_WEIGHT4,3.CSV', '180_WEIGHT4,4.CSV', '180_WEIGHT4,5.CSV', '180_WEIGHT4,6.CSV', '180_WEIGHT4,7.CSV', '180_WEIGHT4,8.CSV'};

% Define custom legend labels for each signal
legend_labels = {'180hz1', '180hz2', '180hz3', '180hz4', '180hz5', '180hz6', '180hz7', '180hz8', '180hz9', '180hz10', '180W4,1', '180W4,2', '180W4,3', '180W4,4', '180W4,5', '180W4,6', '180W4,7', '180W4,8', '180W4,9', '180W4,10'};

% Predefine colors for each signal
colors = {'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'k', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r', 'r'};

% Initialize figure
figure;
hold on;

% Sampling frequency
Fs = 2000000;

% Preallocate arrays for storing peak frequencies
num_files = length(file_paths);
num_signals = num_files / 2;
peak_freqs_all = zeros(num_files, 1);

% Loop through each CSV file
for i = 1:num_files
    % Read data from CSV file, ignoring the first 18 header lines
    DS = readtable(file_paths{i}, 'HeaderLines', 18);
    % Extract data from the second column of the table
    data = table2array(DS(:, 2));
    % Remove DC offset
    dc_offset = mean(data);
    data_without_dc = data - dc_offset;
    % Perform FFT
    Y_fft = fft(data_without_dc);
    L = length(data_without_dc);
    P2 = abs(Y_fft / L);
    P1 = P2(1:L/2+1);
    P1(2:end-1) = 2 * P1(2:end-1);
    f = Fs * (0:(L/2)) / L;
    % Select the frequencies between 2664 Hz and 2715 Hz
    roi_indices = find(f >= 2655 & f <= 2710);
    roi_values = P1(roi_indices);
    % Find the peak frequency within the region of interest
    [peak_val, peak_idx] = max(roi_values);
    peak_freq = f(roi_indices(peak_idx));
    % Store the peak frequency
    peak_freqs_all(i) = peak_freq;
    % Plot FFT result with specified color and custom legend label
    plot(f, P1, 'Color', colors{i}, 'Linewidth', 1.5, 'DisplayName', legend_labels{i});
    % Print the peak frequency for the current signal
    disp(['Peak frequency for ', legend_labels{i}, ': ', num2str(peak_freq), ' Hz']);
end
```

```

% Customize plot properties
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Amplitude');
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of the Signals');

% Display legend with custom labels
legend('show');
grid on; % Add grid lines for better visualization

% Define the number of files per group
num_files_per_group = 10;

% Define the indices for the two groups
simple_group_indices = 1:num_files_per_group;
weight_group_indices = (num_files_per_group + 1):(2 * num_files_per_group);

% Extract peak frequencies for each group
peak_freqs_simple = peak_freqs_all(simple_group_indices);
peak_freqs_weight = peak_freqs_all(weight_group_indices);

% Perform the Kruskal-Wallis test on the peak frequencies
[p, tbl, stats] = kruskalwallis([peak_freqs_simple, peak_freqs_weight]);

% Display the p-value
disp(['p-value for Kruskal-Wallis test: ', num2str(p)]);

```

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας για την δημιουργία των ραβδογραμμάτων που φαίνονται στο σχήμα (4.2.13).

```
% Define your data
values1 = [54.75,64.93,75.37,55.46,58.92,66.41,0]; % Example values for the first barogram
values2 = [77.62,64.93,85.76,85.62,107.44,96.61,57.6]; % Example values for the second barogram
% Define colors for each barogram
color1 = [0.5, 0.1, 0.1]; % Red
color2 = [0.1, 0.5, 0.1]; % Green
% Create a single subplot for all bars
barWidth = 0.15; % Width of each bar
% Calculate positions for each group of bars
x = 1:numel(values1);
x1 = x - barWidth;
x2 = x;
x3 = x + barWidth;
x4 = x + 2 * barWidth;
% Create the plot
figure;
bar(x1, values1, barWidth, 'FaceColor', color1);
hold on;
bar(x2, values2, barWidth, 'FaceColor', color2);
% Add labels and title
xlabel('excitations', 'FontSize', 16);
ylabel('Percentage difference', 'FontSize', 16);
title('Combined Bars');
% Optionally, add category labels
categories = {'30Hz', '60Hz', '90Hz', '120Hz', '150Hz', '180Hz', "Sweep"};
xticks(x);
xticklabels(categories);
% Add legend
legend('first peak', 'first and second peak');
% Show grid
grid on;
set(gca, 'FontSize', 16);
```

Κώδικας για το παράδειγμα RC στο σχήμα (2.7.5).

```
% Parameters
R = 1e3;           % Resistance in ohms
C = 1e-6;         % Capacitance in farads
T = 10e-3;        % Period of the square wave in seconds
V0 = 5;           % Voltage amplitude of the square wave in volts
dutyCycle = 50;   % Duty cycle of the square wave in percent
numCycles = 4;    % Number of cycles to simulate

% Time vector
tStep = T / 1000; % Time step for simulation
t = 0:tStep:(numCycles * T);

% Generate square wave (0 to 5V)
squareWave = (V0 / 2) * (square(2 * pi * (1 / T) * t, dutyCycle) + 1);

% RC circuit response
tau = R * C;
vC = zeros(size(t));
for i = 2:length(t)
    if squareWave(i) > 0
        % Charging phase
        vC(i) = vC(i-1) + (squareWave(i) - vC(i-1)) * (1 - exp(-tStep / tau));
    else
        % Discharging phase
        vC(i) = vC(i-1) * exp(-tStep / tau);
    end
end

% Plotting
figure;
plot(t, squareWave, 'b', 'DisplayName', 'Square Wave Input');
hold on;
plot(t, vC, 'r', 'DisplayName', 'Capacitor Voltage');
xlabel('Time (s)', 'FontSize', 16);
ylabel('Voltage (V)', 'FontSize', 16);
title('RC Circuit Response to Square Wave Input');
legend;
grid on;
hold off;
set(gca, 'FontSize', 16);
```

Κώδικας για την κανονική κατανομή στο σχήμα (3.4.1).

```
% Generate values for the standard normal distribution
x = -4:0.01:4;
y = normpdf(x,0,1);

% distribution planning

figure;
plot(x, y, 'linewidth', 2);
hold on;

% Disposal areas
alpha = 0.05;
z_crit = norminv(1-alpha/2, 0, 1);

% Filling left discard area
x_fill_left = -4:0.01:-z_crit;
y_fill_left = normpdf(x_fill_left, 0, 1);
fill([x_fill_left, fliplr(x_fill_left)], [y_fill_left, zeros(size(y_fill_left))], 'r', 'FaceAlpha', 0.5);

% Fill right discard area
x_fill_right = z_crit:0.01:4;
y_fill_right = normpdf(x_fill_right, 0, 1);
fill([x_fill_right, fliplr(x_fill_right)], [y_fill_right, zeros(size(y_fill_right))], 'r', 'FaceAlpha', 0.5);

% Highlights
line([-z_crit -z_crit], [0 normpdf(-z_crit, 0, 1)], 'Color', 'k', 'LineStyle', '--');
line([z_crit z_crit], [0 normpdf(z_crit, 0, 1)], 'Color', 'k', 'LineStyle', '--');
text(-z_crit, 0.02, sprintf('%.2f', -z_crit), 'HorizontalAlignment', 'right');
text(z_crit, 0.02, sprintf('%.2f', z_crit), 'HorizontalAlignment', 'left');

% Add title and tags
title('Standard Normal Distribution and Discard Areas');
xlabel('Z-value', 'FontSize', 16);
ylabel('Probability Density', 'FontSize', 16);

% Add memo with smaller font size
lgd = legend('Standard Normal Distribution', 'Discard Areas ( $\alpha = 0.05$ )', 'Location', 'northeast');
lgd.FontSize = 8; % Decrease the font size of the memo
hold off;
set(gca, 'FontSize', 16);
```

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας για το παράδειγμα συνεχούς και μη περιοδικού σήματος (3.2.1), καθώς και το διάγραμμα του μετασχηματισμού Fourier (FT) του σήματος (3.2.2).

```
% Define the continuous signal
t = linspace(-5, 10, 1000); % Time axis
x_cont = (t >= 0 & t < 5); % Continuous signal x(t)

% Compute the Fourier Transform (FT)
omega_cont = linspace(-10, 10, 1024); % Frequency axis
X_cont = zeros(1, length(omega_cont)); % Initialize FT result

% Calculate FT for each frequency value using numerical integration (trapz)
for k = 1:length(omega_cont)
    X_cont(k) = trapz(t, x_cont .* exp(-1j * omega_cont(k) * t));
end

% Plot the continuous signal x(t)
figure;
plot(t, x_cont);
title('Continuous Square Signal x(t)');
xlabel('Time t');
ylabel('x(t)');
grid on;

% Plot the magnitude of the FT
figure;
plot(omega_cont, abs(X_cont));
title('Magnitude of Fourier Transform');
xlabel('Frequency \omega');
ylabel('|X(\omega)|');
grid on;
```

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας για το παράδειγμα διακριτού και μη περιοδικού σήματος (3.2.3), καθώς και το διάγραμμα του μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου (DTFT) του σήματος (3.2.4).

```
% Define the non-periodic discrete signal
n = -10:10; % Indices of the signal

% Compute the signal x[n] - Unit Rectangular Pulse
x = zeros(size(n));
x(n >= -5 & n <= 5) = 1; % Rectangular pulse from n=-5 to n=5

% Frequency  $\omega$ 
omega = linspace(-pi, pi, 1024); % Frequencies from  $-\pi$  to  $\pi$ 

% Compute the Discrete-Time Fourier Transform (DTFT)
X = zeros(size(omega));
% Calculate DTFT for each frequency value using summation
for k = 1:length(omega)
    X(k) = sum(x .* exp(-1j * omega(k) * n));
end
% Plot the discrete signal x[n]
figure;
stem(n, x, 'filled');
title('Discrete Non-periodic Signal x[n] - Rectangular Pulse');
xlabel('n', 'FontSize', 16);
ylabel('x[n]', 'FontSize', 16);
grid on;
set(gca, 'FontSize', 16);
% Plot the magnitude of the DTFT
figure;
plot(omega, abs(X));
title('Magnitude of DTFT');
xlabel('Frequency \omega', 'FontSize', 16);
ylabel('|X(\omega)|', 'FontSize', 16);
grid on;
set(gca, 'FontSize', 16);
```

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας για το παράδειγμα παράδειγμα διακριτού και περιοδικού σήματος (3.2.5), καθώς και το διάγραμμα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) του σήματος (3.2.6).

```
% Define the periodic discrete signal
N = 50; % Number of samples
n = 0:N-1; % Sample indices
% Signal parameters
A = 1; % Amplitude
f0 = 0.1; % Fundamental frequency (in cycles per sample)
phi = 0; % Phase
% Generate the periodic signal
x = A * cos(2*pi*f0*n + phi);
% Compute the Discrete Fourier Transform (DFT)
X = fft(x);
% Compute the frequency values
fs = 1; % Sampling rate (in cycles per sample)
frequencies = (0:N-1) * fs / N; % Frequencies from 0 to fs/2
% Plot the periodic discrete signal
figure;
stem(n, x, 'filled');
title('Discrete Periodic Signal  $x[n] = A \cdot \cos(2\pi f_0 n + \phi)$ ');
xlabel('Sample Index n', 'FontSize', 16);
ylabel('Amplitude', 'FontSize', 16);
grid on;
set(gca, 'FontSize', 16); % You can adjust the font size as desired
% Plot the magnitude of the Discrete Fourier Transform (DFT)
figure;
stem(frequencies, abs(X), 'filled');
title('Magnitude of Discrete Fourier Transform (DFT)');
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize', 16);
ylabel('|X(k)|', 'FontSize', 16);
grid on;
set(gca, 'FontSize', 16); % You can adjust the font size as desired
```


Παρακάτω δίνεται ο κώδικας για την δημιουργία του ιστογράμματος σύγκρισης όπως φαίνεται στο σχήμα (4.2.14).

```
% Plot histograms of peak frequencies
figure;
subplot(1,2,1);
histogram(peak_freqs_simple, 'Normalization', 'pdf', 'FaceColor', 'b', 'EdgeColor', 'none');
hold on;
% Plot normal distribution fit for Simple
mu_simple = mean(peak_freqs_simple);
sigma_simple = std(peak_freqs_simple);
x_simple = linspace(min(peak_freqs_simple), max(peak_freqs_simple), 100);
y_simple = normpdf(x_simple, mu_simple, sigma_simple);
plot(x_simple, y_simple, 'r', 'LineWidth', 2);
% Set labels and title for Simple
xlabel('Peak Frequency (Hz)');
ylabel('Probability Density');
title('Peak Frequency Distribution - Simple');
% Add legend
legend('Histogram', 'Normal Distribution Fit', 'Location', 'best');
% Display grid
grid on;
subplot(1,2,2);
histogram(peak_freqs_weight, 'Normalization', 'pdf', 'FaceColor', 'b', 'EdgeColor', 'none');
hold on;
% Plot normal distribution fit for Weight
mu_weight = mean(peak_freqs_weight);
sigma_weight = std(peak_freqs_weight);
x_weight = linspace(min(peak_freqs_weight), max(peak_freqs_weight), 100);
y_weight = normpdf(x_weight, mu_weight, sigma_weight);
plot(x_weight, y_weight, 'r', 'LineWidth', 2);
% Set labels and title for Weight
xlabel('Peak Frequency (Hz)');
ylabel('Probability Density');
title('Peak Frequency Distribution - Weight');
% Add legend
legend('Histogram', 'Normal Distribution Fit', 'Location', 'best');
% Display grid
grid on;
```