



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΝΟΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΚΡΑΔΑΣΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΓΟΜΠΑΚΗΣ ΣΩΤΗΡΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΛΕΥΡΑΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Στους γονείς μου, στο νονό και στη νονά μου που ήταν δίπλα μου από την αρχή μέχρι και το τέλος των σπουδών μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Παναγιώτη Αλευρά για τη συνεχή και εύστοχη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Επίσης δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω το κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για τη μοναδική ευκαιρία που μου προσέφερε να εργαστώ στο Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ήταν μια εμπειρία που εμπλούτισε σημαντικά τις γνώσεις μου καθώς με έφερε ένα βήμα πιο κοντά στο να σκέφτομαι και να πράττω σαν Μηχανικός. Τέλος, νοιώθω υπόχρεος στον Βαγγέλη Νικολιδάκη, για τις συμβουλές και τη βοήθειά του στο μηχανολογικό τομέα, και στον Γιάννη Φουντουλάκη, για τη πολύτιμη καθοδήγησή του στη χρήση των εργαλειομηχανών του εργαστηρίου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ	8
2.1 Συγκομιστές Κραδασμικής Ενέργειας (VEHs)	8
2.2 Συγκομιστές με μονό εκκρεμές (Single pendulum harvesters)	9
2.2.1 Συγκομιστές οριζοντίου τύπου	9
2.2.2 Συγκομιστές καθέτου τύπου.....	10
2.2.3 Συγκομιστές τύπου κεκλιμένου άξονα.....	12
2.2.4 Συγκομιστές αντιζυγισμένου τύπου	13
2.3 Συγκομιστές με διπλό εκκρεμές (Double pendulum harvesters).....	15
2.3.1 Συγκομιστές τύπου κοινού άξονα	15
2.3.2 Συγκομιστές παράλληλου τύπου.....	16
2.3.3 Συγκομιστές τύπου εν σειρά.....	16
2.4 Συνδυασμοί εκκρεμούς και μηχανισμού μετατροπής κίνησης σε VEHs	18
2.4.1 Εκκρεμές με μηχανισμό ενίσχυσης γραναζιών	18
2.4.2 Εκκρεμές με μηχανισμό μηχανικής ανόρθωσης	18
2.5 Άλλοι τύποι εκκρεμών σε VEHs	19
2.5.1 Εκκρεμές με μηχανισμό ελατηρίου.....	19
2.5.2 Εκκρεμές με μηχανισμό ελαστικής δοκού	20
2.5.3 Εκκρεμές με μαγνητικό μηχανισμό.....	20
2.6 Εφαρμογές ενσωμάτωσης και σύγκριση VEHs.....	22
2.6.1 Ηλεκτρομαγνητικός VEH.....	22
2.6.2 Πιεζοηλεκτρικός VEH.....	24
2.6.3 Τριβοηλεκτρικός VEH.....	25
2.6.4 Υβριδικός VEH	27
2.7 Σύγκριση των VEHs	28
2.8 Πρακτικές εφαρμογές των VEHs	30
2.8.1 Συγκομιδή ενέργειας από βιομηχανικές εγκαταστάσεις	30
2.8.2 Συγκομιδή ενέργειας από οχήματα	31
2.8.3 Συγκομιδή ενέργειας από ανθρώπινες κινήσεις	31
2.8.4 Συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις κτηρίων	32
2.8.5 Συγκομιδή ενέργειας από τη ροή των ρευστών	32
2.9 Εξισώσεις κινηματικής.....	33
2.9.1 Ομαλά επιβραδυνόμενη περιστροφική κίνηση.....	33
2.9.2 Κινηματική ταλάντωσης φυσικού εκκρεμούς	34
2.9.3 Κινηματική ταλάντωσης φυσικού εκκρεμούς υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου.....	35
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ	36

3.1	Τριβή απόσβεσης σε κυκλικό δίσκο	36
3.1.1	Κατασκευή της πειραματικής διάταξης	36
3.1.2	Προετοιμασία και διενέργεια του πειράματος.....	38
3.1.3	Επεξεργασία των μετρήσεων	39
3.2	Τριβή απόσβεσης σε φυσικό εκκρεμές.....	44
3.2.1	Κατασκευή της πειραματικής διάταξης	44
3.2.2	Προετοιμασία και διενέργεια του πειράματος.....	46
3.2.3	Επεξεργασία των μετρήσεων	47
4.	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ VEH.....	55
4.1	Σχεδιασμός του VEH	55
4.2	Κατασκευή του VEH	56
4.3	Μέτρηση τριβής απόσβεσης στο ρότορα του VEH	62
4.3.1	Προετοιμασία και διενέργεια του πειράματος.....	62
4.3.2	Επεξεργασία των μετρήσεων	63
5.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ VEH	65
5.1	Προετοιμασία των πειραμάτων	65
5.2	Διενέργεια των πειραμάτων	67
5.2.1	Πείραμα με συντονισμό του VEH.....	67
5.2.2	Πείραμα χωρίς συντονισμό του VEH.....	68
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ.....	70
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71
8.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	76
8.1	Παράρτημα 1: Μετασχηματισμός Hough	76
8.2	Παράρτημα 2: Κώδικες.....	77
8.1.1	Κώδικας μετασχηματισμού Hough στα αρχικά πειράματα.....	77
8.1.2	Κώδικας μετασχηματισμού Hough στο τελικό πείραμα.....	80
8.1.3	Κώδικας ταλάντωσης φυσικού εκκρεμούς	85
8.1.4	Κώδικας ταλάντωσης ρότορα.....	86
8.3	Παράρτημα 3: Μηχανολογικά σχέδια	88
8.2.1	Σχέδια πειραματικής διάταξης υπολογισμού τριβής.....	88
8.2.2	Σχέδια μη γραμμικού VEH.....	92

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ένας πρωτότυπος Συγκομιστής Κραδασμικής Ενέργειας (Vibration Energy Harvester) ο οποίος βασίζεται σε φυσικό εκκρεμές. Για το βέλτιστο σχεδιασμό του αρχικά διενεργήθηκαν πειράματα πάνω σε ένα φυσικό εκκρεμές, με σκοπό το προσδιορισμό της τριβής απόσβεσης που υπάρχει κατά τη ταλάντωσή του.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Μικροκοπής (m3) του Πολυτεχνείου Κρήτης όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα της εκάστοτε πειραματικής διάταξης και έγινε αναλυτική περιγραφή του σχεδιασμού τους. Η λήψη και καταγραφή των μετρήσεων έγινε με χρήση του αισθητήρα AUTONICS E50S8-3600-3-T-24 και του παλμογράφου PicoScope 2204A. Η ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με χρήση του λογισμικού PicoScope7 T&M και της MATLAB.

Αρχικά διεξήχθησαν πειράματα για τον υπολογισμό της τριβής απόσβεσης του φυσικού εκκρεμές στο οποίο θα βασίζεται ο συγκομιστής. Όταν υπήρχε μια ικανοποιητική εικόνα για τη τριβή απόσβεσης ξεκίνησε ο σχεδιασμός του VEH, βάση μοντέλων προσομοίωσης. Ο σχεδιασμός έγινε εξ ολοκλήρου με χρήση του λογισμικού Autodesk Inventor Professional, ενώ η κατασκευή τους έγινε με τη βοήθεια του 3D Printer CR20 PRO και ενός συμβατικού τόνου.

Ο VEH συναρμολογήθηκε και εξετάστηκε ως προς τη τριβή απόσβεσης του ρότορά του με χρήση μεθόδων από τα προηγούμενα πειράματα. Στη συνέχεια, μελετήθηκε ως προς τη συμπεριφορά του σε ένα εύρος ταλαντώσεων και ως προς την απόδοση του σε παραγόμενη τάση. Για τη παραγωγή των κατάλληλων ταλαντώσεων έγινε χρήση του shaker bed APS ELECTRO-SEIS 113 και της γεννήτριας συχνοτήτων RIGOL DG 1032Z. Η λήψη των μετρήσεων έγινε με το παλμογράφο των αρχικών πειραμάτων και δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις, ως αποτελέσματα του πειράματος.

Στο **κεφάλαιο 1** γίνεται μια εισαγωγή για το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας μαζί με μια σύντομη περιγραφή των κεφαλαίων της.

Στο **κεφάλαιο 2** υπάρχει μια στάθμη γνώσεων που ενημερώνει τον αναγνώστη για τους τύπους και τη λειτουργία των Συγκομιστών Κραδασμικής Ενέργειας (VEHs) καθώς και για το μαθηματικό υπόβαθρο της εργασίας.

Στο **κεφάλαιο 3** περιγράφεται ο πειραματικός υπολογισμός του συντελεστή τριβής απόσβεσης ενός φυσικού εκκρεμούς ως μια προεργασία για τη κατασκευή του VEH.

Στο **κεφάλαιο 4** πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μη γραμμικού VEH και υπολογίζεται πειραματικά η τριβή απόσβεσης του φυσικού εκκρεμούς που φέρει.

Στο **κεφάλαιο 5** ο VEH εξετάζεται ως προς τη μηχανολογική του συμπεριφορά υπό ένα φάσμα ταλαντώσεων και καταγράφεται πειραματικά η ταχύτητα ταλάντωσης και η απόδοση του σε ηλεκτρική τάση.

Στο **κεφάλαιο 6** σχολιάζονται τα συμπεράσματα των πειραματικών μετρήσεων και προτείνονται βελτιώσεις του VEH, ως μελλοντικοί στόχοι.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

2.1 Συγκομιστές Κραδασμικής Ενέργειας (VEHs)

Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν εδώ και καιρό κύρια πηγή ενέργειας, αλλά η υπερκατανάλωσή τους έχει οδηγήσει σε περιβαλλοντική ρύπανση και ενεργειακές κρίσεις, παρουσιάζοντας σημαντικές προκλήσεις. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί την ανάπτυξη αξιόπιστων ενεργειακών πόρων, καθώς οι τρέχουσες τεχνολογίες μπαταριών απαιτούν συχνή αντικατάσταση, εμποδίζοντας τη συνεχή λειτουργία των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών.

Ταυτόχρονα, με την όξυνση της ενεργειακής κρίσης και της περιβαλλοντικής ρύπανσης, η συλλογή καθαρής ενέργειας γίνεται ολοένα και πιο ζωτική για βιώσιμη ανάπτυξη. Η συλλογή ενέργειας από κραδασμούς, η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του περιβάλλοντος σε ηλεκτρική ενέργεια, είναι μια ελκυστική τεχνολογία με πολλά υποσχόμενες εφαρμογές σε αυτοτροφοδοτούμενες ηλεκτρονικές συσκευές.

Το ολοένα αυξανόμενο κόστος των ηλεκτροχημικών μπαταριών σε αισθητήρες καθώς και η δυσκολία αντικατάστασής τους, σε ορισμένες περιπτώσεις, επιβάλλουν την εύρεση πηγών ανανεώσιμης/καθαρής ενέργειας φιλικής προς το περιβάλλον. Πολλοί αισθητήρες συχνά βρίσκονται τοποθετημένοι σε περιβάλλον δονήσεων, δηλαδή μηχανικών κραδασμών.

Οι φορείς των μηχανικών κραδασμών ποικίλουν, καθώς δονήσεις μπορούν να εντοπιστούν σε ηλεκτροκινητήρες, γραμμές τρένων, αναρτήσεις οχημάτων, αστικά κτίρια κ.α. Η εκμετάλλευση αυτής της δυναμικής ενέργειας των ταλαντώσεων μέσω μετατροπής της σε ηλεκτρική, θα μπορούσε να τροφοδοτήσει έναν αισθητήρα και να αντικαταστήσει μια συμβατική μπαταρία.

Μια συσκευή η οποία επιτυγχάνει αυτού του είδους τη μετατροπή ονομάζεται Συγκομιστής Κραδασμικής Ενέργειας (VEH). Οι Συγκομιστές συνήθως αποτελούνται από ένα σύστημα μετατροπής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, από ηλεκτρονικά ισχύος για την διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας (πυκνωτές κλπ.). Αποτελούνται από 3 κατηγορίες, τους ηλεκτρομαγνητικούς, τους πιεζοηλεκτρικούς και τους τριβοηλεκτρικούς.

Προφανώς, το βασικό στοιχείο ενός VEH είναι ο μηχανικός ταλαντωτής που δέχεται τις ταλαντώσεις/δονήσεις. Οι βασικοί μηχανικοί ταλαντωτές διακρίνονται, βάση της αρχής λειτουργίας τους, σε μηχανισμό ελατηρίου – μάζας και σε μηχανισμό εκκρεμούς.

Οι πρώτοι αποτελούνται από ένα ελαστικό στοιχείο όπως ένα ελατήριο ή μια εύκαμπτη δοκό και μια ταλαντευόμενη μάζα. Κύριο μειονέκτημα των ταλαντωτών ελατηρίου – μάζας είναι η επίδραση της βαρύτητας στη μάζα. Κατά την οριζόντια τοποθέτηση του συστήματος, η βαρύτητα προκαλεί επιπλέον τριβή που λειτουργεί ως απόσβεση της ταλάντωσης ενώ κατά την κάθετη τοποθέτηση προκαλεί μια αρχική επέκταση του ελατηρίου.

Όσον αφορά τους ταλαντωτές με μηχανισμό εκκρεμούς, έχουν απλούστερη και πιο αξιόπιστη κατασκευή. Σε σύγκριση με τους προηγούμενους, μπορούν να αξιοποιήσουν δονήσεις χαμηλών συχνοτήτων και δεν επηρεάζονται αρνητικά από τη δύναμη της βαρύτητας. Κύριο μειονέκτημά τους είναι ο μεγάλος όγκος που καταλαμβάνουν, κάτι που καθιστά δύσκολη τη στιβαρή κατασκευή και τοποθέτησή τους.

Οι πειραματικές διατάξεις με εκκρεμές διακρίνονται σε 2 κύριες κατηγορίες, τις διατάξεις που αποτελούνται από μοναδικό εκκρεμές και αυτές που συνδυάζουν 2 ή περισσότερα εκκρεμή. Μια διάταξη της πρώτης κατηγορίας θα διαθέτει εκκρεμές που μπορεί να είναι οριζοντίου άξονα, κατακόρυφου άξονα, κεκλιμένου άξονα ή πολυβάθμιου άξονα. Μια διάταξη με

περισσότερα από ένα εκκρεμή κατηγοριοποιείται βάση της σχετικής θέσης των αξόνων που έχουν τα εκκρεμή. Έτσι, μπορεί να μοιράζονται τον ίδιο άξονα, να είναι εν σειρά ή να είναι παράλληλα.

2.2 Συγκομιστές με μονό εκκρεμές (Single pendulum harvesters)

2.2.1 Συγκομιστές οριζοντίου τύπου

Στο συγκεκριμένο τύπο εκκρεμούς ο άξονας περιστροφής της μάζας βρίσκεται στην οριζόντια διεύθυνση και αποτελεί το πιο συνηθισμένο τύπο εκκρεμούς. Η μάζα που εκτελεί τη ταλάντωση μπορεί να συνδέεται με τον άξονα μέσω μιας ράβδου ή μπορεί απλά να εκτελεί τη κίνησή της βρισκόμενη μέσα σε μια οριζόντια κυκλική κοιλότητα, εφόσον η μάζα είναι σφαιρική. Η λειτουργία των VEH με εκκρεμές αυτού του τύπου μπορεί να γίνει είτε με άμεσο είτε με παραμετρικό συντονισμό.

Στη περίπτωση που η διέγερση της μάζας γίνεται οριζόντια και κάθετα στον άξονα περιστροφής του εκκρεμούς, η εξίσωση κίνησής του εκφράζεται ως εξής:

$$(m_h L_h^2 + I_h) \ddot{\theta}_h + C_h \dot{\theta}_h + m_h g L_h \sin \theta_h = m_h L_h A_{hd} \cos \omega_{hd} t \cos \theta_h \quad (1)$$

όπου:

m_h η μάζα του του εκκρεμούς

L_h η απόσταση μεταξύ του κεντροϊδούς του εκκρεμούς και του άξονα περιστροφής

I_h η ροπή αδράνειας του εκκρεμούς

θ_h η γωνία μετατόπισης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο

C_h ο παράγοντας απόσβεσης της ταλάντωσης από μηχανικές απώλειες

A_{hd} και ω_{hd} το πλάτος της ταλάντωσης και η γωνιακή της συχνότητα, αντίστοιχα

Κάνοντας τη παραδοχή ότι η γωνία μετατόπισης είναι αρκετά μικρή, η ιδιοσυχνότητα του εκκρεμούς είναι η εξής:

$$\omega_{h0} = \sqrt{m_h g L_h / (m_h L_h^2 + I_h)} \quad (2)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατάσταση του παραμετρικού συντονισμού, κατά την οποία το εκκρεμές εκτελεί πλήρεις περιστροφές γύρω από τον άξονα περιστροφής του και όχι απλή ταλάντωση.

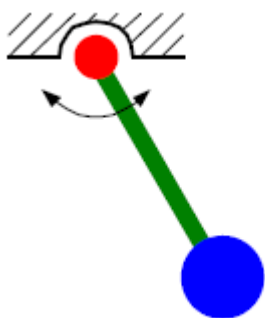
Η εξίσωση κίνησης για παραμετρική διέγερση του εκκρεμούς είναι η ακόλουθη:

$$(m_h L_h^2 + I_h) \ddot{\theta}_h + C_h \dot{\theta}_h + m_h L_h (g + A_{hp} \cos \omega_{hp} t) \sin \theta_h = 0 \quad (3)$$

όπου:

A_{hp} και ω_{hp} το πλάτος της ταλάντωσης και η γωνιακή συχνότητα της κάθετης διέγερσης, αντίστοιχα

Το εκκρεμές εισέρχεται σε παραμετρικό συντονισμό όταν δεχθεί διέγερση διπλάσιας γωνιακής συχνότητας από την ιδιοσυχνότητά του. Κατά το παραμετρικό συντονισμό, η αύξηση του πλάτους ταλάντωσης δεν έχει κάποιο όριο, όμως περιορίζεται από μη γραμμικότητες και απόσβεση στα μεγάλα πλάτη ταλάντωσης. Η πρακτική επίτευξη του περιορίζεται από ένα κατώφλι έναρξης του συντονισμού, το οποίο εξαρτάται από την απόσβεση της ταλάντωσης.



Σχήμα 2.1: Εκκρεμές οριζοντίου τύπου [30,31,32].

2.2.2 Συγκομιστές καθέτου τύπου

Στα εκκρεμή καθέτου τύπου, ο άξονας περιστροφής βρίσκεται στη κάθετη διεύθυνση και μπορούν, με μεγάλη ευκολία, να εκτελέσουν συνεχομένη περιστροφή γύρω από αυτόν με τεχνικές ενεργού ελέγχου. Τα εκκρεμή αυτού του τύπου μπορούν να διεγερθούν τόσο από μεταφορικές όσο και από κυλιόμενες δονήσεις αυθαίρετων κατευθύνσεων, καθώς παρουσιάζουν συμμετρία ως προς το κάθετο άξονα περιστροφής τους.

Όταν η διέγερση που δέχεται το εκκρεμές είναι γραμμική κατά το οριζόντιο επίπεδο, η εξίσωση κίνησής του είναι η ακόλουθη:

$$(m_v L_v^2 + I_v) \ddot{\theta}_v + C_v \dot{\theta}_v = m_v L_v A_v \cos \omega_v t \cos \theta_v \quad (4)$$

όπου:

m_v η μάζα του του εκκρεμούς

L_v η απόσταση μεταξύ του κεντροϊδού του εκκρεμούς και του άξονα περιστροφής

I_v η ροπή αδράνειας του εκκρεμούς

θ_v η γωνία μετατόπισης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο

C_v ο παράγοντας απόσβεσης της ταλάντωσης από μηχανικές απώλειες

A_v το πλάτος της ταλάντωσης

ω_v η γωνιακή συχνότητα της οριζόντιας διέγερσης

Από τη (4) παρατηρείται πως η ταλάντωση του εκκρεμούς προκαλείται κυρίως από τη ροπή αδράνειάς του, με τη βαρύτητα να μην έχει κάποια επίδραση σε αυτή.

Στη περίπτωση που η δύναμη διέγερσης είναι συνδυασμός κυλιόμενης και περιστροφικής κίνησης η εξίσωση που προκύπτει είναι η εξής:

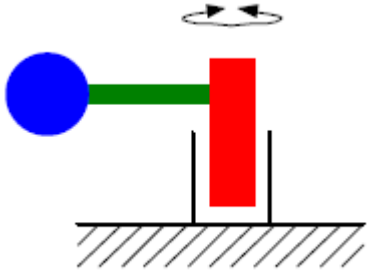
$$(m_v L_v^2 + I_v) \ddot{\theta}_v + C_v \dot{\theta}_v + m_v L_v^2 \sin \theta_v \cos \theta_v \varphi^2 + m_v L_v (g + \ddot{H}) \sin \theta_v \sin \varphi = 0 \quad (5)$$

όπου:

φ η γωνία περιστροφής

H η κυλιόμενη μετατόπιση

Παρατηρείται πως η βαρύτητα επηρεάζει τον όρο που σχετίζεται με τη περιστροφική κίνηση της διέγερσης. Σε γενικούς όρους, η ενεργειακή απόδοση των VEHS που διαθέτουν εκκρεμή καθέτου τύπου είναι εφάμιλλη των αντίστοιχων οριζοντίου τύπου.



Σχήμα 2.2: Εκκρεμές καθέτου τύπου [33,34,35].

2.2.3 Συγκομιστές τύπου κεκλιμένου άξονα

Η διάταξη κεκλιμένου άξονα του εκκρεμούς χρησιμεύει ως ένα «ενδιάμεσο» στάδιο μεταξύ οριζόντιων και κάθετων διατάξεων, ελαχιστοποιώντας την επίδραση της βαρύτητας στο εκκρεμές. Ως αποτέλεσμα, επιτρέπει την περιστροφική του κίνηση, χωρίς την ανάγκη δυναμικού ελέγχου σε σενάρια που περιλαμβάνουν δονήσεις χαμηλού πλάτους. Πειραματικά στοιχεία που παρέχονται από τους **Dostal et al.** [70] έχουν επιβεβαιώσει την εμφάνιση περιστροφικής κίνησης ακόμη και υπό συνθήκες ήπιας έως μέτριας τυχαίας διέγερσης του εκκρεμούς.

Η συμπεριφορά του εκκρεμούς με κεκλιμένο άξονα, που υπόκειται σε παραμετρική διέγερση στη κατακόρυφη διεύθυνση, περιγράφεται ως εξής:

$$(m_i L_i^2 + I_i) \ddot{\theta}_i + C_i \dot{\theta}_i + m_i L_i (g \cos \gamma + A_i \cos \omega_i t) \sin \theta_i = 0 \quad (6)$$

όπου:

m_i η μάζα του του εκκρεμούς

L_i η απόσταση μεταξύ του κεντροϊδούς του εκκρεμούς και του άξονα περιστροφής

I_i η ροπή αδράνειας του εκκρεμούς

θ_i η γωνία περιστροφής

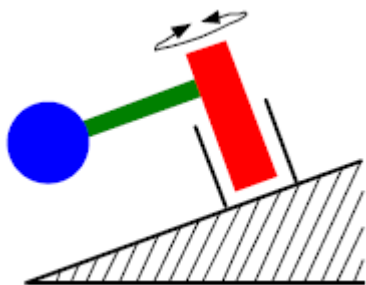
C_i ο παράγοντας απόσβεσης της ταλάντωσης από μηχανικές απώλειες

γ η γωνία κλίσης του άξονα περιστροφής

A_i και ω_i το πλάτος της ταλάντωσης και η γωνιακή της συχνότητα, αντίστοιχα

Με σύγκριση των (3) και (6), παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης, η ροπή επαναφοράς που ασκείται από τη βαρύτητα μειώνεται, οδηγώντας σε μείωση της φυσικής συχνότητας του εκκρεμούς. Οι **Ding et al.** [1] εισήγαγαν μια μέθοδο για τη ρύθμιση της συχνότητας ενός VEH εκκρεμούς, μεταβάλλοντας τη γωνία κλίσης του άξονα περιστροφής

του. Μέσω πειραμάτων, απέδειξαν ότι συχνότητες συντονισμού που άγγιζαν τα 0,2Hz, 0,25Hz και 0,3Hz μπορούσαν να επιτευχθούν με γωνίες κλίσης 87 μοιρών, 86 μοιρών και 85 μοιρών αντίστοιχα. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό μηχανισμών εκκρεμούς.



Σχήμα 2.3: Εκκρεμές τύπου κεκλιμένου άξονα [36,37].

2.2.4 Συγκομιστές αντιζυγισμένου τύπου

Οι προαναφερθείς τρεις τύποι διαμορφώσεων εκκρεμούς έχουν ένα βαθμό ελευθερίας και περιορίζονται στη κίνηση σε ένα μόνο επίπεδο, περιορίζοντας την ικανότητά τους να συλλέγουν κινητική ενέργεια από δονήσεις πολλαπλών κατευθύνσεων. Οι VEHs με αντιζυγισμένο εκκρεμές μπορούν να ξεπεράσουν αυτό το περιορισμό, χρησιμοποιώντας πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας. Αυτοί οι μηχανισμοί μπορούν να αναρτηθούν από ένα σπείρωμα, ένα σύνδεσμο άρθρωσης ή πολλαπλούς συζευγμένους άξονες.

Οι μηχανισμοί νήματος - εκκρεμούς με σπείρωμα έχουν χαμηλή απόσβεση αλλά μικρή αντοχή φόρτισης, καθιστώντας τους κατάλληλους για ελαφριά εκκρεμή ή ως βοηθητικές συσκευές για τη δημιουργία εσωτερικού συντονισμού. Ο σύνδεσμος άρθρωσης ή οι πολλαπλοί συνδεδεμένοι άξονες έχουν την ίδια δομή, με ορθογώνιους άξονες και έναν εσωτερικό άξονα που περιστρέφεται γύρω από τον εξωτερικό άξονα. Οι **Wang et al.** [71,72] δημιούργησαν ένα VEH εκκρεμούς ενός ημισφαιρίου, ικανό να περιστρέφεται γύρω από δύο άξονες μέσω μιας εγκάρσιας άρθρωσης.

Ένας VEH δύο βαθμών ελευθερίας με έναν έκκεντρο δακτύλιο διπλού άξονα και ηλεκτρικές γεννήτριες σχεδιάστηκε για να αποκτά κινητική ενέργεια μιμούμενος τη δι-αξονική κίνηση του hula-hoop. Ωστόσο, οι κινήσεις ως προς τους συζευγμένους άξονες δεν είναι συμμετρικές, καθώς ο προσανατολισμός του εξωτερικού άξονα έχει μονοκατευθυντική επίδραση στον εσωτερικό άξονα.

Η συμπεριφορά του αντιζυγισμένου εκκρεμούς είναι πολύ πιο περίπλοκη σε σύγκριση με ένα εκκρεμές που διαθέτει μόνο ένα βαθμό ελευθερίας. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη ένα VEH με δύο οριζόντια διατεταγμένους άξονες, η δυναμική του μπορεί να αναλυθεί από τις ακόλουθες εξισώσεις, όταν υποβάλλεται σε επιταχύνσεις δόνησης $A_x \cos(\omega_x t)$ και $A_y \cos(\omega_y t)$, οι οποίες είναι κάθετες στο οριζόντιο επίπεδο:

$$(m_g L_g^2 + I_{ga})\ddot{\alpha} + C_a \dot{\alpha} + m_g L_g^2 \dot{\beta}^2 \sin \alpha \cos \alpha + m_g L_g (g \sin \alpha \cos \beta + A_x \cos \omega_x t \cos \alpha - A_y \cos \omega_y t \sin \alpha \sin \beta) = 0 \quad (7)$$

$$(m_g L_g^2 \cos^2 \alpha + I_{g\beta})\ddot{\beta} + C_\beta \dot{\beta} - m_g L_g^2 \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin 2\alpha + m_g L_g \cos \alpha (g \sin \beta + A_y \cos \omega_y t \cos \beta) = 0 \quad (8)$$

όπου:

m_g η μάζα του του αντιζυγισμένου εκκρεμούς

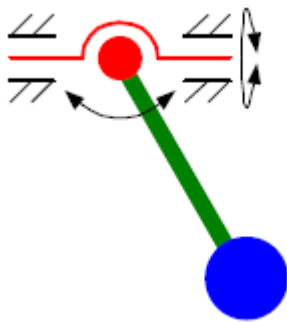
L_g η απόσταση μεταξύ του κεντρού του εκκρεμούς και του συνδέσμου

I_{ga} και $I_{g\beta}$ οι ροπές αδράνειας του εκκρεμούς

C_a και C_β οι παράγοντες απόσβεσης της ταλάντωσης από μηχανικές απώλειες

Η γωνία εκτροπής και η γωνία αζιμουθίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές για τη προσομοίωση της δυναμικής του αντιζυγισμένου εκκρεμούς. Οι κάθετοι άξονες αντιμετωπίστηκαν ως δύο συνδεδεμένα συστήματα αναφοράς με γεωμετρικές συνδέσεις από τους **Anurakpandit et al.** [38], απλοποιώντας το μοντέλο. Αυτό καθιστά δυνατό τον εντοπισμό χαρακτηριστικών ασυμμετρίας μεταξύ των δύο συνδεδεμένων συστημάτων με ρεαλιστικό τρόπο.

Γενικότερα, τα αντιζυγισμένα εκκρεμή έχουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό τους, αλλά είναι πιο ευπροσάρμοστα και έχουν καλύτερη δυναμική.



Σχήμα 2.4: Εκκρεμές αντιζυγισμένου άξονα [39,40,41].

2.3 Συγκομιστές με διπλό εκκρεμές (Double pendulum harvesters)

2.3.1 Συγκομιστές τύπου κοινού άξονα

Η διάταξη πολλαπλών εκκρεμών σε ομοαξονική διαμόρφωση έχει σχεδιαστεί για να μεταβάλλει τη φυσική συχνότητα του συστήματος, καταλαμβάνοντας ελάχιστο χώρο. Στη περίπτωση ενός εκκρεμούς συγκεντρωμένης μάζας όπου η ροπή αδράνειας είναι μηδέν, η έκφραση της φυσικής συχνότητας απλοποιείται σε $(\frac{g}{L_h})^{1/2}$. Αυτό συνήθως οδηγεί σε αύξηση του μήκους της ράβδου του εκκρεμούς για την αξιοποίηση δονήσεων χαμηλής συχνότητας, όπως αυτές που συναντώνται στα κύματα του ωκεανού. Για παράδειγμα, μια ράβδος εκκρεμούς που δονείται στα 0,5Hz θα απαιτούσε μήκος 0,99m για συγχρονισμό συχνότητας. Με την ομοαξονική διάταξη πολλαπλών εκκρεμών, η ροπή αδράνειας αυξάνεται και η απόσταση από το κέντρο περιστροφής μειώνεται, μειώνοντας έτσι τη φυσική συχνότητα.

Η αντίστοιχη έκφραση της φυσικής συχνότητας δίνεται ως:

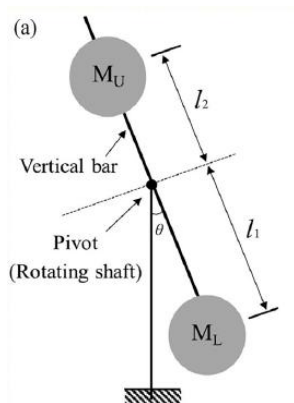
$$\omega_{d0} = \sqrt{\frac{g(l_1 - l_2)}{l_1^2 + l_2^2}} \quad (9)$$

όπου:

l_1 και l_2 τα μήκη των 2 ράβδων.

Αυτή η διάταξη αποδείχθηκε ικανή να παράγει ένα ρυθμιζόμενο εύρος εξαιρετικά χαμηλής φυσικής συχνότητας από 0,2Hz έως 1,4Hz. Προκειμένου να μειωθεί η φυσική συχνότητα, οι **Graves et al.** [42] δημιούργησαν επίσης ένα συγκομιστή ενέργειας εκκρεμούς χρησιμοποιώντας διαφορετική μάζα ως αντίβαρο.

Οι **Yurchenko et al.** [43] πρότειναν ένα VEH N-εκκρεμών που επιτρέπει την αποσύνδεση της φυσικής συχνότητας του εκκρεμούς από το μήκος της ράβδου και παρέχει εύκολο έλεγχο της συχνότητας και της ροπής. Παρουσίασαν μια πειραματική μελέτη σε ένα VEH τριών εκκρεμών και χρησιμοποίησαν μη γραμμική δυναμική ανάλυση για να μετρηθεί η ικανότητά του με αυθαίρετο αριθμό ομόκεντρων εκκρεμών. Ωστόσο, η μηχανική απόσβεση λόγω τριβής στον άξονα αυξάνεται με τον αριθμό των εκκρεμών που χρησιμοποιούνται ως αντίβαρο.



Σχήμα 2.5: Διάταξη κοινού άξονα [44].

2.3.2 Συγκομιστές παράλληλου τύπου

Η παράλληλη διάταξη πολλαπλών εκκρεμών μπορεί να βελτιώσει τόσο την ισχύ εξόδου όσο και το εύρος της ζώνης συχνότητας κατά τη συλλογή ενέργειας, αν και μπορεί να επιβάλει περιορισμούς στο πλάτος της ταλάντωσης.

Οι **Malaji et al.** [2] μελέτησαν εκτενώς αυτή τη διάταξη πολλαπλών εκκρεμών, διερευνώντας την επίδραση της μηχανικής σύζευξης που δημιουργείται από ελατήρια σε ένα VEH με δύο εκκρεμή που λειτουργούν παράλληλα. Παρατήρησαν ότι τα ελατήρια δεν άλλαξαν τη καμπύλη ισχύος κάτω από αρμονική διέγερση βάσης, αλλά συγκεκριμένες αναλογίες σύζευξης οδήγησαν στην εμφάνιση δύο μεγάλων κορυφών στη καμπύλη ισχύος, κάτω από λανθασμένες συνθήκες.

Επίσης, διερεύνησαν την επίδραση του αριθμού των εκκρεμών αλλά δε βρήκαν σημαντική βελτίωση. Ο συνδυασμός μηχανικής και μαγνητικής σύζευξης στη παράλληλη διάταξη πολλαπλών εκκρεμών οδήγησε σε αύξηση της ισχύος κατά 30,69% και 100% βελτίωση στο εύρος ζώνης, ακόμη και με διέγερση χαμηλού πλάτους.

Οι **Punyakaew et al.** [45] παρουσίασαν ένα VEH που χρησιμοποιεί δύο παράλληλα εκκρεμή για τη συλλογή ενέργειας από δονήσεις διπλής συχνότητας, ωστόσο παρατήρησαν ότι η κατανάλωση ενέργειας ήταν αναπόφευκτη λόγω των ηλεκτρονικών συσκευών και των ηλεκτρικών ενεργοποιητών που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του.

2.3.3 Συγκομιστές τύπου εν σειρά

Η διάταξη των εκκρεμών σε σειρά περιλαμβάνει ένα εκκρεμές που περιστρέφεται γύρω από ένα άλλο με διαδοχικό τρόπο, οδηγώντας σε περίπλοκες χαοτικές δυναμικές συμπεριφορές, λόγω των αυξημένων βαθμών ελευθερίας. Ενώ ο θεωρητικός αριθμός των εκκρεμών σε σειρά μπορεί να είναι εκτενής, η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται κυρίως σε διαμορφώσεις με μόνο δύο εκκρεμή.

Σε ένα VEH εκκρεμούς εν σειρά, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται μέσω της σχετικής κίνησης μεταξύ ενός μαγνήτη που προσαρμόζεται στο δεύτερο εκκρεμές και των πηνίων που κατανέμονται με κυκλικό τρόπο, όταν βρίσκονται υπό διέγερση. Η μεγαλύτερη παραγωγή

ενέργειας συμβαίνει όταν τα εκκρεμή παρουσιάζουν χαοτική κίνηση, επιτρέποντας στο σύστημα να διατηρεί την απόδοσή του σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων δόνησης. Αυτός ο μηχανισμός εκκρεμούς εν σειρά ενσωματώθηκε και σε ένα τριβοηλεκτρικό - ηλεκτρομαγνητικό υβριδικό VEH, για να επιτύχει υψηλή απόδοση στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας υπό διέγερση χαμηλής συχνότητας.

Με στόχο τη συλλογή ενέργειας από τις ανθρώπινες κινήσεις, οι **Izadgoshasb et al.** [46] σύγκριναν τρεις διαμορφώσεις πιεζοηλεκτρικών VEH (πιεζοηλεκτρικό, με ράβδο και με 2 εκκρεμή εν σειρά) και διαπίστωσαν ότι η διαμόρφωση των δύο εκκρεμών ενίσχυσε σημαντικά την αποδοτικότητα συλλογής ενέργειας. Ωστόσο, η διαμόρφωση σειράς έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί μεγάλη διάσταση κατά μήκος της ράβδου του εκκρεμούς, μειώνοντας έτσι την πυκνότητα ισχύος της.

Οι μηχανισμοί του εκκρεμούς μπορούν να μεταβούν από περιοδική σε χαοτική κίνηση λόγω της εγγενούς μη γραμμικότητάς τους. Οι πρακτικές δονήσεις έχουν τυχαιότητα, πολυκατευθυντικότητα και αβεβαιότητα, που συνάδουν με τα χαοτικά χαρακτηριστικά στους μηχανισμούς του εκκρεμούς. Οι ερευνητές έχουν μελετήσει τη χαοτική δυναμική του μηχανισμού του εκκρεμούς μέσω θεωρητικής μοντελοποίησης και πειραματικής επαλήθευσης.

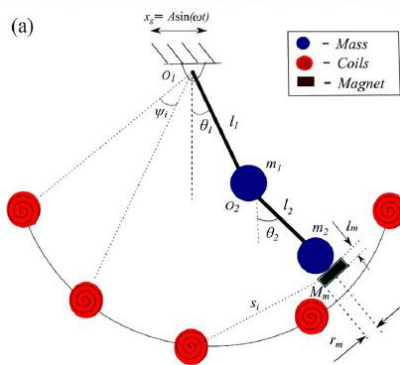
Για παράδειγμα, οι **Tomasz et al.** [47] ανέλυσαν τα χαοτικά χαρακτηριστικά ενός διπλού εκκρεμούς χρησιμοποιώντας το τμήμα **Poincaré**, τα διαγράμματα διακλάδωσης και τους χαρακτηριστικούς εκθέτες του **Lyapunov**. Επιβεβαίωσαν τη μετάβαση από μια κατάσταση χαμηλής ενέργειας στο χάος με αυξανόμενη ενέργεια.

Οι **Nikolai et al.** [48] διερεύνησαν τη δυναμική και τη σταθερότητα ενός διπλού εκκρεμούς για τρεις περιπτώσεις: έλλειψης βάρους, κατακόρυφη και οριζόντια. Για τη θεωρητική ανάλυση εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις **Hamiltonian** και η μέθοδος **Kapitsa** και παρατηρήθηκε καλή αντιστοιχία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Οι **Oiwa et al.** [49] μελέτησαν τη σταθερότητα κατά **Jacobi** ενός μη γραμμικού διπλού εκκρεμούς σε ίσες αρχικές γωνίες και ανέλυσαν τη σχέση μεταξύ της σταθερότητας κατά **Jacobi** και της χαοτικής κίνησης.

Οι **Wojna et al.** [50] ανέλυσαν τις χαοτικές και κανονικές συμπεριφορές ενός συστήματος διπλού εκκρεμούς με δύο απωθούμενους μόνιμους μαγνήτες και οι **Rafael et al.** [51] έκαναν το ίδιο κάτω από διαφορετικές συνθήκες διέγερσης.

Όταν οι βαθμοί ελευθερίας επεκτείνονται, χρησιμοποιώντας αντιζυγισμένα εκκρεμή, πολλαπλά εκκρεμή παράλληλα ή πολλαπλά εκκρεμή σε σειρά, είναι πιθανό να εμφανιστούν χαοτικές συμπεριφορές. Οι VEHs προβλέπεται να διατηρούν την απόδοση εξόδου τους κατά τη διάρκεια κραδασμών μεγάλου εύρους και πλάτους συχνοτήτων, χάρη στη χαοτική δυναμική τους.



Σχήμα 2.6: Συγκομιστής με 2 εκκρεμή εν σειρά [52].

2.4 Συνδυασμοί εκκρεμούς και μηχανισμού μετατροπής κίνησης σε VEHs

Η σχετική κίνηση του εκκρεμούς με το περίβλημά του, όταν διεγείρεται, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετατραπεί απευθείας σε ηλεκτρομηχανική ενέργεια μέσω μετατροπών. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η κίνηση που δημιουργείται αποκλειστικά από τα εκκρεμή μπορεί να είναι ανεπαρκής ή ανεπιθύμητη, οδηγώντας σε χαμηλή ηλεκτρική ισχύ και απόδοση, όταν μετατρέπεται απευθείας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι μηχανισμοί μετασχηματισμού κίνησης χρησιμοποιούνται συνήθως ως πρόσθετα εργαλεία για τη βελτίωση της συλλογής ενέργειας.

2.4.1 Εκκρεμές με μηχανισμό ενίσχυσης γραναζιών

Οι VEHs που βασίζονται σε εκκρεμές και λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες, μπορούν να γίνουν αποδοτικοί συνδέοντας το εκκρεμές ή τον άξονα εξόδου τους με ένα σύστημα ενίσχυσης γραναζιών. Αυτό το σύστημα παρέχει ενισχυμένη κίνηση στους μετατροπείς, επιτυγχάνοντας την επιθυμητή αναλογία μετάδοσης.

Οι επιστήμονες έχουν χρησιμοποιήσει εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα όπως το πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων **Maxon**, ικανό να επιτύχει λόγο μετάδοσης 103:1. Το σύστημα μετάδοσης μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά γρανάζια.

Ωστόσο, η τριβή εντός του συστήματος μετάδοσης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση συλλογής ενέργειας, ιδιαίτερα όταν εμπλέκονται πολλά γρανάζια. Ως εκ τούτου, η επιλογή ενός μηχανισμού μετάδοσης με κατάλληλες παραμέτρους είναι απαραίτητη για τη μείωση των απωλειών τριβής.

2.4.2 Εκκρεμές με μηχανισμό μηχανικής ανόρθωσης

Οι μηχανικοί ανορθωτές κίνησης (MMRs) είναι VEHs που μετατρέπουν την ταλάντευση σε μονοκατευθυντική περιστροφή. Ορισμένες μελέτες έχουν βελτιστοποιήσει τους VEHs τύπου εκκρεμούς εξοπλίζοντάς τους με MMR.

Οι **Liang et al.** [53] παρουσίασαν έναν VEH εκκρεμούς που βασίζεται στο μηχανισμό κωνικού γραναζιού, ο οποίος χρησιμοποιεί τρία κωνικά γρανάζια για να μετατρέψει τη ταλάντευση του εκκρεμούς σε περιστροφή μονής κατεύθυνσης. Ένα εκκρεμές, που αποτελείται από μια DC γεννήτρια ομοαξονικά συνδεδεμένη με ένα πλαίσιο, είναι ικανό να αιωρείται ελεύθερα γύρω από έναν κεντρικό άξονα όταν υποβάλλεται σε εξωτερική διέγερση. Η διαδικασία μετατροπής της κίνησης του εκκρεμούς σε μονοκατευθυντική περιστροφή της γεννήτριας επιτυγχάνεται με τη χρήση τριών κωνικών γραναζιών.

Πειραματικά ευρήματα έδειξαν ότι η ενσωμάτωση ενός Μαγνητικού Ανορθωτή Κίνησης (MMR) οδήγησε σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης για το σύστημα σε σύγκριση με την απουσία του.

Οι **Graves et al.** [3] ανέπτυξαν έναν ανορθωτή κίνησης χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό γραναζιών, ο οποίος μετατρέπει την ενέργεια ταλάντωσης του εκκρεμούς σε μονοκατευθυντική περιστροφή ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, μέσω κωνικών γραναζιών. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η συγκομιδή παρήγαγε ηλεκτρική ισχύ 0,997W σε διέγερση 0,1g και 0,75Hz.

Οι συμβατικοί μηχανισμοί γραναζιών υπερέχουν στην ανόρθωση κίνησης, αλλά θέτουν προκλήσεις όταν εφαρμόζονται σε VEHs μικρής κλίμακας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, έχουν αναπτυχθεί καινοτόμοι VEHs που ενσωματώνουν νέους ανορθωτές κίνησης, όπως ένα σύστημα που χρησιμοποιεί ένα σχοινί υψηλής αντοχής και έναν μονόδρομο συμπλέκτη. Πειραματικές αξιολογήσεις έχουν δείξει ότι αυτά τα συστήματα μπορούν να επιτύχουν μέγιστη κανονικοποιημένη μέση ισχύ εξόδου 4,39W/g² [54].

2.5 Άλλοι τύποι εκκρεμών σε VEHs

2.5.1 Εκκρεμές με μηχανισμό ελατηρίου

Οι VEHs με βάση το εκκρεμές μπορούν να χρησιμοποιούν ελατήρια για διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας εσωτερικού συντονισμού, της παροχής επιπλέον δύναμης επαναφοράς ή για καλύτερη διαχείριση της αποθήκευσης ενέργειας.

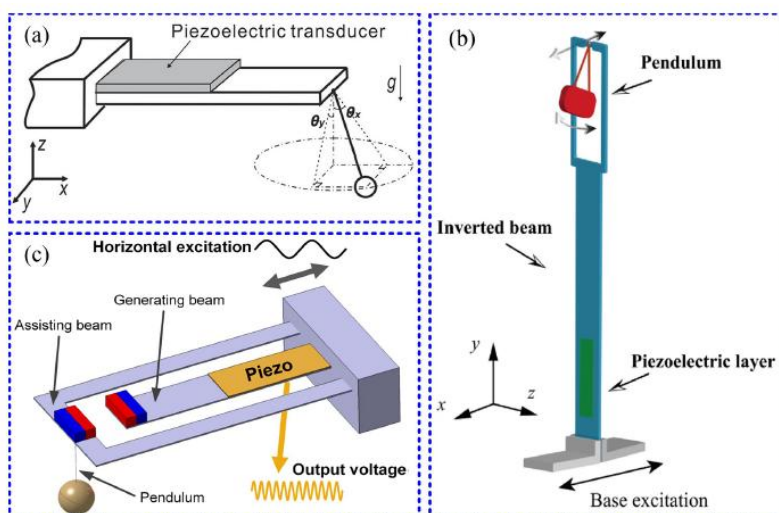
Οι **Jiang et al.** [55] επινόησαν έναν ηλεκτρομαγνητικό VEH που διαθέτει διάταξη εκκρεμούς-ελατηρίου με εσωτερικό συντονισμό. Οι **Lin et al.** [56] ενσωμάτωσαν ένα υποβοηθούμενο ελατήριο στη ράβδο εκκρεμούς μιας τριβοηλεκτρικής νανογεννήτριας για να επιτύχουν μια λειτουργία μαλακής επαφής, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και την απόδοση. Η βιβλιογραφία έχει εξερευνήσει το μηχανισμό εκκρεμούς-ελατηρίου με περιστροφές που κινούνται σε κυκλικές ή ελλειπτικές τροχιές. Οι **Martin et al.** [57] παρουσίασαν ένα εμβιομηχανικό σακίδιο πλάτης που συλλέγει ενέργεια με ένα ανεστραμμένο εκκρεμές που υποστηρίζεται από γραμμικά ελατήρια.

Ωστόσο, η εισαγωγή πρόσθετων ελαστικών εξαρτημάτων μπορεί ενδεχομένως να θέσει σε κίνδυνο την αξιοπιστία του συστήματος, παρά τη βελτίωση της συγκομιδής ενέργειας που προσφέρει.

2.5.2 Εκκρεμές με μηχανισμό ελαστικής δοκού

Οι εύκαμπτες δοκοί χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές συλλογής ενέργειας, ειδικά όταν συνδυάζονται με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς. Διευκολύνουν τη διαμόρφωση συχνότητας σε VEHs που βασίζονται σε εκκρεμές μέσω εσωτερικού συντονισμού. Σε αυτή τη ρύθμιση, το εκκρεμές λειτουργεί ως ο χαμηλότερος ταλαντωτής, ενώ η εύκαμπτη δοκός χρησιμεύει ως ο υψηλότερος ταλαντωτής. Συντονίζοντας τις συχνότητες συντονισμού τους σε αναλογία 1:2, παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταφορά ενέργειας μεταξύ αυτών των δύο ταλαντωτών.

Το Σχήμα 2.7 απεικονίζει διαφορετικές διατάξεις εκκρεμών και ελαστικών δοκών για τη συλλογή ενέργειας. Στην πρώτη διαμόρφωση Σχήμα 2.7 (a), που προτείνεται από τους **Xu et al.** [4], ο άξονας του εκκρεμούς συνδέεται απευθείας με το άκρο μιας οριζόντιας δοκού εξοπλισμένης με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς. Η ανάρτηση του εκκρεμούς επιτρέπει τη μεταφορά της ενέργειας δόνησης στη δοκό για μετατροπή. Στη δεύτερη διάταξη, Σχήμα 2.7(b), μια ανεστραμμένη δοκός με σημαντική παραμόρφωση χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της απόδοσης υπό ασθενή διέγερση, αν και περιορίζει τη κίνηση του εκκρεμούς σε ένα μόνο επίπεδο. Στην τρίτη διάταξη, Σχήμα 2.7(c), ο άξονας του εκκρεμούς στερεώνεται στο άκρο μιας βοηθητικής δοκού και μέσω απωθούμενων ζευγών μαγνητών, αλληλοεπιδρά με τη δοκό, επιτυγχάνοντας μετατροπή συχνότητας δύο σταδίων με αναλογίες 1:2:6.



Σχήμα 2.7: Τυπικοί συνδυασμοί εκκρεμών και ελαστικών δοκών. [a] Οριζόντια δοκός [4]. [b] Ανεστραμμένη δοκός [5]. [c] Δύο δοκοί με μαγνητικό ζεύγος [6].

2.5.3 Εκκρεμές με μαγνητικό μηχανισμό

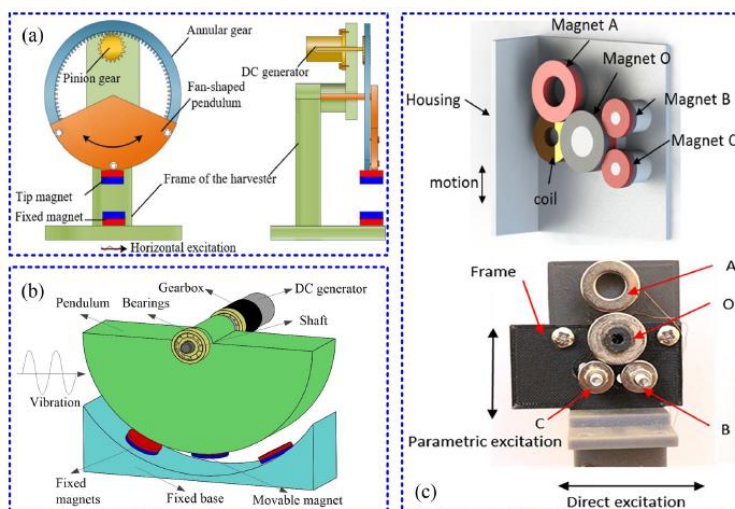
Οι μαγνήτες μπορούν να λειτουργήσουν ως μη συμβατικά ελαστικά στοιχεία με θετική ή αρνητική ακαμψία σε απωστικές ή ελκτικές διατάξεις, αντίστοιχα. Η μη γραμμική μαγνητική τους δύναμη προκαλεί πολλαπλές σταθερές ισορροπίες όταν αυτοί προστίθενται σε ένα μηχανισμό εκκρεμούς, βελτιώνοντας την απόδοση του ταλαντωτή.

Το Σχήμα 2.8 παρουσιάζει τυπικές διατάξεις VEHs που βασίζονται σε εκκρεμές σε συνδυασμό με διαφορετικό αριθμό μαγνητών. Σε μία διάταξη, Σχήμα 2.8(a), δύο

απωθούμενοι μαγνήτες είναι προσαρτημένοι στο κάτω μέρος του εκκρεμούς και του πλαισίου, δημιουργώντας μια δι-σταθερή διαμόρφωση που ενισχύει το εύρος συχνότητας.

Οι **Castagnetti et al.** [58] επιτόνησαν έναν ρυθμιζόμενο VEH εκκρεμούς ρυθμίζοντας την ακαμψία δύο μαγνητών, ενώ οι **Bao et al.** [59] επέκτειναν το εύρος συχνότητας ενός πιεζοηλεκτρικού VEH χρησιμοποιώντας δύο μαγνήτες. Ωστόσο, αυτή η διαμόρφωση τείνει να μετατοπίζει το εύρος λειτουργίας προς υψηλότερες συχνότητες.

Μια άλλη προσέγγιση, Σχήμα 2.8(b), για τη διεύρυνση του εύρους συχνοτήτων προς χαμηλότερες συχνότητες περιλαμβάνει τη χρήση τριών μαγνητών, με τον ένα να είναι στερεωμένος στο πυθμένα του εκκρεμούς και τους άλλους να είναι τοποθετημένοι με ελκτική δύναμη στις 2 πλευρές της βάσης. Αυτή η διάταξη μπορεί να μεταβεί από δύο διαστάσεις στο επίπεδο σε τρεις διαστάσεις στο χώρο. Τέλος, στο Σχήμα 2.8(c), ένας πολυσταθερός Συγκομιστής ενέργειας, που ονομάζεται Μαγνητικό Κυλιόμενο Εκκρεμές, χρησιμοποιεί τέσσερις μαγνήτες. Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει στο εκκρεμές να κυλήσει στην επιφάνεια του κεντρικού μαγνήτη λόγω ελκτικής δύναμης, ενώ οι άλλοι δύο μαγνήτες παρέχουν μη γραμμική απωστική δύναμη, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλο εύρος ζώνης με ελάχιστες μηχανικές απώλειες.



Σχήμα 2.8: Τυπικές διατάξεις συλλεκτών εκκρεμούς με μαγνητικούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούν [a] δύο μαγνήτες [7], [b] τρεις μαγνήτες [8] και [c] τέσσερις μαγνήτες [9].

Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης μαγνητών στη συλλογή ενέργειας από κραδασμούς είναι η μαγνητική τους δύναμη χωρίς επαφή, η οποία ενισχύει σημαντικά την αξιοπιστία του συστήματος σε σύγκριση με τα μηχανικά ελαστικά στοιχεία. Κατά συνέπεια, ορισμένοι VEHs μετατροπής συχνότητας χρησιμοποιούν ζεύγη μαγνητών για να συνδέσουν το ταλαντωτή χαμηλής συχνότητας με το ταλαντωτή υψηλής συχνότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.

Το Σχήμα 2.9 παρέχει μια περίληψη των βελτιώσεων της απόδοσης και των μειονεκτημάτων διάφορων μηχανισμών μετασχηματισμού που χρησιμοποιούνται στη συλλογή ενέργειας με βάση το εκκρεμές. Κάθε μηχανισμός στοχεύει σε συγκεκριμένες βελτιώσεις, όπως στην ενίσχυση της ταχύτητας του εκκρεμούς ή τη ρύθμιση της φοράς περιστροφής, αλλά μπορεί να προκαλέσει πρόσθετη απώλεια ενέργειας και μηχανική πολυπλοκότητα.

Type	Performance improvement	Disadvantage
Gear amplification mechanism	<ul style="list-style-type: none"> • Amplifying velocity output from pendulum shaft to improve transducer efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> • Causing energy loss in gear transmission
Mechanical rectifier mechanism	<ul style="list-style-type: none"> • Converting bidirectional motion of pendulum into unidirectional motion to improve transducer efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> • Causing energy loss in mechanical rectification
Spring mechanism	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency up-conversion through internal resonance; Tuning frequency by introducing additional restoring force; Regulating energy storage to smooth electrical output 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiring additional mechanical elastic element
Elastic beam mechanism	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency up-conversion through internal resonance 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiring additional mechanical elastic element
Magnetic mechanism	<ul style="list-style-type: none"> • Improving frequency bandwidth through multi-stability 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiring magnetic compatibility of application environment

Σχήμα 2.9: Σύγκριση τύπων εκκρεμούς [60].

Μηχανισμοί όπως η ενίσχυση μέσω γραναζιών και οι μηχανικοί ανορθωτές στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης αλλά απαιτούν αντισταθμίσεις μεταξύ βελτίωσης και απώλειας ενέργειας. Οι μηχανισμοί ελατηρίου και ελαστικής δοκού μπορούν να αυξήσουν τη συχνότητα του VEH ή να ρυθμίσουν την αποθήκευση ενέργειας, αν και με πρόσθετα ελαστικά στοιχεία. Οι μηχανισμοί ελαστικής δοκού συχνά συνδυάζονται με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς λόγω δομικών χαρακτηριστικών. Οι μαγνητικοί μηχανισμοί διευρύνουν το εύρος συχνότητας και είναι πιο αποτελεσματικοί από αυτούς με ελαστικά στοιχεία, αλλά απαιτούν συμβατότητα του περιβάλλοντος εφαρμογής με μαγνητικό πεδίο. Ο συνδυασμός δύο ή τριών μηχανισμών ταυτόχρονα μπορεί να βελτιώσει πλήρως την απόδοση.

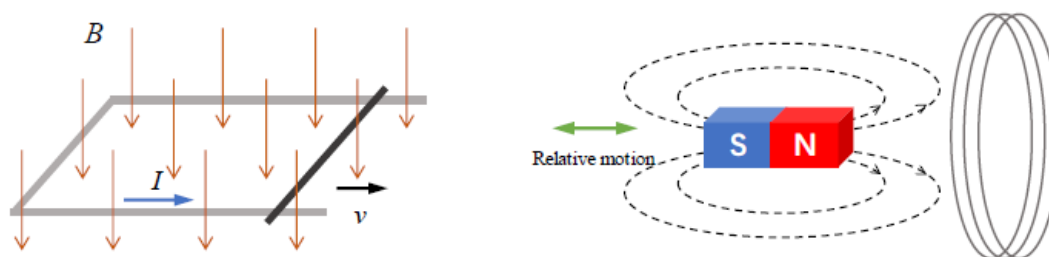
2.6 Εφαρμογές ενσωμάτωσης και σύγκριση VEHs

Η αποτελεσματική ενσωμάτωση των μετατροπών με μηχανισμούς εκκρεμούς έχει ζωτική σημασία. Οι κύριοι τύποι μετατροπών που χρησιμοποιούνται στη συλλογή ενέργειας με βάση το εκκρεμές περιλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητικούς, πιεζοηλεκτρικούς, τριβοηλεκτρικούς και υβριδικούς μετατροπείς. Τα χαρακτηριστικά και οι ρυθμίσεις τους περιγράφονται και αντιπαραβάλλονται παρακάτω.

2.6.1 Ηλεκτρομαγνητικός VEH

Το Σχήμα 2.10 εξηγεί πώς λειτουργούν οι συγκομιστές ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας με βάση την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του **Faraday**, που θεσπίστηκε το 1831. Σύμφωνα με αυτή την αρχή, μια αλλαγή στη μαγνητική ροή μέσα σε ένα κύκλωμα πηνίου μπορεί να παράγει επαγόμενη ηλεκτροκινητική δύναμη. Η συλλογή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, συνήθως προκαλώντας σχετική κίνηση μεταξύ ενός πηνίου και ενός μαγνήτη. Αυτή η κίνηση μπορεί να συμβεί είτε μέσω ενός κινούμενου μαγνήτη και ενός σταθερού πηνίου είτε μέσω ενός κινούμενου πηνίου και σταθερού μαγνήτη.

Στις μηχανές συγκομιδής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, ένας σταθερός μαγνήτης και μια διάταξη πηνίου είναι κοινή, με μηχανική ενέργεια από το περιβάλλον, όπως κραδασμοί ή άνεμος, που αναγκάζουν το μαγνήτη και το πηνίο να μετακινούνται μεταξύ τους.



Σχήμα 2.10: Σχηματικό (αριστερά) και διάταξη (δεξιά) της ηλεκτρομαγνητικής συγκομιδής ενέργειας [61].

Αυτή η επαγόμενη ηλεκτροκινητική δύναμη (EMF) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E = n \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (10)$$

όπου:

E η επαγόμενη ηλεκτροκινητική δύναμη (EMF)

n ο αριθμός των στροφών στο πηνίο

$\Delta\varphi$ η μεταβολή της μαγνητικής ροής του πηνίου

Δt η χρονική μεταβολή

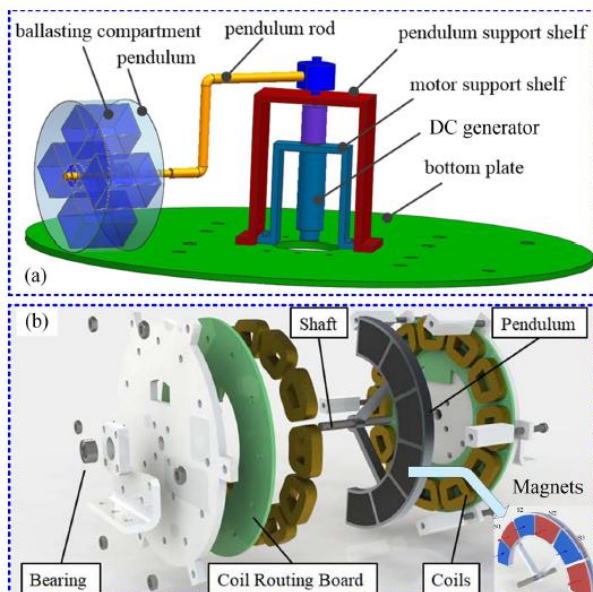
Η εξίσωση (10) δηλώνει ότι το μέγεθος του EMF συνδέεται τόσο με τον αριθμό των στροφών του πηνίου όσο και με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Οι μηχανές συγκομιδής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας παρουσιάζουν αξιοσημείωτα οφέλη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μετατροπής ενέργειας. Για παράδειγμα, επιδεικνύουν ανώτερη απόδοση σε μεγαλύτερες κατασκευές και δεν απαιτούν εξωτερική πηγή τάσης.

Υπάρχουν δυο διαφορετικές διαμορφώσεις για το συνδυασμό ηλεκτρικών γεννητριών με συστήματα εκκρεμούς. Η πρώτη διαμόρφωση, που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11(a), περιλαμβάνει ενσωμάτωση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας στον άξονα του εκκρεμούς. Αυτή η εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιεί είτε μια χειροποίητη γεννήτρια που περιλαμβάνει μόνιμους μαγνήτες και πηνία είτε ένα υπάρχον εμπορικό προϊόν. Επιπλέον, η χρήση ενός πυρήνα σιδήρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της πυκνότητας μαγνητικής ροής μέσω των πηνίων.

Αντίθετα, η δεύτερη διαμόρφωση, Σχήμα 2.11(b), τοποθετεί μαγνήτες στο σώμα του εκκρεμούς και πηνία σε σταθερές σανίδες για να σχηματίσουν μια γεννήτρια. Ενώ αυτή η ρύθμιση προσφέρει συμπαγή ενσωμάτωση, απαιτεί πηνία χωρίς πυρήνα, τα οποία μπορεί

να οδηγήσουν σε μειονεκτική πυκνότητα μαγνητικής ροής. Η προσθήκη ενός σιδερένιου πυρήνα στα πηνία θα μπορούσε να ακινητοποιήσει το εκκρεμές λόγω μαγνητικής έλξης.



Σχήμα 2.11: Ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας ενσωματωμένος στον άξονα [10] [a] και στο εκκρεμές [11] [b] ενός συγκομιστή ενέργειας.

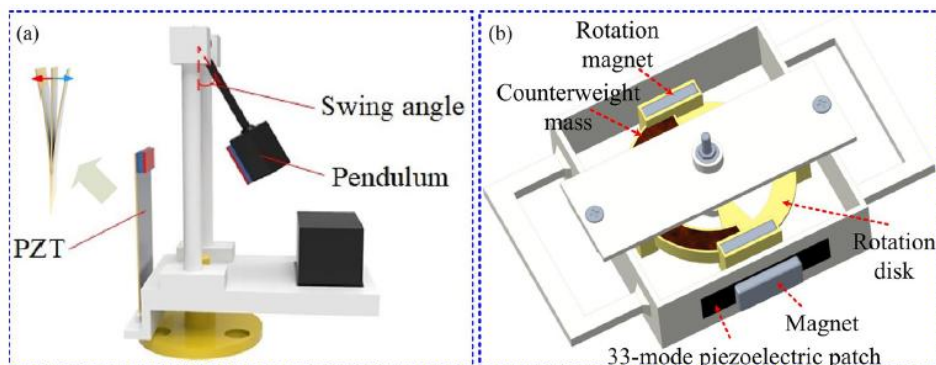
2.6.2 Πιεζοηλεκτρικός VEH

Η συλλογή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ευρέως για τη μετατροπή της ενέργειας δόνησης λόγω των ανώτερων ιδιοτήτων της σε σύγκριση με τις εναλλακτικές τεχνολογίες. Διαθέτει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και τάση και χαμηλότερη μηχανική απόσβεση, σε συνδυασμό με απλή διαδικασία κατασκευής και δομής. Έτσι καθίσταται κατάλληλη για ποικίλες εφαρμογές όπως η συλλογή ενέργειας από θαλάσσια κύματα, από το ανθρώπινο σώμα, έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα και μετατροπή δομικών κραδασμών από γέφυρες και δρόμους.

Ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας λειτουργεί με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπου η μηχανική καταπόνηση προκαλεί ηλεκτρική πόλωση εντός του υλικού. Αυτή η πόλωση μπορεί να ευθυγραμμιστεί είτε κάθετα (31-mode) είτε παράλληλα (33-mode) στην εφαρμοζόμενη κατεύθυνση τάσης. Ωστόσο, λόγω της εγγενούς ευθραυστότητας και της χαμηλής σκληρότητας των πιεζοηλεκτρικών υλικών, η άμεση ενσωμάτωση του μετατροπέα με ένα εκκρεμές παρουσιάζει δυσκολίες.

Μια κοινή στρατηγική περιλαμβάνει τη σύνδεση του πιεζοηλεκτρικού υλικού σε ένα ελαστικό υπόστρωμα όπως ο χαλκός. Εδώ, το εκκρεμές διεγείρει κατά διαστήματα το άκρο της πιεζοηλεκτρικής δοκού, που συνήθως λειτουργεί σε 31-mode, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.12(a).

Μια άλλη λύση σύζευξης που φαίνεται στο Σχήμα 2.12(b) περιλαμβάνει το εκκρεμές που διεγείρει τον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα που λειτουργεί σε 33-mode με κανονική μαγνητική δύναμη.



Σχήμα 2.12: Πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς σε κάθετη [12] [a] και παράλληλη [13] [b] πόλωση.

Πολυάριθμες μελέτες έχουν εμβαθύνει στη συλλογή ενέργειας από εκκρεμές χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά υλικά. Για παράδειγμα, οι **Daniel et al.** [14] επινόησαν ένα χαμηλής κατανάλωσης πιεζοηλεκτρικό σύστημα συλλογής ενέργειας που προορίζεται για υποβρύχια ανάπτυξη, επιτυγχάνοντας μέγιστη πυκνότητα ισχύος $350\mu\text{W}/\text{cm}^3$.

Οι **Shukla et al.** συνέβαλαν δημιουργώντας έναν VEH με εκκρεμές σχεδιασμένο να αξιοποιεί την ενέργεια από τη κίνηση της μέσης του ανθρώπου [15]. Ο σχεδιασμός τους, με πολλαπλές κρούσεις που λυγίζουν συμβατές πιεζοηλεκτρικές μονάδες, πέτυχε μέγιστη ισχύ εξόδου $290\mu\text{W}$ με μονάδες PVDF όταν τα χτυπήματα απέχουν 23mm [16].

Επιπλέον, οι **Bao et al.** [17] ανέπτυξαν έναν φορητό συγκομιστή ενέργειας ανθρώπινης κίνησης με βάση την αρχή του αδρανειακού εκκρεμούς. Η συσκευή τους, που ενσωματώνει έναν μαγνητικό ρότορα για να συλλαμβάνει την κινητική ενέργεια κατά την κίνηση του ανθρώπινου σώματος, έδειξε μέση παραγωγή ισχύος $0,18\text{W}$ στα 6km/h κατά τη διάρκεια πειραμάτων σε ηλεκτρικό διάδρομο.

Οι **Wu et al.** [18] εισήγαγαν έναν ταλαντωτή εκκρεμούς πιεζοηλεκτρικού ελατηρίου που βασίζεται σε μια δομή συνδετήρα. Αυτός ο καινοτόμος σχεδιασμός, που ενσωματώνει ένα εκκρεμές ελατηρίου απευθείας με το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, επέτρεψε τη συλλογή ενέργειας πολλαπλών κατευθύνσεων και εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ισχύ εξόδου $13,29\text{mW}$ στα $2,03\text{Hz}$, απεικονίζοντας την αποτελεσματικότητά του στη μετατροπή ενέργειας.

Οι **Uzun et al.** [62] εξέτασαν τις μη γραμμικότητες στη μετατόπιση και τη ταχύτητα ενός VEH με βάση το εκκρεμές, όπου μια πιεζοηλεκτρική δοκός λειτουργεί ως ράβδος εκκρεμούς. Χρησιμοποιήθηκαν συνδετικά κλιπ ως ελαστικά υποστρώματα για τη σύνδεση του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα.

Συνολικά, η ενσωμάτωση του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα σε ένα εκκρεμές απαιτεί συχνά την ενσωμάτωση πρόσθετων μηχανισμών όπως ελαστικές δοκοί ή μαγνήτες για την αντιμετώπιση προκλήσεων που σχετίζονται με την ευθραυστότητα του υλικού και τη μηχανική συμβατότητα.

2.6.3 Τριβοηλεκτρικός VEH

Ο τριβοηλεκτρικός μετατροπέας, ο οποίος βασίζεται σε συνδυασμό τριβοηλεκτρισμού και ηλεκτροστατικής επαγωγής, έχει συγκεντρώσει σημαντικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια

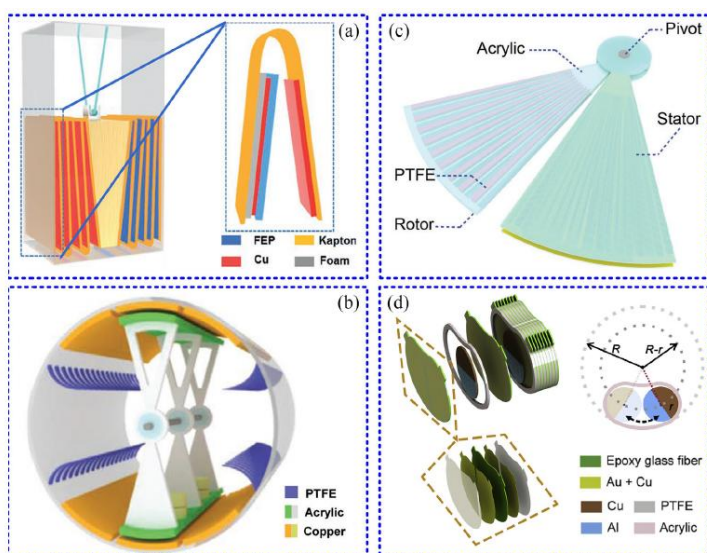
λόγω της ελαφριάς φύσης του, της οικονομικής του τιμής και της μεγάλης γκάμας διαθέσιμων υλικών. Αυτός ο μετατροπέας λειτουργεί δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων μέσω του περιοδικού διαχωρισμού και επαφής δύο υλικών με αντίθετα τριβοηλεκτρικά φορτία, που συνήθως επιτυγχάνονται με κίνηση ολίσθησης ή πίεσης/απελευθέρωσης.

Το Σχήμα 2.13 απεικονίζει διάφορες διαμορφώσεις τριβοηλεκτρικών μετατροπέων ενσωματωμένων σε VEH με βάση το εκκρεμές. Σε μία διάταξη, Σχήμα 2.13(a), πολλαπλά στρώματα τριβοηλεκτρικών μετατροπέων που χρησιμοποιούν φιλμ φθοριούχου προπυλαιθυλενίου συμπίεζονται και απελευθερώνονται από ένα εκκρεμές. Εναλλακτικά, ένα αντιζυγισμένο εκκρεμές και μεμβράνες σχήματος δακτυλίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή ενέργειας δόνησης κάθε κατεύθυνσης.

Μια άλλη διαμόρφωση, Σχήμα 2.13(b), περιλαμβάνει ένα έκκεντρο εκκρεμές εφοδιασμένο με ακρυλικές λωρίδες σε σχήμα τόξου που έρχονται σε επαφή με σταθερές βούρτσες πολυτετραφθοροαιθυλενίου, που χρησιμεύουν ως τριβοηλεκτρικοί μετατροπείς.

Σε διαφορετική διάταξη, Σχήμα 2.13(c), μεμβράνες πολυτετραφθοροαιθυλενίου που συνδέονται με το εκκρεμές ολισθαίνουν σε ένα στάτορα με χτένες ηλεκτροδίων χαλκού, δημιουργώντας μια πτώση δυναμικού όταν το εκκρεμές διεγείρεται. Για να ενισχυθεί η πυκνότητα του επιφανειακού φορτίου και να μειωθεί η απώλεια τριβής, ένα εκκρεμές δύο βαθμών ελευθερίας συνδυάζεται με το τριβοηλεκτρικό μετατροπέα, επιτρέποντας τόσο γραμμική κίνηση για λειτουργία επαφής/διαχωρισμού όσο και περιστροφική κίνηση για αυτοδιέγερση.

Τέλος, ένας τριβοηλεκτρικός VEH που διαθέτει μια συμπαγή κυκλική δομή, Σχήμα 2.13(d), αντί να είναι αναρτημένος σε άξονα, στηρίζει το εκκρεμές σε μια επιφάνεια κύλισης για να διατηρεί τη κίνηση.



Σχήμα 2.13: Τυπικές διατάξεις τριβοηλεκτρικών μετατροπέων σε συγκομιστές ενέργειας με εκκρεμές. [a] με φιλμ φθοριούχου προπυλαιθυλενίου. [19], [b] με βούρτσες πολυτετραφθοροαιθυλενίου. [20], [c] με μεμβράνες πολυτετραφθοροαιθυλενίου. [21] και [d] με επιφάνεια κύλισης [22].

2.6.4 Υβριδικός VEH

Οι υβριδικοί μηχανισμοί συγκομιδής ενέργειας, οι οποίοι συνδυάζουν πολλαπλούς μηχανισμούς μετατροπής, έχουν συγκεντρώσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω των περιορισμών των μηχανών συγκομιδής κινητικής ενέργειας μονής μετατροπής στην αξιοποίηση διαφορετικών πηγών ενέργειας. Ενώ οι δομές εκκρεμούς υπερέρχουν στη συλλογή ενέργειας, η ενσωμάτωση πολλαπλών μηχανισμών μετατροπής μπορεί να βελτιώσει την απόδοση ισχύος αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα αυτών των δομών.

Έχουν προταθεί διάφορα σχέδια υβριδικών VEH που χρησιμοποιούν δομές εκκρεμούς για την ενσωμάτωση τριβοηλεκτρικών, ηλεκτρομαγνητικών και πιεζοηλεκτρικών μηχανισμών συλλογής ενέργειας. Επιδεικνύουν εφαρμογές σε υπεράκτια συστήματα προειδοποίησης και αισθητήρες παρακολούθησης κραδασμών.

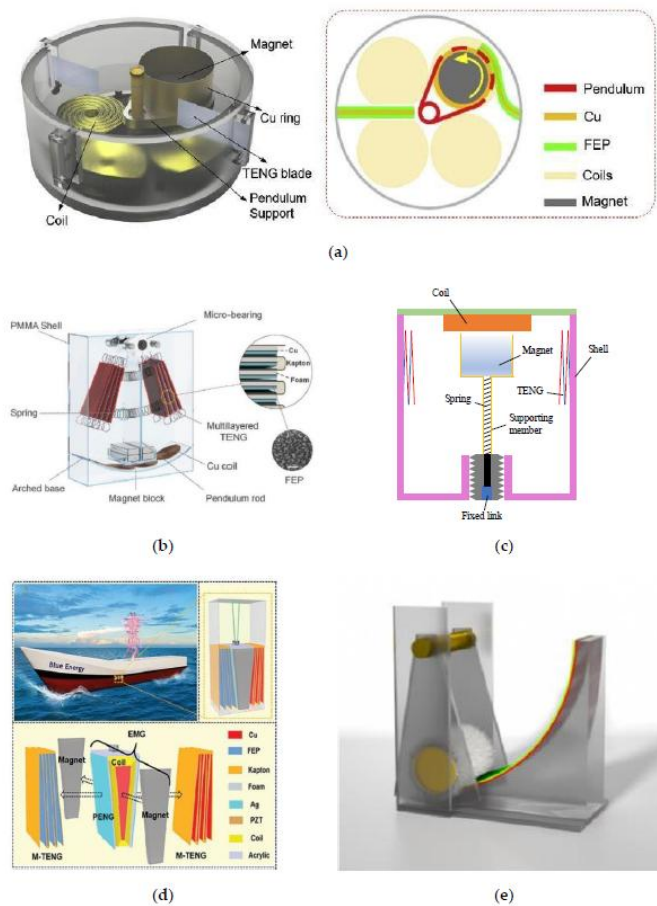
Ηλεκτρομαγνητική-Τριβοηλεκτρική Υβριδική Γεννήτρια, Σχήμα 2.14(a): Οι **Hou et al.** [23] ανέπτυξαν μια υβριδική γεννήτρια βασισμένη σε ένα περιστροφικό εκκρεμές. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει ένα μαγνητικό ρότορα που προκαλεί την παραγωγή ρεύματος σε ένα πηνίο, ενώ ο ρότορας και η λεπίδα του εκκρεμούς χρησιμεύουν ως τριβοηλεκτρική γεννήτρια διαχωρισμού επαφής. Αυτή η γεννήτρια είχε ως αποτέλεσμα μέγιστες πυκνότητες ισχύος $3,25\text{W/m}^2$ και $79,9\text{W/m}^2$ για τους τριβοηλεκτρικούς και ηλεκτρομαγνητικούς συγκομιστές ενέργειας, αντίστοιχα, σε συχνότητα 2Hz και πλάτος 14cm.

Υβριδικός Συγκομιστής υδάτινων κυμάτων, Σχήμα 2.14(b): Οι **Ren et al.** [24] ερεύνησαν ένα υβριδικό VEH κατάλληλο για ασύρματη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Ο σχεδιασμός τους συνδυάζει μια τριβοηλεκτρική μονάδα με μια ηλεκτρομαγνητική μονάδα που χρησιμοποιεί ένα μονό εκκρεμές. Εφαρμόστηκε σε ένα σύστημα προειδοποίησης αποφυγής ανοικτής θαλάσσης, αποδεικνύοντας τις δυνατότητές του για πρακτικές εφαρμογές.

Μη συντονιστικός υβριδοποιημένος συγκομιστής ενέργειας κυμάτων, Σχήμα 2.14(c): Οι **Xie et al.** [25] προτείνουν έναν υβριδοποιημένο συγκομιστή κυματικής ενέργειας που διαθέτει μαγνήτη που υποστηρίζεται από ένα εύκαμπτο εκκρεμές. Σε αυτό το σχέδιο, τέσσερις τριβοηλεκτρικοί VEHs είναι στερεωμένοι σε ένα κοίλο κυλινδρικό κέλυφος, με ένα πηνίο τοποθετημένο στο επάνω κάλυμμα. Υπό την αιώρηση του εκκρεμούς, το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο οδηγεί στη συλλογή τριβοηλεκτρικής ενέργειας, με πειραματικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν μέγιστη ισχύς 470μW και 523mW για τους τριβοηλεκτρικούς και ηλεκτρομαγνητικούς VEHs, αντίστοιχα.

Διαβαθμισμένος Υβριδικός Συγκομιστής, Σχήμα 2.14(d): Οι **Zhang et al.** [26] εισήγαγαν μια υβριδική μηχανή συγκομιδής που ενσωματώνει τριβοηλεκτρικούς, ηλεκτρομαγνητικούς και πιεζοηλεκτρικούς VEHs. Χρησιμοποιώντας μια δομή διπλού εκκρεμούς, αυτό το σύστημα συλλαμβάνει τόσο την κινητική όσο και τη βαρυτική δυναμική ενέργεια των υδάτινων κυμάτων, επιτυγχάνοντας μια αξιοσημείωτη πυκνότητα ισχύος $358,5\text{W/m}^3$.

Υβριδικός Αυτό-τροφοδοτούμενος Αισθητήρας Παρακολούθησης Δονήσεων, Σχήμα 2.14(e): Οι **Fang et al.** [27] σχεδίασαν έναν αισθητήρα παρακολούθησης κραδασμών που ενσωματώνει μια δομή μαγνητικής αιώρησης ως συγκομιστή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και ένα τριβοηλεκτρικό συγκομιστή ενέργειας που μοιάζει με εκκρεμές. Πειραματικές δοκιμές απέδειξαν την ικανότητα φόρτισης ενός πυκνωτή 6,8mF από 0V σε 4,35V μέσα σε 60 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 2.14: [a] Υβριδικός Συγκομιστής ενέργειας με περιστροφικό εκκρεμές. [23], [b] Υβριδικός Συγκομιστής ενέργειας σε σύστημα αποφυγής συγκρούσεων. [24], [c] Μη συντονιζόμενος υβριδισμένος Συγκομιστής ενέργειας. [25], [d] Υβριδικός Συγκομιστής ενέργειας που βασίζεται σε κρεμασμένο εκκρεμές. [26] και [e] Υβριδικός Συγκομιστής ενέργειας που εφαρμόστηκε σε αισθητήρα παρακολούθησης [27].

2.7 Σύγκριση των VEHs

Το Σχήμα 2.15 παρέχει μια σύνοψη μελετών σχετικά με τους VEHs εκκρεμούς, με βάση το μηχανισμό μετατροπής, την εφαρμογή, τις συνθήκες εργασίας και την ισχύ εξόδου τους. Το σύστημα μονού εκκρεμούς είναι το βασικό σημείο, ενώ μερικές έρευνες ασχολούνται με συστήματα διπλού εκκρεμούς. Τα συστήματα διπλού εκκρεμούς παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις στη συλλογή ενέργειας, αποτελώντας αφορμή για περαιτέρω έρευνα. Τα συστήματα μονού εκκρεμούς χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μετατροπή ενέργειας εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας, όπως η κινητική ενέργεια των ωκεανών και η ενέργεια της ανθρώπινης κίνησης.

Investigators	Mechanism	Application	Structure	Working Condition	Average Output Power	Power Density	NPD
Ding et al. [48]	Electromagnetic	Ocean kinetic energy harvesting	Single pendulum	0.2 Hz and 0.24 m/s ²	300 mW	-	3453.8 kg/m ³
Cai et al. [50]	Electromagnetic	Ultra-low frequency wave energy harvesting	Single pendulum	0.12 m (wave height) and 0.7 s (wave period)	111 mW	-	-
Fan et al. [67]	Electromagnetic	Ultra-low frequency mechanical energy harvesting	Single pendulum	4 Hz and 40° (amplitude of swing)	7.6 mW	-	-
Zhou et al. [56]	Electromagnetic	Human motion energy harvesting	Single pendulum	8 km/h (running speed)	0.38 mW	23 μW/g	-
Zhang et al. [80]	Piezoelectric	Kinetic energy harvesting in driverless buses	Single pendulum	-	1.233 mW	-	-
Bao et al. [88]	Piezoelectric	Multi-directional energy harvesting	Single pendulum	7.5 Hz and 0.3 g	0.64 mW	-	-
Wu et al. [84]	Piezoelectric	Ultra-low frequency mechanical energy harvesting	Single pendulum	2 Hz and 0.37 g	2 mW	-	-
Rui et al. [98]	Triboelectric	Ocean wave energy harvesting	Single pendulum	0.8 Hz	0.87 mW	1.1 W/m ³	-
Zhang et al. [99]	Triboelectric	Ocean wave energy harvesting	Single pendulum	-	12.3 mW	-	-
Xie et al. [104]	Triboelectric and electromagnetic	Ultra-low frequency water wave energy harvesting	Single pendulum	-	0.47 mW (Triboelectric) and 523 mW (electromagnetic)	-	-
Chen et al. [119]	Piezoelectric	Wind energy harvesting	Double pendulum	557.31 rpm	1.25 mW	-	-
Izadgoshasb et al. [120]	Piezoelectric	Human motion energy harvesting	Double pendulum	2 Hz	86.12 μW	-	-
Carandell et al. [117]	Electromagnetic	Ocean wave energy harvesting	Double pendulum	1.43 m (wave height) and 0.7 s (wave frequency)	179 μW	-	-
Chen et al. [118]	Triboelectric and electromagnetic	Ocean wave energy harvesting	Double pendulum	2.5 Hz	15.21 μW (Triboelectric) and 1.23 mW (Electromagnetic)	-	-
Zaouali et al. [115]	Electromagnetic	Energy harvesting for rotating system	Double pendulum	89 rpm	9.5 mW	-	-

Σχήμα 2.15: Σύγκριση διάφορων συλλεκτών ενέργειας με βάση τα συστήματα εκκρεμούς που χρησιμοποιούν [60].

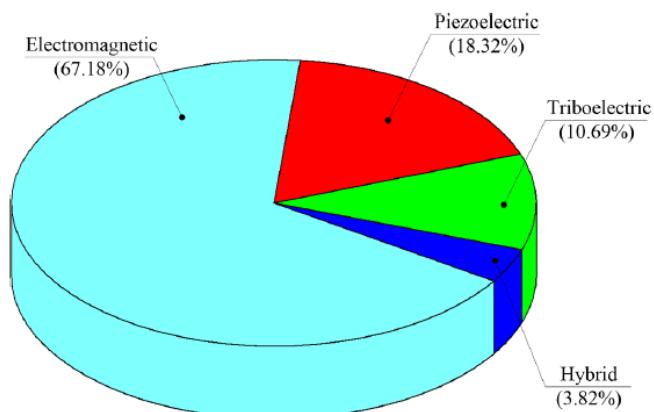
Τα συστήματα εκκρεμούς περιλαμβάνουν άξονες, ράβδους και μετατροπείς ενσωμάτωσης που συνδέονται περίπλοκα με αυτά τα εξαρτήματα. Το Σχήμα 2.16 περιγράφει την καταλληλότητα των μετατροπών με διάφορους μηχανισμούς εκκρεμούς. Οι ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς κατασκευάζονται συνήθως με τη τοποθέτηση μαγνητών σε άξονες εκκρεμούς ή στα σώματα του εκκρεμούς και πηνία σε σταθερά περιβλήματα. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας σε εύκαμπτες ράβδους εκκρεμούς, ενώ οι τριβοηλεκτρικοί μετατροπείς μπορούν να ενσωματωθούν τοποθετώντας δύο τριβοηλεκτρικά υλικά στα σώματα του εκκρεμούς και στα σταθερά περιβλήματά του, αντίστοιχα.

Transducers		Parts of pendulum mechanisms		
Type	Principle	Shaft	Rod	Body
Electromagnetic	Relative motion between coils and magnets	★ ★ ★	★	★ ★ ★
Piezoelectric	Mechanical stress applied to piezoelectric material	★	★ ★ ★	★ ★
Triboelectric	Contact/separate motion of two triboelectric materials	★ ★	★	★ ★ ★

Σχήμα 2.16 Διαβάθμιση συμβατότητας μεταξύ μετατροπών και εξαρτημάτων μηχανισμών εκκρεμούς (περισσότεροι αστερίσκοι υποδεικνύουν μεγαλύτερη συμβατότητα) [60].

Το Σχήμα 2.17 δείχνει ότι οι ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς κυριαρχούν στην πλειονότητα των VEHs με βάση το εκκρεμές, αντιπροσωπεύοντας το 67,18% του συνόλου. Οι υβριδικοί μετατροπείς έχουν τη μικρότερη αναλογία, που αντιστοιχεί στο 3,82%. Οι ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς ενσωματώνονται ευκολότερα με τον μηχανισμό του εκκρεμούς και προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρικής απόδοσης, προσελκύοντας περισσότερη προσοχή για

περεταίρω έρευνα. Οι πιεζοηλεκτρικοί και τριβοηλεκτρικοί μετατροπείς σε συνδυασμό με εκκρεμή αποκτούν επίσης αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον.



Σχήμα 2.17: Αναλογίες διαφορετικών μετατροπών βάση σχετικής βιβλιογραφίας 113 άρθρων [60].

2.8 Πρακτικές εφαρμογές των VEHs

Λόγω της αξιοσημείωτης ικανότητάς του να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά σε κραδασμούς χαμηλής συχνότητας, ο μηχανισμός του εκκρεμούς επιδεικνύει επάρκεια στη συλλογή ενέργειας από διάφορες πηγές κραδασμών. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι πηγές για τη συλλογή ενέργειας με χρήση συστημάτων που βασίζονται σε εκκρεμές περιλαμβάνουν τα κύματα των ωκεανών, την κίνηση των οχημάτων, την ανθρώπινη κίνηση, τους δομικούς κραδασμούς και τις δονήσεις που προκαλούνται από τη ροή των ρευστών. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε ασύρματους αισθητήρες και φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Περαιτέρω διευκρίνιση σχετικά με το θέμα παρέχεται παρακάτω.

2.8.1 Συγκομιδή ενέργειας από βιομηχανικές εγκαταστάσεις

Η συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις των βιομηχανικών μηχανημάτων προσφέρει μια καινοτόμο λύση για τη δέσμευση ενέργειας που διαφορετικά θα έμενε ανεκμετάλλευτη. Στοιχεία μηχανών όπως ρουλεμάν, κινητήριοι άξονες, γρανάζια και μηχανές όπως οι τórνοι, παράγουν μηχανικές δονήσεις κατά τη λειτουργία τους. Αντί αυτές οι δονήσεις να χάνονται ως θερμότητα ή θόρυβος, μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διαφόρων τεχνικών συγκομιδής.

Για παράδειγμα, οι δονήσεις περιστροφής και κατεργασίας στους τórνους μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά υλικά ή ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Τα ρουλεμάν και οι κινητήριοι άξονες, που υφίστανται συνεχή κίνηση και τριβή, χρησιμεύουν επίσης ως αξιόπιστες πηγές μηχανικής ενέργειας. Ομοίως, η σύμπλεξη και η περιστροφή γραναζιών δημιουργούν επαναλαμβανόμενες δυνάμεις που είναι ιδανικές για τη συγκομιδή ενέργειας.

Για παράδειγμα, η SKF, ένας παγκόσμιος κατασκευαστής ρουλεμάν, έχει αναπτύξει συστήματα που ενσωματώνουν πιεζοηλεκτρικούς συλλέκτες στα ρουλεμάν τους για την τροφοδοσία μικρών αισθητήρων. Αυτοί οι αισθητήρες επικοινωνούν με κεντρικά συστήματα παρακολούθησης, μειώνοντας την ανάγκη για εξωτερικές πηγές ενέργειας ή συχνές αντικαταστάσεις μπαταριών, μειώνοντας έτσι το κόστος συντήρησης και βελτιώνοντας τον χρόνο λειτουργίας των μηχανημάτων. Αυτό είναι ιδιαίτερα πολύτιμο σε περιβάλλοντα όπου η πρόσβαση στα ρουλεμάν ή η αντικατάσταση των μπαταριών είναι δύσκολη, όπως σε απομακρυσμένες τοποθεσίες.

2.8.2 Συγκομιδή ενέργειας από οχήματα

Τα οχήματα, αυτοκίνητα, λεωφορεία και τρένα, είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες που παρακολουθούν συνεχώς διάφορες πτυχές της απόδοσής τους, όπως η πίεση των ελαστικών και η θερμοκρασία. Η συγκομιδή ενέργειας των οχημάτων αναδεικνύεται ως μια αξιόπιστη και αποτελεσματική λύση για τη παροχή ισχύος σε αυτούς τους αισθητήρες, καθώς παρουσιάζουν πολλαπλές πηγές κραδασμών, που προέρχονται από εξαρτήματα όπως τροχοί, αναρτήσεις και σιδηροδρομικές γραμμές.

Οι **Wang et al.** επινόησαν ένα σταθμισμένο σύστημα εκκρεμούς για να συλλαμβάνει την ενέργεια των τροχών, ιδιαίτερα για τα συστήματα παρακολούθησης της πίεσης των ελαστικών [63,64]. Ενσωμάτωσαν μη γραμμικές δυνάμεις επαναφοράς και φυγόκεντρες επιδράσεις για να ενισχύσουν το λειτουργικό εύρος των VEHs με βάση το εκκρεμές σε συνθήκες περιστροφής [65,66]. Επιπλέον, ένα αδρανειακό εκκρεμές ενσωματώθηκε στις αναρτήσεις για να βελτιώσει τόσο την άνεση της οδήγησης όσο και την αποδοτικότητα της συγκομιδής ενέργειας [67].

Οι πιεζοηλεκτρικοί VEHs με μηχανισμό εκκρεμούς αναπτύχθηκαν επίσης για να παρέχουν ισχύ σε αδρανειακά συστήματα μέτρησης και αισθητήρες επιτάχυνσης σε αυτόνομα λεωφορεία και τρένα, διευκολύνοντας την παρακολούθηση της ασφάλειας. Καθώς τα ευφυή συστήματα μεταφορών συνεχίζουν να εξελίσσονται, η ζήτηση για πρόσθετους αισθητήρες και ηλεκτρονικά για την αντίληψη του περιβάλλοντος χώρου και τη δυνατότητα αυτόνομων λειτουργιών αυξάνεται, τονίζοντας την αυξανόμενη σημασία των τεχνολογιών συλλογής ενέργειας.

2.8.3 Συγκομιδή ενέργειας από ανθρώπινες κινήσεις

Η αυξανόμενη ζήτηση για τη παρακολούθηση της υγείας του ανθρώπου, αναδεικνύει τη σημασία των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών και των ιατρικών εμφυτευμάτων. Οι παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, είναι περιορισμένες σε χωρητικότητα και διάρκεια ζωής, στρέφοντας το ενδιαφέρον στη συλλογή ενέργειας από κραδασμούς, ως εναλλακτική λύση.

Αυτή η μέθοδος συλλέγει την κινητική ενέργεια από την ανθρώπινη κίνηση, συνήθως συχνότητας κάτω των 5Hz. Διάφοροι VEHs με βάση το εκκρεμές έχουν αναπτυχθεί για ανθρώπινες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων συσκευών που συνδέονται με τους καρπούς ή τους αστραγάλους για την αξιοποίηση της ενέργειας ταλάντευσης κατά το περπάτημα ή το τρέξιμο.

Οι **Shukla et al.** [68] δημιούργησαν ένα πιεζοηλεκτρικό VEH εκκρεμούς ο οποίος προσαρμόζεται στη μέση για την εκμετάλλευση της εμβιομηχανικής ενέργειας από το βάδισμα. Επίσης, γίνεται έρευνα πάνω στη συλλογή ενέργειας για ιατρικά εμφυτεύματα, όπως η χρήση μικροσκοπικών εκκρεμών για την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας από μια καρδιά που πάλλεται με σκοπό να τροφοδοτήσουν βηματοδότες.

Πρόσφατα, οι ελαστικές μηχανές συγκομιδής ενέργειας κατάλληλες για χρήση στους εύκαμπτους ιστούς του ανθρώπινου σώματος έχουν αναδειχθεί ως πολλά υποσχόμενες επιλογές. Αυτοί οι δύο τύποι VEHs μπορούν να συνεργαστούν για να μετατρέψουν την εμβιομηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια για αυτοσυντηρούμενα φορητά ηλεκτρονικά. Σε αντίθεση με τους VEHs εκκρεμούς, οι οποίοι έχουν περιορισμένη ευελιξία αλλά μπορούν να συλλάβουν περισσότερη κινητική ενέργεια, οι εκτατοί VEHs προσφέρουν μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα.

2.8.4 Συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις κτηρίων

Οι κραδασμοί απαντώνται συνήθως σε διάφορες μηχανικές κατασκευές όπως γέφυρες, ψηλά κτίρια και σήραγγες λόγω παραγόντων όπως οι σεισμοί, ο άνεμος και η ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτές οι δονήσεις μπορεί να θέτουν σε κίνδυνο τη σταθερότητα των κατασκευών, επομένως οι συμβατικές μέθοδοι χρησιμοποιούν υλικά που διαχέουν ενέργεια ή συσκευές όπως συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας για τη μείωση των κραδασμών.

Ωστόσο, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μετατροπή των δομικών δονήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία θα μπορούσε να τροφοδοτήσει αισθητήρες για τη παρακολούθηση των κραδασμών. Για να επιτευχθεί ταυτόχρονα η συγκομιδή ενέργειας και η μείωση των κραδασμών, οι ερευνητές έχουν προτείνει ένα αυτοπαραμετρικό σύστημα συλλογής ενέργειας. Αυτό το σύστημα συνδυάζει ένα συγκομιστή ενέργειας με βάση το εκκρεμές και έναν απορροφητή κραδασμών. Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται μπορούν είτε να περιστρέφονται είτε να κινούνται γραμμικά και είναι ενσωματωμένοι με τον άξονα ή τη ράβδο του εκκρεμούς.

Ορισμένες μελέτες έχουν διερευνήσει αναδημιουργούμενους συντονισμένους αποσβεστήρες μάζας με μηχανισμούς εκκρεμούς και ηλεκτρομαγνητικούς αποσβεστήρες για κτίρια και υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Αυτά τα συστήματα μπορούν να παράγουν σημαντική ισχύ, η οποία μπορεί να αποθηκευτεί σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.

2.8.5 Συγκομιδή ενέργειας από τη ροή των ρευστών

Η ροή των ρευστών, που περιλαμβάνει τη κίνηση του ανέμου και του νερού, παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες αξιοποίησης της κινητικής ενέργειάς της. Σε περιπτώσεις ακανόνιστων ή αδύναμων ροών, υπάρχει δυνατότητα αυτοδιέγερσης της ροής και συλλογής της ενέργειας δόνησης που προκύπτει. Ο μηχανισμός εκκρεμούς αναδεικνύεται ως μια βιώσιμη επιλογή για τη συλλογή ενέργειας σε τέτοιες περιπτώσεις.

Ο **Zhang και οι συνεργάτες του** [69] επινόησαν ένα σύστημα συλλογής ενέργειας που περιλαμβάνει ένα κυλινδρικό εκκρεμές ενσωματωμένο σε μια πιεζοηλεκτρική δοκό. Όταν διεγείρονται από τον άνεμο, ο κύλινδρος και η δοκός υφίστανται δόνηση που προκαλείται από τη κίνηση στροβιλισμού, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια για ηλεκτρονικές

συσκευές. Για να ενισχυθεί τόσο η απόδοση όσο και το εύρος συχνοτήτων, εισήχθη μια πρόσθετη μη γραμμική μαγνητική δύναμη στο αναρτημένο εκκρεμές.

Μια άλλη πρακτική εφαρμογή περιλαμβάνει μια πλατφόρμα υποβρύχιας πρόσδεσης εξοπλισμένη με αισθητήρες για την παρακολούθηση παραμέτρων όπως η αγωγιμότητα, η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού. Εδώ, ο VEH με βάση το εκκρεμές μπορεί να προσδεθεί στην πλατφόρμα για να συλλέγει την ενέργεια δόνησης από τη ροή του νερού και να τροφοδοτεί με βιώσιμο τρόπο τους αισθητήρες, για εκτεταμένες χρονικές περιόδους.

2.9 Εξισώσεις κινηματικής

2.9.1 Ομαλά επιβραδυνόμενη περιστροφική κίνηση

Ο τύπος που περιγράφει την ομαλά επιβραδυνόμενη περιστροφική κίνηση δίσκου, λόγω τριβής, είναι ο εξής:

$$\Omega(t) = \Omega(t_0)e^{-\frac{c(t-t_0)}{J}}$$

όπου:

$\Omega(t)$ η γωνιακή ταχύτητα του δίσκου

$\Omega(t_0)$ η γωνιακή ταχύτητα του δίσκου τη χρονική στιγμή t_0

c ο συντελεστής απόσβεσης λόγω τριβών

J η ροπή αδράνειας του δίσκου

Σε περίπτωση που ο δίσκος φέρει οπή στην επιφάνειά του, η ροπή αδράνειάς του υπολογίζεται ως εξής:

$$J = \frac{1}{2}M(R^2 + R_{inner}^2) \quad \text{και} \quad M = \rho\pi h(R^2 - R_{inner}^2)$$

όπου:

M η μάζα του δίσκου

R η εξωτερική ακτίνα του δίσκου

R_{inner} η ακτίνα της οπής του δίσκου

h το πάχος του δίσκου

ρ η πυκνότητα του υλικού

2.9.2 Κινηματική ταλάντωσης φυσικού εκκρεμούς

Η φθίνουσα ταλάντωση που εκτελεί το εκκρεμές περιγράφεται από την ακόλουθη Σ.Δ.Ε. 1ης τάξης:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left[\frac{\theta(2)}{\frac{-c_b\theta(2)(-m_{slot})gl_{slot}\sin(\theta(1))}{I_{disc}}} \right], \quad \vec{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

όπου:

$\theta(1)$ η γωνία του εκκρεμούς

$\theta(2)$ η γωνιακή ταχύτητα του εκκρεμούς

c_b ο συντελεστής απόσβεσης λόγω τριβής

m_{slot} η μάζα που έχει αφαιρεθεί/προστεθεί

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

l_{slot} η απόσταση του Κ.Β. του slot/έκκεντρης μάζας από τον άξονα περιστροφής του εκκρεμούς

I_{total} η συνολική ροπή αδράνειας του δίσκου

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι:

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \theta_2$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \frac{-c_b\theta_2(-m_{slot})gl_{slot}\sin(\theta_1)}{I_{disc}}$$

Η Σ.Δ.Ε. μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{dt} = \theta_2 \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{-c_b\theta_2(-m_{slot})gl_{slot}\sin(\theta_1)}{I_{disc}} \end{cases}$$

2.9.3 Κινηματική ταλάντωσης φυσικού εκκρεμούς υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου

Η φθίνουσα ταλάντωση που εκτελεί το εκκρεμές περιγράφεται από την ακόλουθη Σ.Δ.Ε. 1ης τάξης:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left[\frac{\theta(2)}{\frac{-c_b\theta(2) - B \sin(\frac{n_p}{2}\theta(1))}{I_{disc}}} \right], \quad \vec{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

όπου:

$\theta(1)$ η γωνία του εκκρεμούς

$\theta(2)$ η γωνιακή ταχύτητα του εκκρεμούς

c_b ο συντελεστής απόσβεσης λόγω τριβής

I_{disc} η ροπή αδράνειας του δίσκου

B η ροπή της δύναμης επαναφοράς που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο

n_p ο αριθμός των ζευγαριών μαγνητικών πόλων στο εκκρεμές

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι:

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \theta_2$$

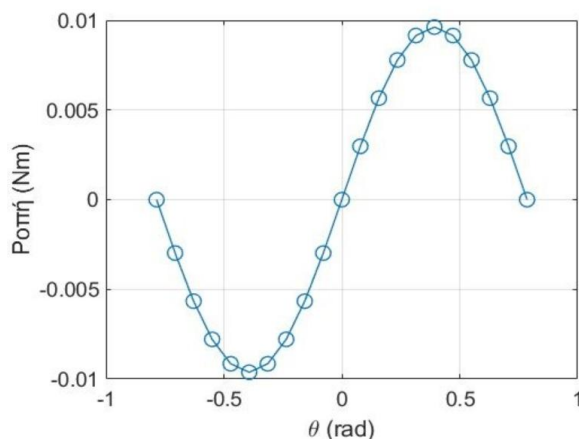
$$\frac{d\theta_2}{dt} = \frac{-c_b\theta(2) - B \sin(\frac{n_p}{2}\theta(1))}{I_{disc}}$$

Η Σ.Δ.Ε. μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{dt} = \theta_2 \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{-c_b\theta(2) - B \sin(\frac{n_p}{2}\theta(1))}{I_{disc}} \end{cases}$$

Στο 2ο κλάδο της Σ.Δ.Ε, ο όρος $-B \sin(\frac{n_p}{2}\theta(1))$ αντιπροσωπεύει τη μαγνητική ροπή επαναφοράς που δρα στο ρότορα. Η συνάρτηση ημιτόνου μοντελοποιεί τη περιοδική φύση της ροπής, η οποία ταλαντώνεται καθώς ο ρότορας περιστρέφεται.

Ο παράγοντας $\frac{n_p}{2}$ ρυθμίζει τη συχνότητα των ταλαντώσεων, εξασφαλίζοντας ότι η ροπή ολοκληρώνει n_p πλήρεις κύκλους κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής του ρότορα κατά 2π rad, γι' αυτό και είναι διαιρεμένος δια 2.



Σχήμα 2.18: Μαγνητική ροπή επαναφοράς συναρτήσει της γωνιακής μετατόπισης.

Στο Σχήμα 2.18 απεικονίζεται η επίδραση της ροπής επαναφοράς B κατά τη γωνιακή μετατόπιση θ του εκκρεμούς. Για αριθμό πόλων $n_p = 2$ παρατηρείται πως η ροπή εκτελεί μια πλήρη ταλάντωση σε μια πλήρη περιστροφή του ρότορα. Η μαγνητική ροπή επαναφοράς B του συστήματος λαμβάνει τιμές από -0.01Nm έως 0.01Nm εκτελώντας μια ομαλή περιοδική ταλάντωση με μηδενισμό της για γωνία 0rad .

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

3.1 Τριβή απόσβεσης σε κυκλικό δίσκο

3.1.1 Κατασκευή της πειραματικής διάταξης

Για τον υπολογισμό των συνθηκών ταλάντωσης του κινούμενου δίσκου (ρότορας) ο οποίος θα έχει τη λειτουργία εκκρεμούς, χρειάζεται πρωτίστως να υπολογιστεί η τριβή απόσβεσης που επιφέρει το ρουλεμάν.

Για να γίνει αυτό θα πρέπει να κατασκευασθεί ένας ισοδύναμος δίσκος, παραπλήσιας ροπής αδράνειας και μάζας με αυτή του ρότορα του VEH. Συνεπώς θα πρέπει να καθοριστούν οι διαστάσεις του εν λόγω δίσκου καθώς και το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για τη κατασκευή του. Το υλικό που επιλέγεται είναι η Πολυακετάλη (POM) λόγω χαμηλού κόστους, υψηλής κατεργασιμότητας στο τόρνο και μεγάλης διαθεσιμότητας στο εμπόριο.

Συνεπώς, για να υπολογισθεί ο συντελεστής απόσβεσης που επιφέρει η τριβή του ρουλεμάν στο δίσκο θα πρέπει πρώτα να βρεθεί πειραματικά η γωνιακή ταχύτητά του.

Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί ένας Rotary Encoder, ο οποίος μπορεί να μετρήσει με μεγάλη ακρίβεια τη γωνία που διαγράφει ο δίσκος κατά τη περιστροφή του. Θα χρειαστεί λοιπόν ο δίσκος να «συνδεθεί» με κάποιο τρόπο με τον Encoder, έτσι ώστε να μπορούν να περιστρέφονται μαζί.

Η σύνδεση αυτή θα γίνει με τη κατασκευή μικρού άξονα αλουμινίου ο οποίος θα εδράζεται με ρουλεμάν και στα δύο άκρα του θα προσαρτηθούν ο δίσκος και ο Encoder, αντίστοιχα. Ο Encoder δε, φέρει πλαστικό Coupling, ενσωματωμένο στον άξονά του με διάμετρο οπής Φ8.

Η διάμετρος του άξονα στα δύο άκρα του πρέπει να είναι Φ8, όπως και η οπή του ισοδύναμου δίσκου. Η οπή του δίσκου θα πρέπει να είναι ομόκεντρη με τον άξονα του Encoder, συνεπώς θα πρέπει να κατασκευασθούν κατάλληλες βάσεις, στις οποίες θα εδράζεται ο Encoder και ο κινούμενος άξονας με το δίσκο, αντίστοιχα.

Στο εφαρμοστήριο του εργαστηρίου υπάρχει μια μέγγενη η οποία χρησιμοποιείται για την αλλαγή κοπτικών εργαλείων και φέρει εκατέρωθεν της οπές διαφορετικής διαμέτρου. Η στήριξη του Encoder στη μια οπή της μέγγενης και του άξονα στην άλλη κρίνεται ιδανική, καθώς με σωστό σχεδιασμό των βάσεων στήριξης θα μπορέσουν να βρίσκονται ομόκεντρα μεταξύ τους.

Για τη κατασκευή της βάσης που θα φέρει τον Encoder γίνεται μέτρηση της διαμέτρου και του βάθους της αριστερής οπής της μέγγενης καθώς και της διαμέτρου του Encoder. Για να διασφαλιστεί ότι ο το σώμα του Encoder δε περιστρέφεται πάνω στη βάση του ανοίγονται στη βάση 3 τρύπες Φ3, για τη χρήση βιδών M3.

Για τη κατασκευή της βάσης που θα εδράζεται ο άξονας γίνεται μέτρηση της διαμέτρου και του βάθους της δεξιάς οπής της μέγγενης και της εξωτερικής διαμέτρου του ρουλεμάν που θα φέρει τον άξονα. Εφόσον ο άξονας έχει διάμετρο Φ8mm στις άκρες του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρουλεμάν διαμέτρου οπής Φ10mm, εξωτερικής διαμέτρου Φ15 και πάχους 3mm. Συνεπώς, η εσωτερική οπή της βάσης που θα φέρει το ρουλεμάν πρέπει να έχει διάμετρο Φ15mm και βάθος 3mm.

Έπειτα από μετρήσεις του βάθους των οπών της μέγγενης και του Coupling το τελικό μήκος του άξονα ορίζεται στα 60mm, με αποτέλεσμα ο δίσκος να προεξέχει μόλις κατά 2mm από τη δεξιά πλευρά της μέγγενης. Επιπλέον διαμορφώνεται κατάλληλη πατούρα στον άξονα για τη τοποθέτηση του ρουλεμάν εσωτερικής οπής Φ10mm.

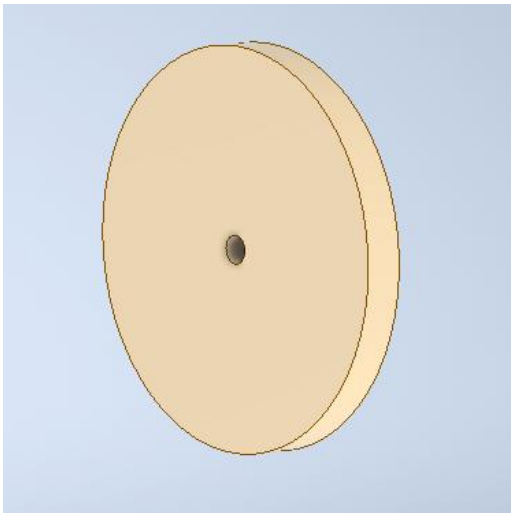
Κατά τη συναρμολόγηση της διάταξης, αρχικά, το ρουλεμάν προσαρμόζεται με χαλαρή συναρμογή στη πατούρα που φέρει ο άξονας. Στη συνέχεια η εξωτερική κοιλότητα του ρουλεμάν προσαρμόζεται στη κοιλότητα της δεξιάς βάσης και η βάση με τη σειρά της στην αντίστοιχη οπή της μέγγενης.

Ο Encoder προσαρμόζεται στην αριστερή βάση και ακινητοποιείται πάνω της με 3 βίδες M3. Η βάση με τη σειρά της, προσαρμόζεται στην αριστερή οπή της μέγγενης και ταυτόχρονα ο άξονας προσαρμόζεται στο Coupling του Encoder.

Για το πείραμα χρησιμοποιείται έτοιμος κυκλικός δίσκος πολυακετάλης που υπήρχε στο εργαστήριο, καθώς οι διαστάσεις του είναι παραπλήσιες με αυτές που αναμένεται να έχει ο ρότορας του VEH.

Η κεντρική οπή που θα φέρει ο δίσκος θα πρέπει να είναι ίση με τη διάμετρο του άξονα, δηλαδή Φ8mm οπότε και διανοίγεται σε αυτόν με χρήση κατάλληλου κονδυλίου.

Με χρήση ηλεκτρονικού παχύμετρου, μετρίεται το πάχος του σε $h = 11mm$ και η διάμετρος του σε Φ112mm. η ροπή αδράνειας του δίσκου ανέρχεται σε $I_{center} = 241,128 kg \cdot mm^2$ παραπλήσια της επιθυμητής.



Σχήμα 3.1: Μοντέλο CAD του κυκλικού δίσκου.

3.1.2 Προετοιμασία και διενέργεια του πειράματος

Για τη καταγραφή του σήματος εξόδου του Encoder χρησιμοποιείται ο παλμογράφος Pico σε συνδυασμό με το λογισμικό PicoScope7 T&M. Ο Encoder (Autonics E50), βάση του datasheet, διαθέτει 3 φάσεις ως εξόδους σήματος (A, B και Z) με έξοδο τύπου Totem Pole. Ο συγκεκριμένος τύπος σήματος εξόδου περιλαμβάνει παλμούς οι οποίοι κυμαίνονται μεταξύ των ± 5 Volts, δηλαδή της υψηλής και χαμηλής τάσης εξόδου του Encoder.

Το συγκεκριμένο μοντέλο, βάση της κωδικοποίησής του, μπορεί να αποδώσει μια πλήρη περιστροφή σε 3600 παλμούς περιόδου T. Συνεπώς, ο κάθε παλμός αντιστοιχεί σε περιστροφή του δίσκου κατά 0,1 μοίρες.

Για την έναρξη του πειράματος γίνεται η απαραίτητη συνδεσμολογία. Το καφέ καλώδιο του Encoder είναι η τροφοδοσία του (+V) οπότε συνδέεται με τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος 12V και 2A, καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο λειτουργεί με τροφοδοσία 12-24VDC. Για τη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας του δίσκου απαιτείται μόνο η φάση A του Encoder οπότε το μαύρο καλώδιο συνδέεται στο CH1 του παλμογράφου. Η γείωση της φάσης (μπλε καλώδιο) συνδέεται αντίστοιχα με τη γείωση του CH1. Τέλος, η γείωση του πλαισίου του Encoder (F.G.) βιδώνεται πάνω στη μέγγενη.

Με σκοπό την ορθή και ακριβή απεικόνιση του σήματος, η διακριτική ικανότητα του προγράμματος/παλμογράφου κατά τον οριζόντιο άξονα ορίζεται σε 20ms/div. Συνεπώς, κατά τη καταγραφή των αποτελεσμάτων, η κάθε κυματομορφή που εξάγεται θα περιλαμβάνει ένα χρονικό εύρος από 0ms έως 100ms (0,1s). Επιπλέον, τα όρια της τάσης απεικόνισης ορίζονται σε ± 10 V, καθώς το εύρος τάσης που κυμαίνεται το σήμα εξόδου του Encoder είναι τα ± 5 V.

Για την έναρξη του πειράματος, ο παλμογράφος ξεκινάει τη καταγραφή του σήματος και ταυτόχρονα ασκείται στο δίσκο μια εξωτερική ροπή έτσι ώστε να ξεκινήσει να περιστρέφεται. Η καταγραφή σταματάει μόλις ο δίσκος ακινητοποιηθεί λόγω τριβών και γίνεται αποθήκευση των κυματομορφών υπό μορφή αρχείου τιμών του Excel (.csv).

Με σκοπό τη βέλτιστη ακρίβεια μετρήσεων, η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται άλλες 4 φορές. Το κάθε πείραμα διαρκεί περίπου από 2s έως 5s και το πρόγραμμα αποθηκεύει τη κάθε κυματομορφή ως ξεχωριστό αρχείο του Excel.



Σχήμα 3.2: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση τριβής απόσβεσης του δίσκου.

3.1.3 Επεξεργασία των μετρήσεων

Εφόσον η κάθε κυματομορφή που καταγράφηκε καλύπτει εύρος 100ms/0,1s για κάθε πείραμα έχουν προκύψει από 20 έως 50 υπολογιστικά φύλλα του Excel. Ο υπολογισμός των δειγμάτων σε κάθε φύλλο υπολογίζεται με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$N_{divs} = \frac{T}{T/div}$$

$$\frac{Samples}{div} = f_s \cdot \frac{T}{div} \leftrightarrow Samples = f_s \cdot T$$

όπου:

N_{divs} ο αριθμός των υποδιαιρέσεων του οριζόντιου άξονα του παλμογράφου

T ο συνολικός χρόνος της κυματομορφής

T/div η διακριτική ικανότητα του παλμογράφου στον οριζόντιο άξονα

$Samples$ ο συνολικός αριθμός δειγμάτων

f_s η συχνότητα που ο παλμογράφος λαμβάνει δείγματα

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το λογισμικό έχει ρυθμιστεί να λαμβάνει δείγματα με ρυθμό $f_s = 50kHz$ άρα ο αριθμός των δειγμάτων στα 0,1s θα είναι περίπου 5.000 δείγματα.

Στη συνέχεια θα πρέπει τα **διακριτά** χρονικά διαστήματα κάθε υπολογιστικού φύλλου, τα οποία κυμαίνονται από 0ms έως 100ms, να τοποθετηθούν σε ένα ενιαίο φύλλο, σχηματίζοντας μια στήλη **συνεχούς** χρόνου που θα καλύπτει όλη τη διάρκεια του κάθε πειράματος. Λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων η διαδικασία αυτή δε μπορεί να γίνει χειροκίνητα, έτσι αναπτύχθηκε κώδικας στη Python που δέχεται σαν ορίσματα όλα τα υπολογιστικά φύλλα του κάθε πειράματος. Στη συνέχεια τα αντιγράφει βάση της αύξουσας

αρίθμησης τους σε ένα καινούργιο υπολογιστικό φύλλο που δημιουργεί, προσθέτοντας στο πρώτο στοιχείο κάθε φύλλου το τελευταίο του προηγούμενου και προσαιξάνοντας όλα τα υπόλοιπα κατά 20ms (T/div).

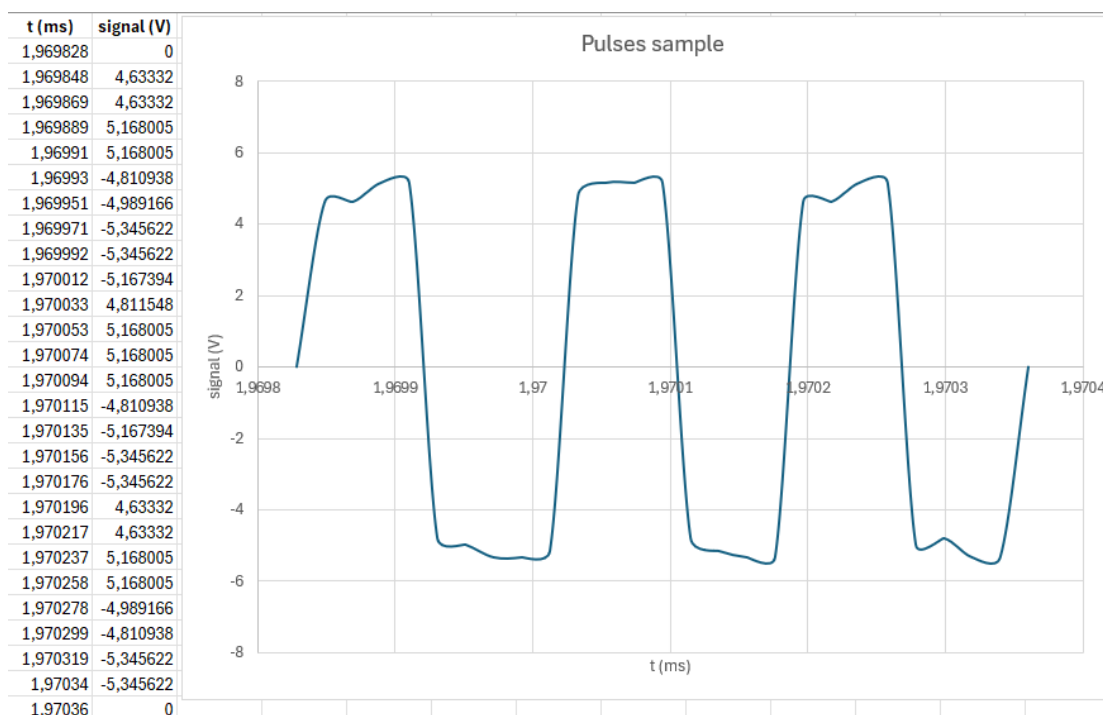
Τέλος, τοποθετεί απείραχτη την τιμή τάσης του κάθε δείγματος δίπλα στην αντίστοιχη χρονική του τιμή στο νέο υπολογιστικό φύλλο συνεχούς χρόνου και των αντίστοιχων τάσεων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μετατροπή των τιμών τάσης σε παλμούς και κατ' επέκταση σε μοίρες, με σκοπό το τελικό υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας του δίσκου.

Για να μετρηθούν οι παλμοί της χρονοσειράς θα πρέπει πρώτα να γίνει αντιληπτή η μορφή του κάθε παλμού γραφικά. Ο πρώτος παλμός της χρονοσειράς έχει αρχική τιμή τάσης 0, έπειτα ανέρχεται στα +5V για $T/2$ ms. Στη συνέχεια κατέρχεται στα -5V για $T/2$ ms επιπλέον όπου τον διαδέχεται ο δεύτερος παλμός με τη τάση να επιστέφει ξανά στα +5V για $3T/2$.

A/A Παλμού	Δt (ms)	Signal (V)
1	$T/2$	5 (+)
	T	-5 (-)
2	$3T/2$	5 (+)
	$2T$	-5 (-)

Πίνακας 3.3: Επεξήγηση παλμών.



Σχήμα 3.4: Ενδεικτική απεικόνιση παλμών.

Παρατηρείται λοιπόν, τόσο από το πίνακα προσήμων όσο και από το γράφημα, ότι αλλαγή παλμού συμβαίνει μόνο κατά τη μετάβαση του σήματος από μια αρνητική τιμή σε μια θετική. Οποιοσδήποτε άλλος συνδυασμός προσήμων μιας τιμής σήματος με τη προηγούμενης της υποδεικνύει ότι πρόκειται για τον ίδιο παλμό.

Συνεπώς, δημιουργείται μια καινούρια στήλη στο υπολογιστικό φύλλο κάθε πειράματος με σκοπό των υπολογισμό της αντίστοιχης γωνίας που διαγράφει ο δίσκος, την εκάστοτε χρονική στιγμή, με τη πρώτη τιμή της να αρχικοποιείται σε 0. Στην εν λόγω στήλη γίνεται με χρήση μιας συνάρτησης IF ο εξής λογικός έλεγχος:

Έστω s_t και d_t μια τιμή σήματος και γωνίας, αντίστοιχα, και s_{t-1} , d_{t-1} οι προηγούμενές τους. Στη μοναδική περίπτωση που ισχύει **ταυτόχρονα** $s_t \cdot s_{t-1} < 0$ & $s_t \cdot s_{t-1}^2 > 0$ τότε $d_t = d_{t-1} + 0.1$, **διαφορετικά** $d_t = d_{t-1}$.

Δηλαδή η συνάρτηση ελέγχει αν η υπάρχουσα τιμή σήματος είναι θετική και η προηγούμενη αρνητική και αυξάνει την υπάρχουσα γωνία κατά 0.1 μοίρες, καθώς υπάρχει αλλαγή παλμού. Διαφορετικά, αναγνωρίζει ότι πρόκειται για τον ίδιο παλμό οπότε δε μεταβάλλει τη γωνία.

Πρόσημο σήματος		Αποτέλεσμα IF
s_{t-1}	s_t	
+	-	FALSE
-	+	TRUE
+	+	FALSE
-	-	FALSE

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα λογικού ελέγχου.

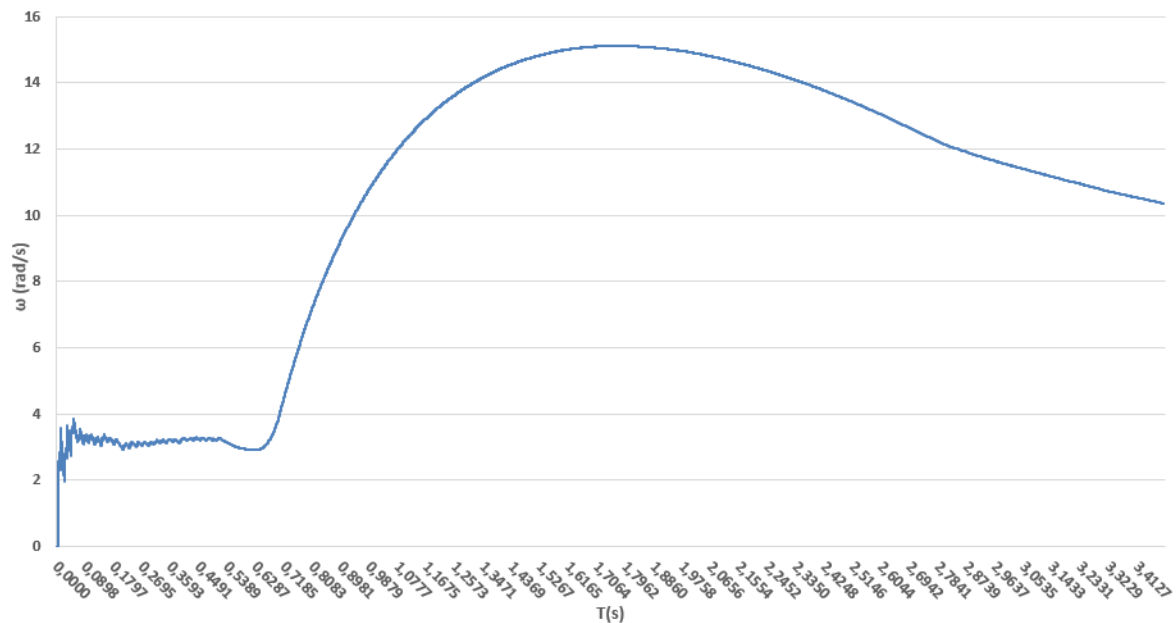
Για τη μετατροπή των μοιρών σε ακτίνια δημιουργείται μια ακόμη στήλη η οποία εκτελεί τη μετατροπή της εκάστοτε γωνίας, βασισμένη στον εξής τύπο:

$$radians = \frac{\pi}{180} degrees$$

Τέλος, σε μια επιπλέον στήλη, υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα κάθε χρονική στιγμή t , βάση του τύπου

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Η γωνιακή ταχύτητα [$\omega(rad/s)$] του δίσκου συναρτήσει του χρόνου [$t(s)$] αναπαρίσταται με χρήση ενός γραφήματος διασποράς, επιλέγοντας τα αντίστοιχα δεδομένα. Η ίδια διαδικασία εκτελείται και για τα άλλα 4 πειράματα με αποτέλεσμα να έχουν δημιουργηθεί 5 γραφήματα γωνιακής ταχύτητας του δίσκου.



Σχήμα 3.6: Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δίσκου στο πρώτο πείραμα.

Η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα $\omega(t)$ του δίσκου σε κάθε πείραμα συνοψίζεται παρακάτω:

A/A πειράματος	$\omega(t)$ (rad/s)
1	15,1177
2	25,8948
3	15,1923
4	24,5492
5	27,3003

Πίνακας 3.7: Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα του εκάστοτε πειράματος.

Για τη προσέγγιση του συντελεστή απόσβεσης c στη περιστροφή του δίσκου, θα χρησιμοποιηθεί curve fitting μεταξύ της πειραματικής καμπύλης και της καμπύλης που αποδίδει η παραπάνω εξίσωση, μεταβάλλοντας το c έτσι ώστε οι 2 καμπύλες να έχουν τη μικρότερη δυνατή απόκλιση.

Ως αρχική τιμή της γωνιακής ταχύτητας $\Omega(t_0)$ χρησιμοποιείται η μέγιστη ταχύτητα που καταγράφεται. Για την εύρεση του κελιού με τη μέγιστη τιμή του ω γίνεται χρήση της εντολής `=CELL("address";XLOOKUP(MAX(F:F);F:F;F:F))`, όπου F η στήλη της γωνιακής ταχύτητας και ως t_0 λαμβάνεται η αντίστοιχη χρονική στιγμή.

Στη συνέχεια, για μεγαλύτερη ευκολία στους υπολογισμούς η εξίσωση μετατρέπεται από εκθετική σε γραμμική, λογαριθμώντας την κατά μέλη ως εξής:

$$\Omega(t) = \Omega(t_0)e^{-\frac{c(t-t_0)}{J}} \leftrightarrow \ln\left(\frac{\Omega(t)}{\Omega(t_0)}\right) = \ln\left(e^{-\frac{c(t-t_0)}{J}}\right) \leftrightarrow \ln\left(\frac{\Omega(t)}{\Omega(t_0)}\right) = -\frac{c}{J}(t - t_0)$$

Παρατηρείται ότι η εξίσωση πλέον έχει πάρει τη μορφή εξίσωσης τύπου $y = ax$

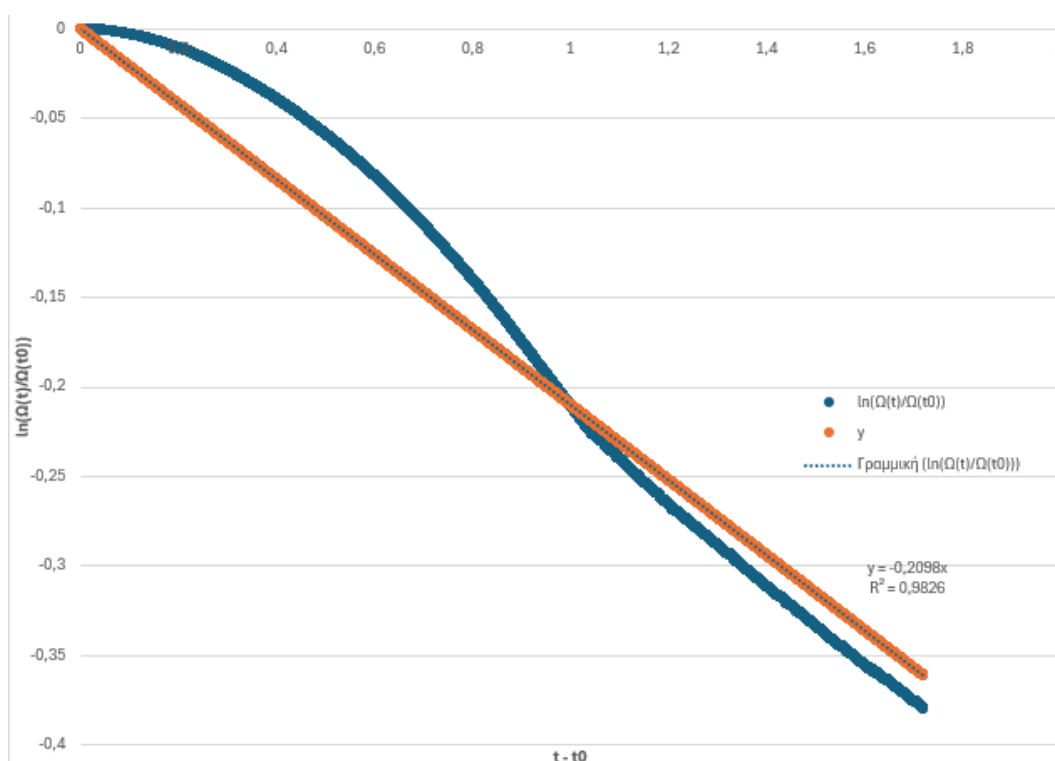
Όπου $y \equiv \ln\left(\frac{\Omega(t)}{\Omega(t_0)}\right)$, $a \equiv -\frac{c}{J}$ και $x \equiv (t - t_0)$

Δεδομένου ότι η ροπή αδράνειας του δίσκου είναι $J = 0,000241291 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, ζητούμενο είναι να υπολογιστεί ο συντελεστής a που προσεγγίζει καλύτερα το y , και κατ' επέκταση ο συντελεστής c .

Αρχικά δημιουργείται στήλη όπου υπολογίζεται η ποσότητα $\ln\left(\frac{\Omega(t)}{\Omega(t_0)}\right)$ με βάση το εκάστοτε $\Omega(t)$ καθώς και μια ακόμη για τον υπολογισμό της ποσότητας $(t - t_0)$. Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει η καμπύλη που αναπαριστά την επιβραδυνόμενη περιστροφική κίνηση του δίσκου από τη στιγμή που έχει τη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα μέχρι να που ακινητοποιείται.

Αντίστοιχα, επιλέγεται μια τυχαία τιμή για το c και βάση αυτής δημιουργείται στήλη στην οποία υπολογίζεται η γραμμική ποσότητα $-\frac{c}{J}(t - t_0)$ και σχεδιάζεται συνάρτησής του $(t - t_0)$ η αντίστοιχη ευθεία κλίσης $-\frac{c}{J}$.

Για τη βελτιστοποίηση της κλίσης της ευθείας ώστε να προσεγγίζει τη καμπύλη $\ln\left(\frac{\Omega(t)}{\Omega(t_0)}\right)$ όσο το δυνατόν καλύτερα υπολογίζεται το απόλυτο σφάλμα του κάθε σημείου και στη συνέχεια ο μέσος όρος όλων των σφαλμάτων MSE . Στόχος είναι η μεταβολή του c έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα MSE . Κάνοντας χρήση του εργαλείου Solver του Excel, για ένα ομαλό μη γραμμικό πρόβλημα, η βέλτιστη τιμή του c που ελαχιστοποιεί το MSE είναι $c = 5.0622E^{-5} \text{ Nms/rad}$, για τις τιμές του πρώτου πειράματος.



Σχήμα 3.8: Γραμμική προσέγγιση της εξίσωσης ταλάντωσης για το πρώτο πείραμα.

Η ίδια διαδικασία εκτελείται για τα υπόλοιπα πειράματα και οι τιμές του συντελεστή c συνοψίζονται στο παρακάτω πίνακα:

A/A πειράματος	c (Nms/rad)
1	$5.0633E^{-5}$
2	$4.3974E^{-5}$
3	$5.6125E^{-5}$
4	$3.9801E^{-5}$
5	$3.8190E^{-5}$

Πίνακας 3.9: Τιμές συντελεστή απόσβεσης c για το εκάστοτε πείραμα.

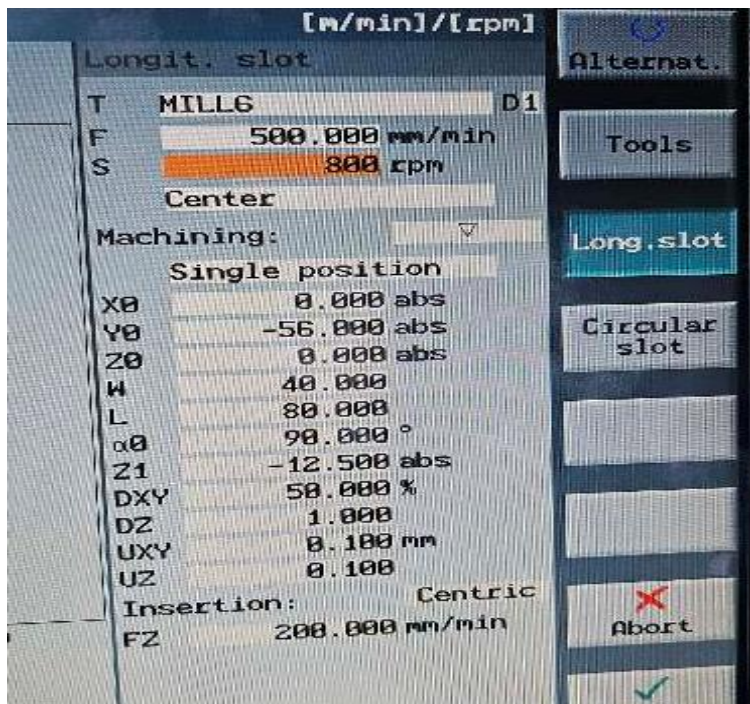
3.2 Τριβή απόσβεσης σε φυσικό εκκρεμές

3.2.1 Κατασκευή της πειραματικής διάταξης

Στο σημείο αυτό θα γίνει μετατροπή του δίσκου σε εκκρεμές τόσο με αφαίρεση μάζας όσο και με τη προσθήκη μιας επιπλέον μάζας στη περιφέρειά του (dead weight). Ο συντελεστής τριβής απόσβεσης για τη ταλάντωση του εκκρεμούς θα πρέπει να υπολογισθεί για τις 2 παραπάνω περιπτώσεις.

Η μάζα που θα αφαιρεθεί από το δίσκο είναι περίπου 20gr και θα γίνει με τη δημιουργία ενός slot. Λαμβάνοντας υπόψιν τη πυκνότητα του υλικού του δίσκου, έπειτα από μοντελοποίηση στο Autodesk Inventor, το slot θα πρέπει να βρίσκεται έκκεντρα του δίσκου σε απόσταση 38.50mm από τη κεντρική οπή του και να έχει πάχος 40mm. Επιπλέον δημιουργείται κατάλληλη κυκλική πατούρα $\Phi 24\text{mm}$ σε απόσταση 42mm από το κέντρο του δίσκου ώστε να υποδεχθεί την έκκεντρη μάζα για το δεύτερο πείραμα.

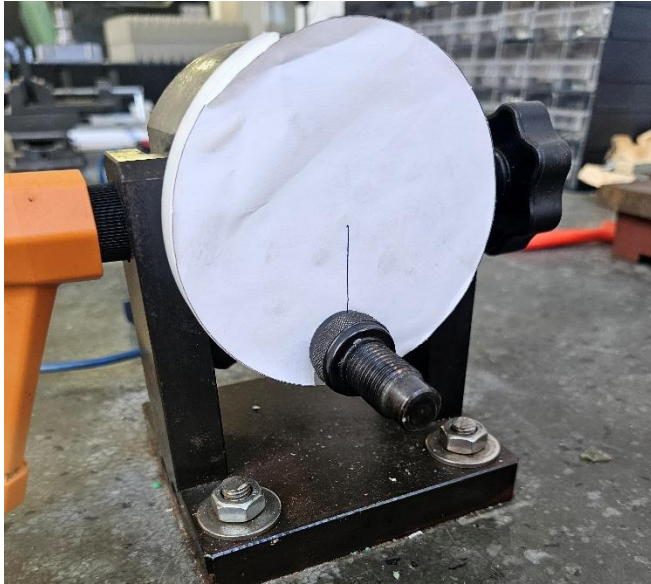
Η κοπή του slot γίνεται με χρήση φρέζας CNC Deckel Maho DMU 50eco, με τις ακόλουθες παραμέτρους πάχους (W), μήκους (L), βάθους (Z1) και κεντρικού σημείου (X0,Y0). Ορίζεται χαμηλή ταχύτητα κοπής (F) και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού (S) καθώς η κοπή γίνεται σε πειραματικές συνθήκες. Χρησιμοποιείται κοπτικό εκχόνδρησης πάχους 46mm και τέλος ορίζονται η επιφάνεια (DXY) και το βάθος κοπής (DZ) ανά πέρασμα του κοπτικού.



Σχήμα 3.10: Παράμετροι κοπής του slot στη φρέζα Deckel Maho DMU 50eco.



Σχήμα 3.11: Αριστερή όψη της πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση τριβής απόσβεσης φυσικού εκκρεμούς.



Σχήμα 3.12: Δεξιά όψη της πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση τριβής απόσβεσης φυσικού εκκρεμούς.



Σχήμα 3.13: Ο άξονας και το ρουλεμάν της πειραματικής διάταξης.

3.2.2 Προετοιμασία και διενέργεια του πειράματος

Ο δίσκος τοποθετείται ξανά στον άξονα της πειραματικής διάταξης και ισορροπεί με το slot να «κοιτάει» στο πάτωμα, δηλαδή σε μηδενική γωνία. Για τη μέτρηση της τριβής με χρήση του encoder θα πρέπει να περιστραφεί κατά 180 μοίρες και να αφεθεί με μηδενική αρχική ταχύτητα, ώστε να εκτελέσει ταλάντωση. Ωστόσο, παρατηρείται πως, λόγω της μικρής ροπής αδράνειας του δίσκου και της δυσανάλογης τριβής που προσδίδει ο Encoder, ο δίσκος επιστρέφει αμέσως στη θέση ισορροπίας του, χωρίς να ταλαντωθεί.

Ο δίσκος συνεπώς αφαιρείται από τη διάταξη και η καταγραφή των θέσεων και του χρόνου της ταλάντωσης θα πρέπει να προσεγγιστεί οπτικά, με βιντεοσκόπηση.

Αρχικά, σχεδιάζεται στο Autocad το περίγραμμα του δίσκου με μια έντονη συνεχή γραμμή που ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας του. Το σχέδιο εκτυπώνεται και αφού κοπεί

κατάλληλα προσκολλάται πάνω στο δίσκο, με τη γραμμή να χρησιμεύει ως δείκτης της θέσης του εκκρεμούς.

Η κάμερα τοποθετείται οριζόντια σε κατάλληλη απόσταση ώστε να καταγράφει μόνο την επιφάνεια του δίσκου και όσο το δυνατόν λιγότερο το περιβάλλοντα χώρο. Η ανάλυση του βίντεο ορίζεται σε 1920X1080 (FullHD) και ο ρυθμός καταγραφής σε 120FPS, ο υψηλότερος δυνατός για καλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων. Τέλος, πριν ξεκινήσει η καταγραφή γίνεται εστίαση στο κέντρο περιστροφής του δίσκου και έλεγχος ότι η κάμερα βρίσκεται σε κάθετη θέση και δεν έχει κάποια κλίση.

Η καταγραφή ξεκινάει με το δίσκο να αφήνεται υπό γωνία 180 μοιρών και ολοκληρώνεται με το δίσκο να βρίσκεται σε πλήρη ηρεμία. Η ίδια διαδικασία εκτελείται 4 επιπλέον φορές για να γίνει επιλογή της βέλτιστης καταγραφής. Ακολουθεί η επεξεργασία του βίντεο στη MATLAB, με σκοπό τη καταγραφή των ακραίων θέσεων της ταλάντωσης και των αντίστοιχων χρονικών στιγμών.

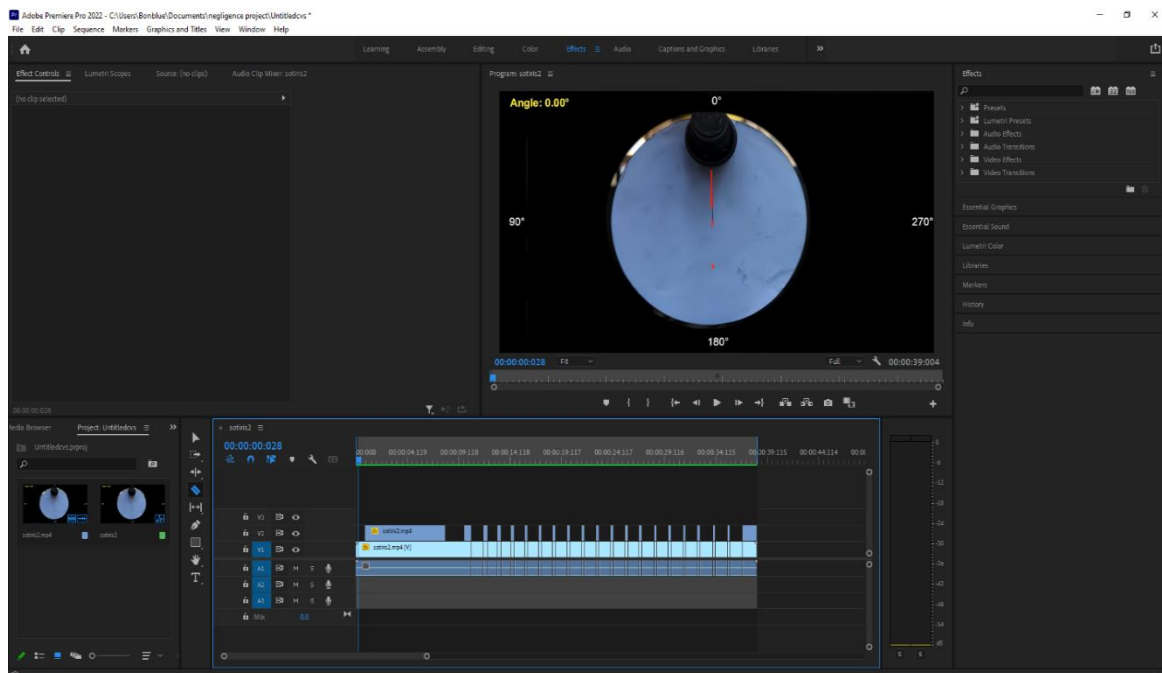
Στη συνέχεια, προσκολλάται στη πατούρα του δίσκου ως έκκεντρη μάζα μια βίδα από ανοξείδωτο ατσάλι 440C, βάρους περίπου 130gr και προσαρμόζεται ο Encoder στη διάταξη. Η ταλάντωση εκτελείται όπως και πριν για 5 καταγραφές και ακολουθεί αντίστοιχη επεξεργασία.

3.2.3 Επεξεργασία των μετρήσεων

Πριν την επεξεργασία στη MATLAB, γίνεται έλεγχος των καταγραφών καρέ-καρέ. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί σε ποιο βίντεο η ταλάντωση ξεκινάει με αρχική γωνία όσο το δυνατόν 180 μοίρες και χωρίς αρχική ταχύτητα. Στη συνέχεια τοποθετείται μέσω editing ένα μαύρο background σε όλα τα άλλα σημεία του βίντεο, εκτός από την επιφάνεια του δίσκου. Αυτό γίνεται έτσι ώστε ο κώδικας που θα χρησιμοποιηθεί στη MATLAB, να μην ανιχνεύσει άλλες γραμμές στο βίντεο, πλην της γραμμής/δείκτη καθώς και άλλα σημεία του background.

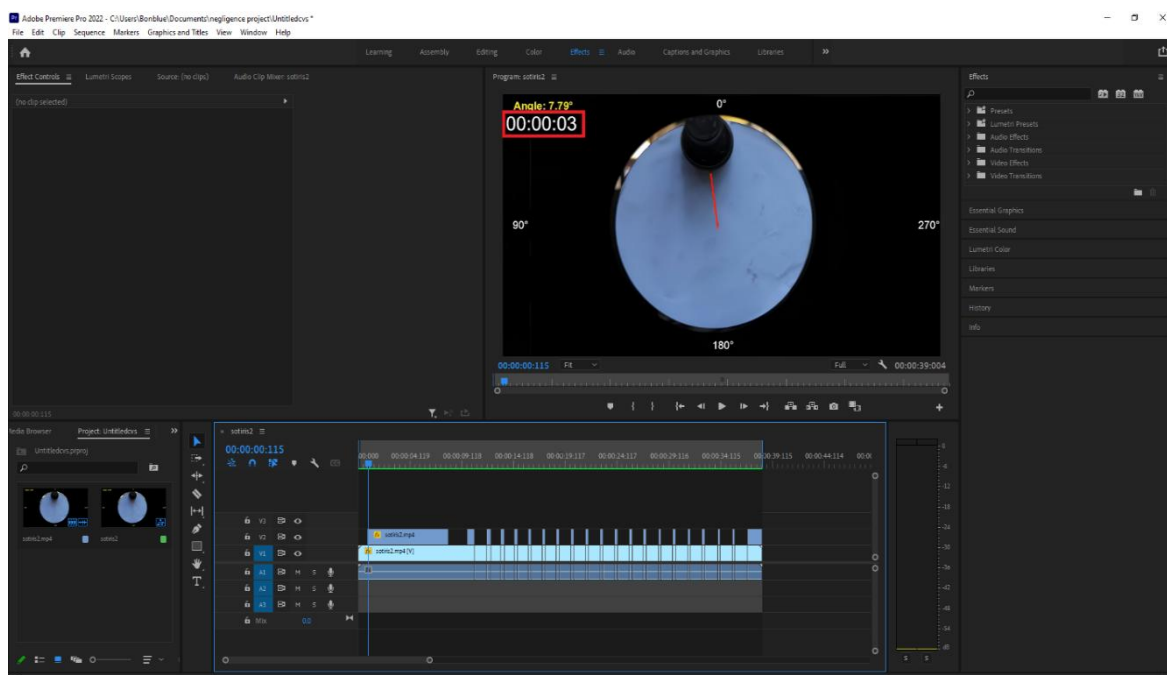
Για τον υπολογισμό της θέσης του εκκρεμούς μέσω της γραμμής/δείκτη γίνεται χρήση του μετασχηματισμού Hough [\[28\]](#).

Η εκτέλεση του κώδικα δημιουργεί ένα βίντεο όπου η γραμμή/δείκτης του εκκρεμούς επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα και πάνω αριστερά αναγράφεται γωνία της (angle). Με επεξεργασία του εν λόγω βίντεο στο Adobe Premiere Pro, προστίθενται ενδεικτικά οι τέσσερις βασικές γωνίες έτσι ώστε να είναι αντιληπτό με ποια φορά τις μέτρησε ο αλγόριθμος.



Σχήμα 3.14: Προσθήκη των 4 βασικών γωνιών στο βίντεο.

Εντοπίζεται το καλύτερο καρέ (frame) όπου ξεκινάει να έχει κίνηση ο δίσκος και προστίθεται χρονόμετρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10:

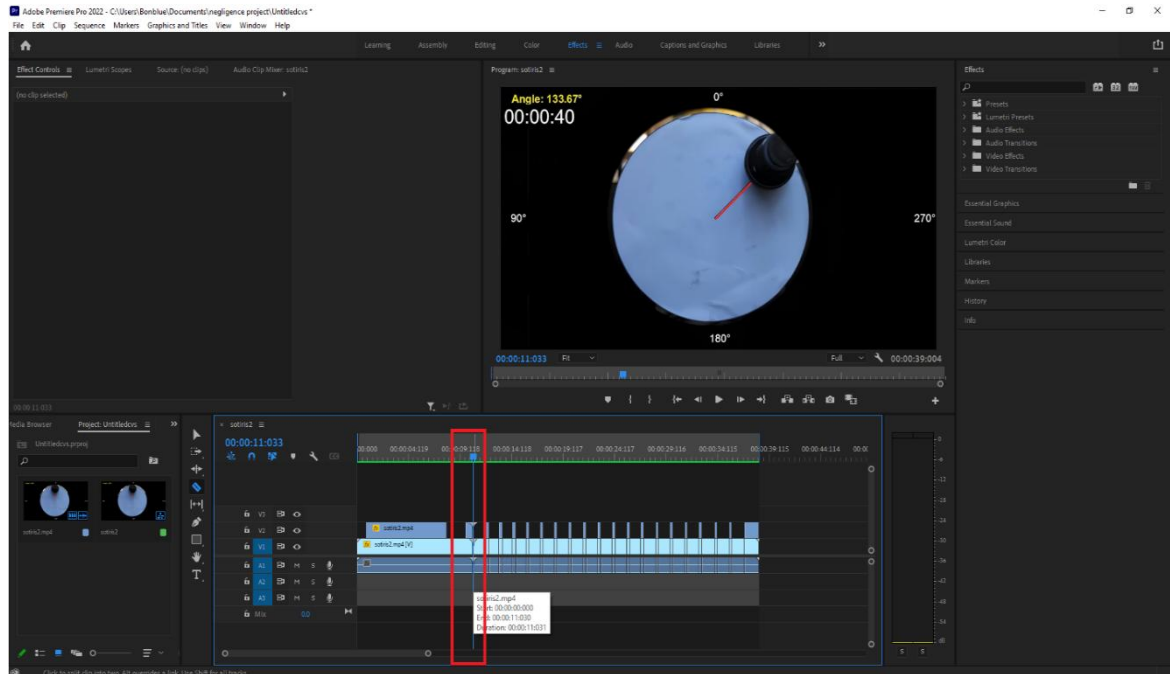


Σχήμα 3.15: Προσθήκη χρονόμετρου στο βίντεο.

Το βίντεο αρχικά παρουσιάζεται ολόκληρο και στη συνέχεια γίνονται οι ανάλογες παύσεις στο καλύτερο καρέ όπου η γραμμή έχει έρθει σε ισορροπία.

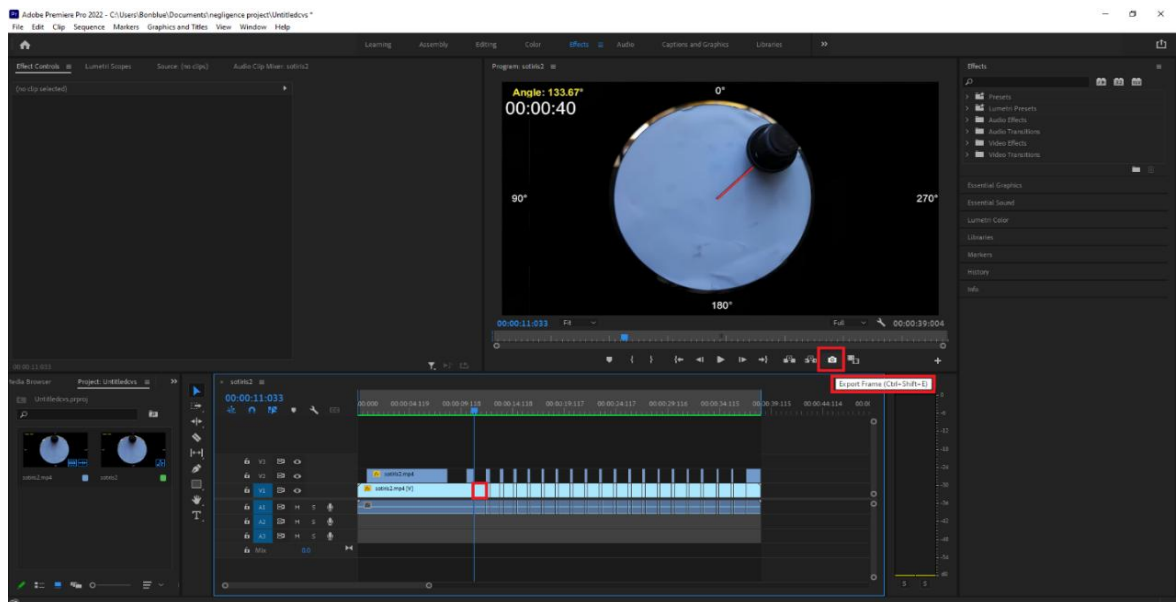
Το βίντεο έχει καταγραφεί στα 120FPS και να μελετηθεί το κάθε frame ένα-ένα κάνοντας κύλιση πάνω στο βίντεο.

Παρατηρείται ότι σε κάθε σημείο ισορροπίας 2-3 frames (ή και παραπάνω) είναι ίδια, επομένως επιλέγεται ένα από αυτά και γίνεται αποκοπή (cut).



Σχήμα 3.16: Επιλογή και αποκοπή του κατάλληλου frame.

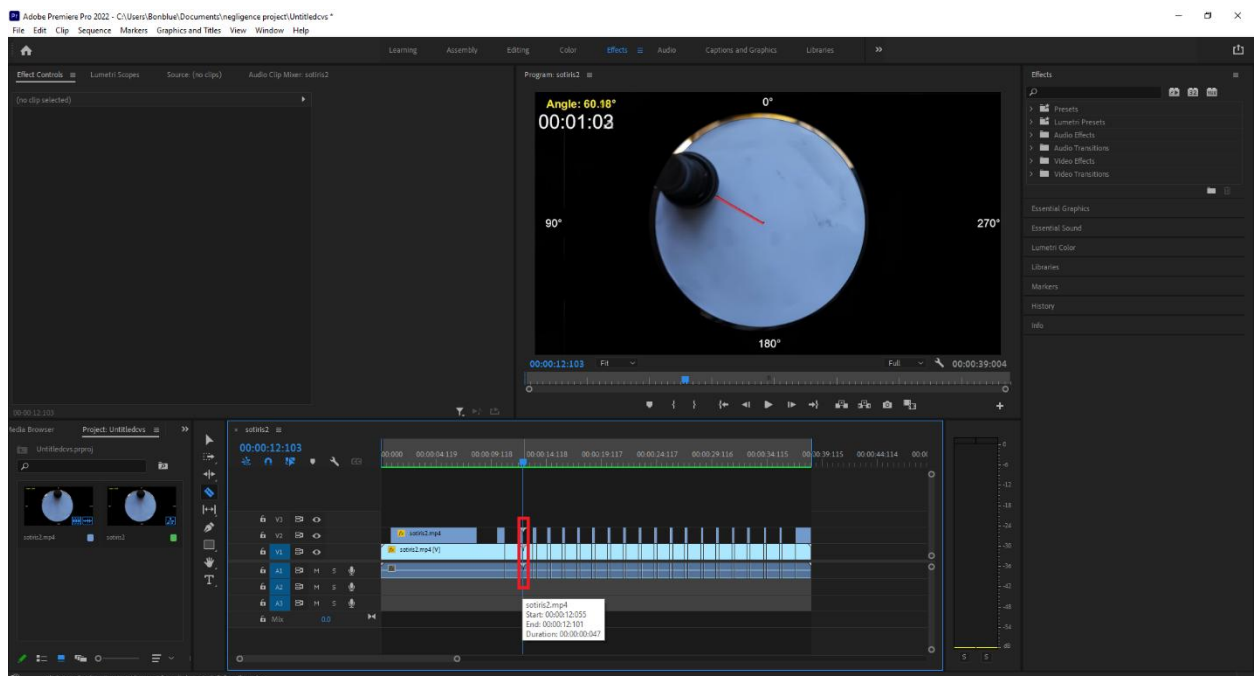
Έπειτα στο ίδιο σημείο, εκτελείται η εντολή «Export Frame». Αυτή η εντολή αποθηκεύει το εν λόγω frame ως φωτογραφία (τύπου .png). Η αποθηκευμένη φωτογραφία προστίθεται στο timeline, ακριβώς μετά από το σημείο που έχει επισημανθεί με «cut» με χρονική διάρκεια 1sec. Αυτό γίνεται για να υπάρχει το χρονικό περιθώριο ώστε να γίνει καταγραφή της μέτρησης.



Σχήμα 3.17: Προσθήκη του frame στο timeline του βίντεο.

Το βίντεο συνεχίζει, δείχνοντας τη κίνηση που κάνει το εκκρεμές μέχρι να φτάσει στην επόμενη θέση ισορροπίας.

Το νέο σημείο ισορροπίας εντοπίζεται όπως προηγουμένως. Παρατηρείται ότι 2-3 frames πάλι είναι ίδια, επομένως επιλέγεται ένα από αυτά τα frames και γίνεται «cut».



Σχήμα 3.18: Εντοπισμός και αποκοπή του επόμενου κατάλληλου frame.

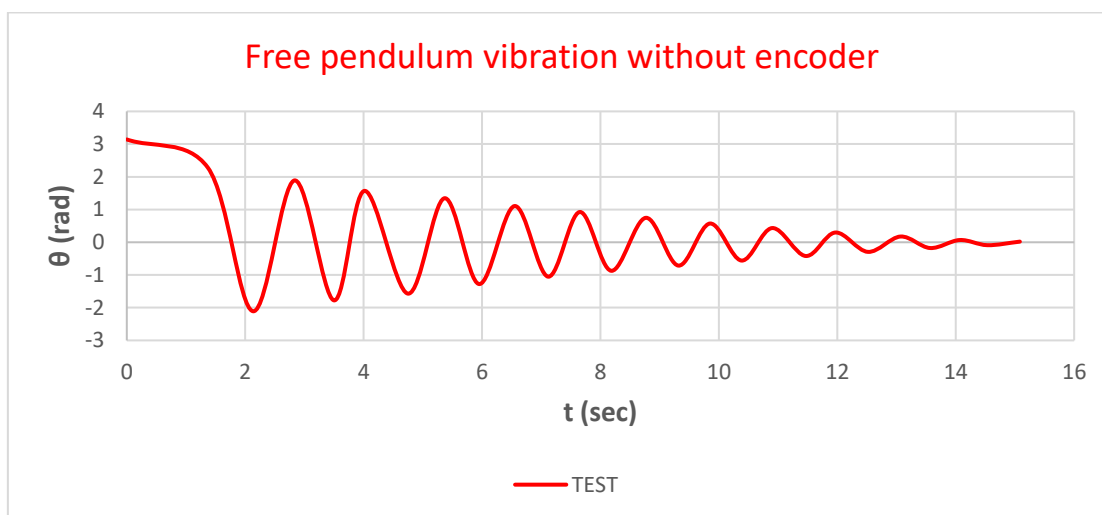
Η διαδικασία εκτελείται όπως και προηγουμένως κάνοντας «Export Frame», προσθέτοντας τη καινούρια φωτογραφία με διάρκεια 1sec στο timeline και αφήνοντας το βίντεο να συνεχίσει μέχρι την επόμενη Θ.Ι.

Η παραπάνω επεξεργασία και κώδικας εκτελούνται αντίστοιχα για τις καταγραφές του εκκρεμούς χωρίς έκκεντρη μάζα και απουσίας του Encoder.

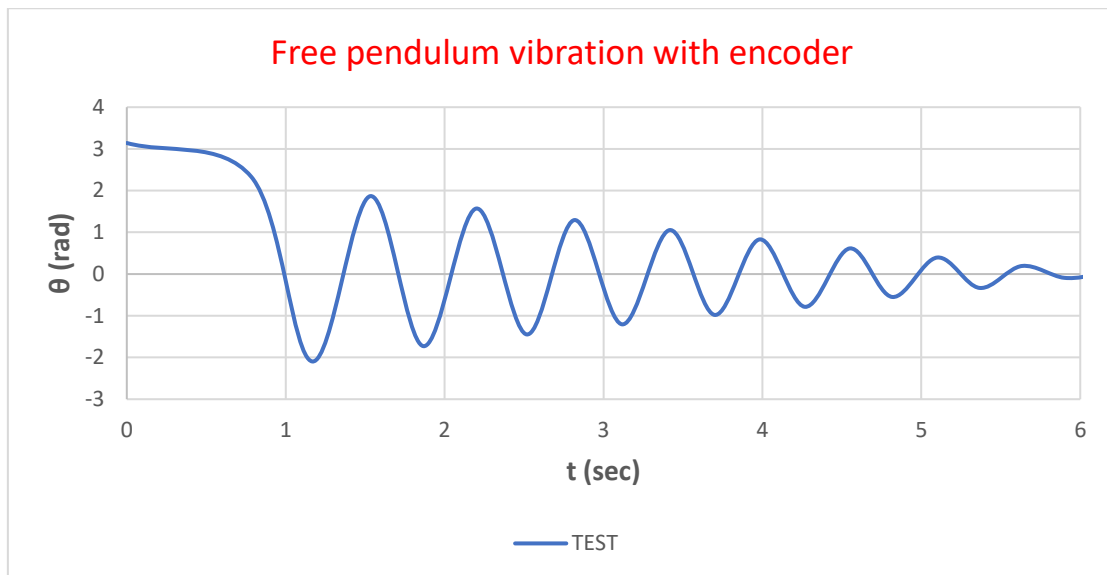
Στη συνέχεια ακολουθεί η καταγραφή των μετρήσεων και για τις 2 περιπτώσεις ταλάντωσης με βάση τα επεξεργασμένα βίντεο. Παρατηρείται πως ο κώδικας της MATLAB εντοπίζει σε ορισμένες γωνίες τις συμπληρωματικές τους και όχι τις σωστές. Αυτό συμβαίνει διότι η μέθοδος Hough ανιχνεύει γραμμές αλλά δε καθορίζει ποια άκρη είναι η αρχή και ποια το τέλος.

Δημιουργείται ένα υπολογιστικό φύλλο Excel για κάθε περίπτωση και καταγράφεται η κάθε χρονική στιγμή που το εκκρεμές βρίσκεται σε ακραία θέση μαζί με την αντίστοιχη γωνία θ . Δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διόρθωση των γωνιών που εμφανίζονται ως συμπληρωματικές ώστε να καταγραφούν ορθά.

Με βάση το σύνολο των τιμών προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις με τη μεταβολή της γωνίας του εκκρεμούς σε σχέση με το χρόνο για το εκκρεμές χωρίς Encoder και με Encoder και έκκεντρη μάζα, αντίστοιχα:



Σχήμα 3.19: Ταλάντωση του φυσικού εκκρεμούς χωρίς το rotary encoder.

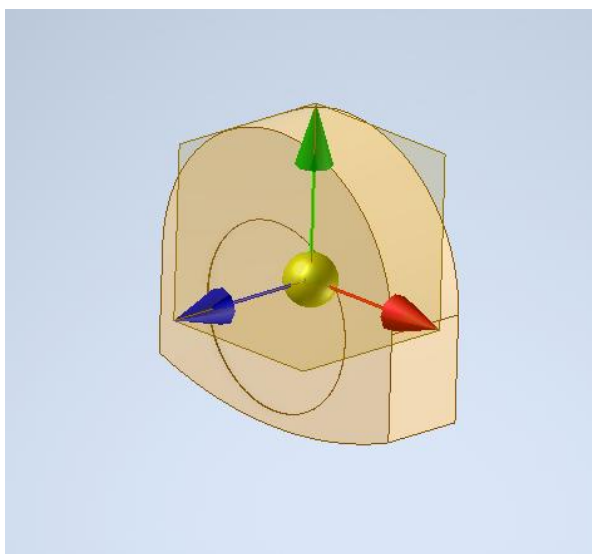


Σχήμα 3.20: Ταλάντωση του φυσικού εκκρεμούς με το rotary encoder.

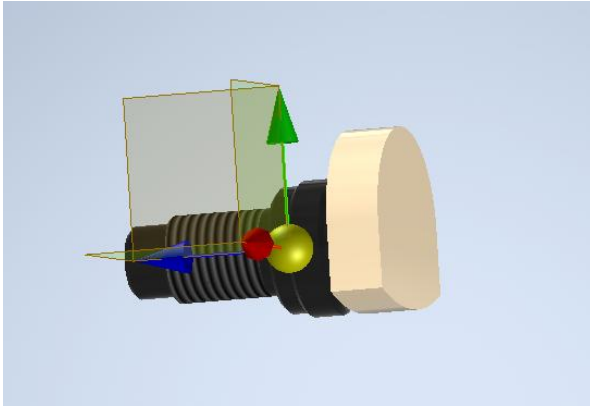
Η φθίνουσα ταλάντωση που εκτελεί το εκκρεμές περιγράφεται από την ακόλουθη Σ.Δ.Ε. 1^{ης} τάξης:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left[\frac{\theta(2)}{\frac{-c_b \theta(2)(-m_{slot})gl_{slot} \sin(\theta(1))}{I_{disc}}} \right], \quad \vec{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

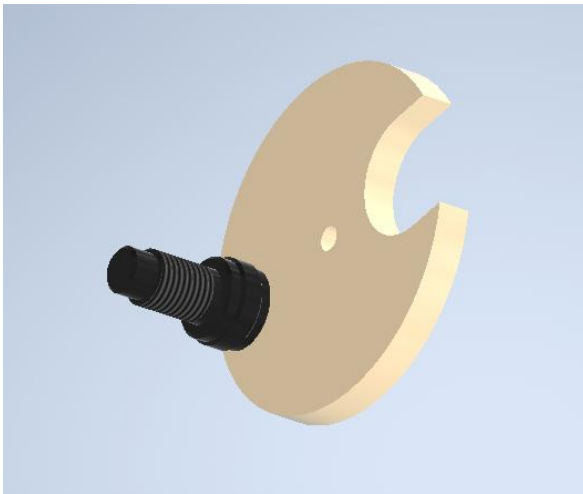
Για την επίλυση της Σ.Δ.Ε. της ταλάντωσης απαιτείται ο υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων για τις 2 περιπτώσεις εκκρεμούς. Συνεπώς, γίνεται μοντελοποίηση στο Autodesk Inventor του slot που έχει αφαιρεθεί, του slot μαζί με την έκκεντρη μάζα (βίδα) και του δίσκου με την έκκεντρη μάζα (βίδα).



Σχήμα 3.21: Μοντελοποίηση του slot στο Autodesk Inventor.



Σχήμα 3.22: Μοντελοποίηση του slot με την έκκεντρη μάζα.



Σχήμα 3.23: Μοντελοποίηση του φυσικού εκκρεμούς.

Κάνοντας επιλογή του μενού iProperties και της καρτέλας Physical (Initial Properties) για κάθε ένα από τα παραπάνω προκύπτουν οι παράμετροι I_{disc} , m_{slot} και l_{slot} .

Η συνολική ροπή αδράνειας του εκκρεμούς I_{total} υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{total} = I_{disc} + I_{shaft} + I_{encoder}$$

όπου:

I_{disc} η ροπή αδράνειας του δίσκου

I_{shaft} η ροπή αδράνειας του άξονα

$I_{encoder}$ η ροπή αδράνειας του Encoder (βλ. datasheet)

Οι παράμετροι που προκύπτουν συνοψίζονται παρακάτω:

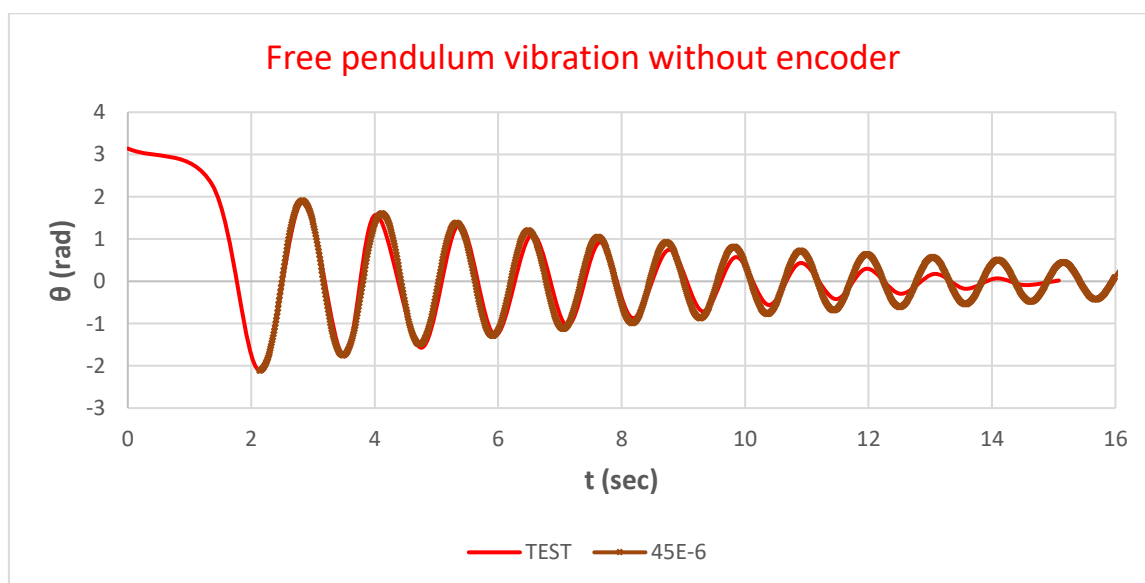
Εκκρεμές με slot		Εκκρεμές με slot και έκκεντρη μάζα	
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
m_{slot}	0.02 kg	m_{slot}	0.15 kg
l_{slot}	0.038485 m	l_{slot}	0.041533 m
I_{disc}	$2074E^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	I_{disc}	$4452.43E^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{shaft}	$0.95E^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	I_{shaft}	$0.95E^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$I_{encoder}$	$0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$I_{encoder}$	$80E^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{total}	$2074.95E^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	I_{total}	$4533.38E^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
θ_0	-2.10853 rad	θ_0	$\pi \text{ rad}$

Πίνακας 3.24: Παράμετροι επίλυσης της Σ.Δ.Ε. για κάθε τύπο εκκρεμούς.

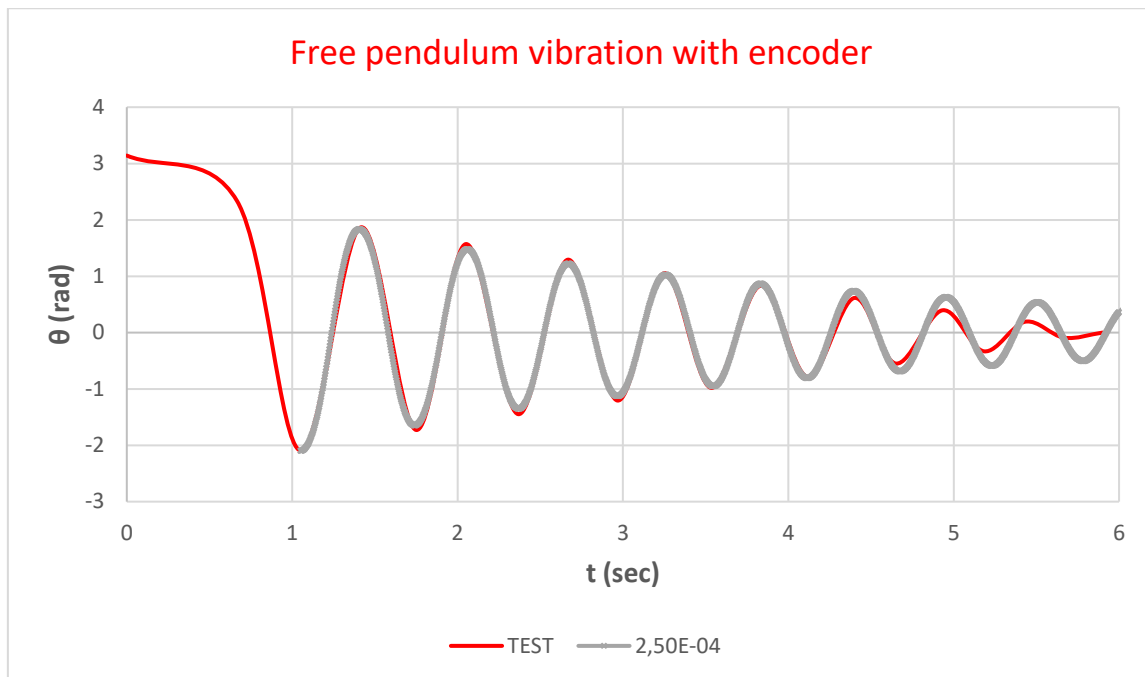
Η Σ.Δ.Ε. με τις παραπάνω παραμέτρους επιλύεται με τη βοήθεια κατάλληλου script της MATLAB που παριστάνει γραφικά την εξίσωση και αποθηκεύει το σύνολο τιμών της σε αρχείο Excel.

Ο υπολογισμός του συντελεστή απόσβεσης c_b θα γίνει με curve fitting της καμπύλης που προκύπτει από την επίλυση της Σ.Δ.Ε. με τη πειραματική καμπύλη, για τις 2 ταλαντώσεις αντίστοιχα. Ο συντελεστής c_b που αποδίδει το καλύτερο fitting θα αποτελεί μια ικανοποιητική προσέγγιση.

Όταν το εκκρεμές έχει χαμηλή γωνιακή ταχύτητα, δηλαδή μέχρι να βρεθεί στη 2^η ακραία θέση (πρώτο peak) και στις τελικές, υπάρχει συνδυασμός απλής τριβής απόσβεσης (dry friction damping) και ιξώδους τριβής απόσβεσης (viscous damping). Το μοντέλο της Σ.Δ.Ε. λαμβάνει υπόψιν μόνο την ιξώδους τριβή άρα θα πρέπει να επιλυθεί με αρχικό χρόνο τη χρονική στιγμή του πρώτου peak της κάθε πειραματικής καμπύλης.



Σχήμα 3.25: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη ταλάντωσης του φυσικού εκκρεμούς χωρίς τον rotary encoder.



Σχήμα 3.26: Πειραματική και θεωρητική καμπύλη ταλάντωσης του φυσικού εκκρεμούς με τον rotary encoder.

Και στις 2 περιπτώσεις ταλάντωσης του εκκρεμούς υπάρχει πολύ ικανοποιητική προσέγγιση της καμπύλης για το μεγαλύτερο μέρος της ταλάντωσης. Λίγο πριν βρεθεί σε ηρεμία παρατηρείται μεγάλη απόκλιση από τις μετρήσεις καθώς η ταχύτητα μειώνεται αισθητά και εμφανίζεται ξανά σύνθετη τριβή.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, ο συντελεστής τριβής για ταλάντωση χωρίς τη παρουσία του Encoder προκύπτει $c_b = 45E^{-6} \text{ Nms/rad}$, ενώ με τη παρουσία Encoder και εκκεντρης μάζας ισούται με $c_b = 250E^{-6} \text{ Nms/rad}$. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι ο Encoder προσδίδει αρκετά μεγάλη τριβή στο σύστημα, επομένως οι μετρήσεις που θα ακολουθήσουν θα γίνουν μέσω βιντεοσκόπησης.

4. ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ VEH

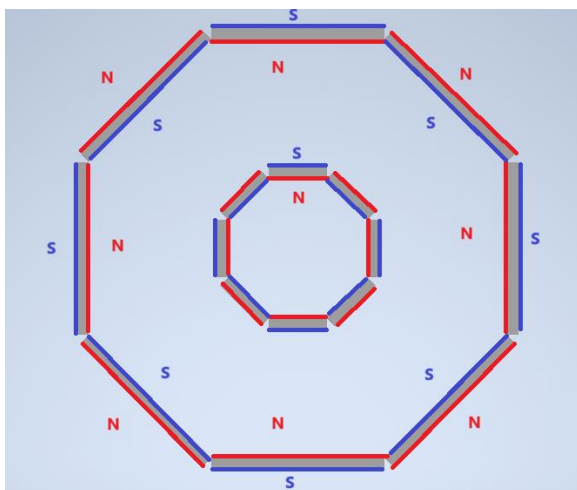
4.1 Σχεδιασμός του VEH

Ο μη γραμμικός VEH που θα κατασκευασθεί θα φέρει κινούμενος και ακίνητους μαγνήτες και σε συνδυασμό με κατάλληλα πηνία θα μετατρέπει τη περιστροφική του κίνηση σε ηλεκτρική τάση. Θα αποτελείται λοιπόν από ένα ρότορα, ένα στάτορα, μια βάση που θα φέρει τα πηνία και ένα κεντρικό άξονα.

Ο στάτορας θα φέρει 8 μαγνήτες νεοδυμίου N35, διαστάσεων 10X10X2, οι οποίοι θα απέχουν ελάχιστη απόσταση 12mm από το κέντρο του άξονα στήριξης του VEH και θα έχουν εναλλασσόμενη πολικότητα. Θα αποτελείται από 2 ίδιους κυκλικούς δίσκους οι οποίοι θα βρίσκονται εκατέρωθεν των μαγνητών. Για τη στήριξη των μαγνητών δημιουργείται στους δίσκους αυλάκωση πάχους 2mm και βάθους 3mm σε 8γωνικό σχήμα. Στο κέντρο τους

δημιουργείται οπή Φ11 για τη τοποθέτηση του άξονα και σφηνάλακας πάχους 4mm για τη βέλτιστη σταθεροποίησή τους.

Ο ρότορας θα αποτελείται επίσης από 8 μαγνήτες N32 διαστάσεων 30X10X2. Οι μαγνήτες αυτοί θα περιστρέφονται σε ελάχιστη απόσταση 38mm από το κέντρο του άξονα στήριξης και σε απόσταση 26mm από τους μαγνήτες του στάτορα. Χάρη στους μαγνήτες δημιουργούνται οι απαραίτητες μαγνητικές δυνάμεις που εξασφαλίζουν τη ροπή επαναφοράς του εκκρεμούς. Οι διαστάσεις και οι θέσεις τοποθέτησης των μαγνητών υπολογίστηκαν μέσω προσομοιώσεων και καθορίζονται άμεσα από την επιδιωκόμενη ροπή επαναφοράς του παραπάνω γραφήματος (βλ. Σχήμα 2.19).



Σχήμα 4.1: Σχεδιάγραμμα πολικότητας των μαγνητών N32.

Η στήριξη των μαγνητών θα γίνει με σκεπτικό παρόμοιο της κατασκευής του στάτορα. Σχεδιάζονται 2 κυκλικοί δίσκοι που φέρουν κατάλληλη αυλάκωση για την υποδοχή των μαγνητών κατά το πλάτος τους και κατάλληλες πατούρες για την τοποθέτηση ρουλεμάν, ώστε να επιτευχθεί η περιστροφή του. Οι δίσκοι σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι κινούμενοι μαγνήτες να είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένοι με τους ακίνητους, κατά το πλάτος τους. Σε κάθε δίσκο δημιουργούνται slots με σκοπό τη μείωση του βάρους του ρότορα συνολικά.

Για τη στήριξη των πηνίων σχεδιάζεται κυκλικός δίσκος με 8 προεξοχές περιμετρικά του οι οποίες προέρχονται από slots μήκους 15mm, πάχους 10mm και ύψους 2mm. Ο δίσκος θα προσαρμόζεται και αυτός στο κεντρικό άξονα δίπλα στο στάτορα με αποτέλεσμα η ελάχιστη απόσταση των κινούμενων μαγνητών από τα πηνία (airgap) να είναι 4mm.

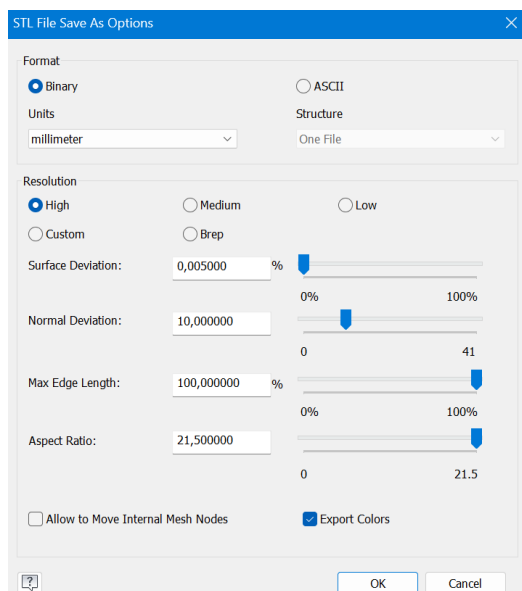
Τέλος, σχεδιάζεται ο κεντρικός άξονας του VEH που φέρει κατάλληλες διαβαθμίσεις/πατούρες για την υποδοχή των ρουλεμάν, ένα σφηνόδρομο και μια εγκοπή για την σταθεροποίηση του στάτορα με χρήση σφήνας και ασφάλειας (e-clip).

4.2 Κατασκευή του VEH

Ο άξονας πρέπει να είναι ελαφρύς και από παραμαγνητικό υλικό για να μην επηρεάζεται το μαγνητικό πεδίο της συσκευής. Συνεπώς, για τη κατασκευή του χρησιμοποιείται αλουμινένια

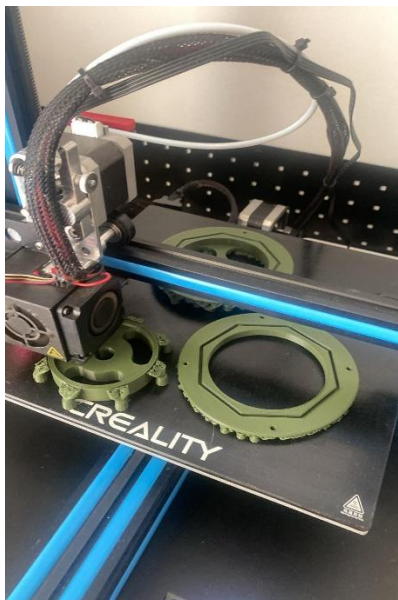
ράβδος του εμπορίου διατομής Φ18, καθώς η μέγιστη διατομή του άξονα είναι Φ14. Η καταργασία γίνεται σε αναλογικό τρόπο, λόγω της κατασκευαστικής απλότητας του τεμαχίου.

Μετά το σχεδιασμό τους, τα υπόλοιπα τεμάχια εξάγονται από το Autodesk Inventor υπό μορφή αρχείου τρισδιάστατης εκτύπωσης (.stl). Για βέλτιστη ακρίβεια τόσο στις διαστάσεις όσο και στη ποιότητα επιφάνειας των τεμαχίων επιλέγεται η βέλτιστη δυνατή ανάλυση κατά την εξαγωγή των αρχείων.



Σχήμα 4.2: Παράμετροι μετατροπής του part file σε αρχείο τρισδιάστατης εκτύπωσης (.stl).

Το εκάστοτε αρχείο εισάγεται στο λογισμικό εκτύπωσης Cura 5.8.1 όπου ορίζονται οι παράμετροι της εκτύπωσης. Η ταχύτητα εκτύπωσης ορίζεται στα 45mm/s με θερμοκρασία κεφαλής στους 210°C και θερμοκρασία τραπεζιού στους 45°C. Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιείται είναι ο CR20 PRO της Creality με τις Default παραμετρικές ρυθμίσεις του κατασκευαστή για το συγκεκριμένο μοντέλο. Η διαστατική του ακρίβεια ανέρχεται στα 0.11mm. Το νήμα εκτύπωσης αποτελείται από πολυμερές μείγμα πολυλακτικού οξέος πυκνότητας 1.25gr/cm³ και φέρει την εμπορική ονομασία NEEMA3D PLA: EVO.

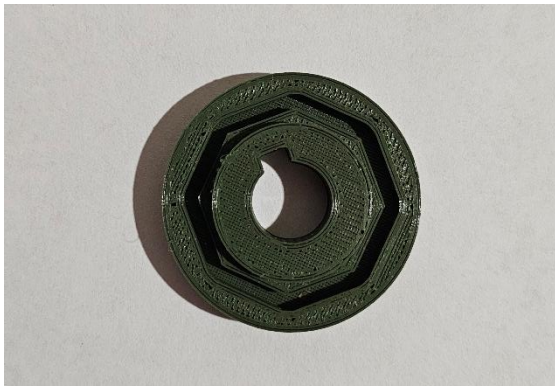


Σχήμα 4.3: Τρισδιάστατη εκτύπωση των τεμαχίων στον εκτυπωτή CR20 PRO.

Λόγω του σφάλματος στη διαστατική ακρίβεια του εκτυπωτή αρχικά γίνεται μια δοκιμαστική εκτύπωση και συναρμολόγηση των τεμαχίων. Κατά τη συναρμολόγηση διαπιστώθηκε πως η συναρμογές κατά την εισαγωγή των ρουλεμάν στις οπές του ρότορα δεν ήταν αρκετά σφικτές, καθώς οι διαστάσεις των οπών του ρότορα είχαν θετικό σφάλμα. Συνεπώς, οι 2 δίσκοι του ρότορα επανασχεδιάστηκαν με διαμέτρους οπών $\Phi 14.85$ αντί για $\Phi 15$ και εκτυπώθηκαν ξανά. Οι ανοχές πλέον είναι οι επιθυμητές, συνεπώς ξεκινάει η συναρμολόγηση του VEH.



Σχήμα 4.4: Δίσκος τύλιξης των πηνίων.



Σχήμα 4.5: Δίσκος του στάτορα.



Σχήμα 4.6: Δεξιός (πάνω) και αριστερός (κάτω) δίσκος του ρότορα.

Κατά τη συναρμολόγηση του στάτορα οι μαγνήτες τοποθετούνται πρώτα στον ένα δίσκο και σταθεροποιούνται με τη τοποθέτηση του 2^{ου} δίσκου από την άλλη πλευρά.

Το κάθε πηνίο αποτελείται από 50 σπείρες σύρματος πάχους 0.25mm και έχει ίδια φορά περιέλιξης με το προηγούμενό του. Η αρχή και το τέλος του σύρματος περιέλιξης καταλήγει σε καλώδιο που διαπερνά εγκάρσια τον κεντρικό άξονα και εξέρχεται από αυτόν μέσω οπής στο σημείο που βρίσκεται δίσκος με τα πηνία.

Αρχικά εισάγεται το καλώδιο των πηνίων στην εγκάρσια τρύπα του άξονα και εξέρχεται από τη τρύπα που βρίσκεται στην άκρη του σφηνάουλακα, παραμένοντας σε αναμονή για τη σύνδεση του με το δίσκο των πηνίων. Στη συνέχεια τοποθετείται σφήνα 4X4X20 στο

σφηναύλακα και εισάγεται από το δεξί μέρος του άξονα ο στάτορας μέχρι να φτάσει τη πατούρα διατομής Φ14 που βρίσκεται στο μέσον του.

Ακολουθεί η εισαγωγή του δίσκου με τα πηνία επίσης από τη δεξιά πλευρά του άξονα μέχρι να σταματήσει στο στάτορα και στο καλώδιο, όπου γίνεται η συνδεσμολογία. Για να εξασφαλιστεί ότι τα τεμάχια δε θα μετακινούνται προς τα δεξιά του άξονα τοποθετείται δεξιά του δίσκου των πηνίων ασφάλεια DIN 471 διατομής Φ11, στην υπάρχουσα αυλάκωση του άξονα.

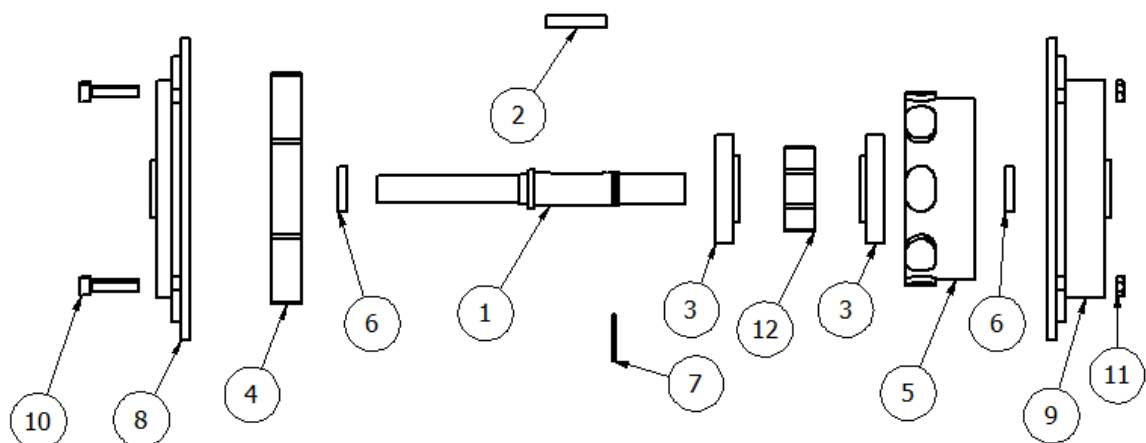
Για τη συναρμολόγηση του ρότορα, αρχικά τοποθετείται ρουλεμάν 10-15 στην οπή του αριστερού δίσκου του ρότορα και στη συνέχεια εισέρχεται στον άξονα από αριστερά, μέχρι να συναντήσει τη κεντρική πατούρα Φ14. Στη συνέχεια, τοποθετείται το 2^ο ρουλεμάν στο δεξιό δίσκο και εισέρχεται στον άξονα από τα δεξιά, μέχρι να συναντήσει τη πατούρα Φ11, ακριβώς πριν την ασφάλεια. Οι μαγνήτες τοποθετούνται στην αυλάκωση του αριστερού δίσκου και έπειτα στην αυλάκωση του δεξιού. Οι 4 οπές Φ3 των δίσκων του ρότορα είναι πλέον ευθυγραμμισμένες, οπότε συσφίγγονται μεταξύ τους με 4 βίδες M3X16 και 4 παξιμάδια M3-6.

Για την εκτέλεση των απαραίτητων πειραμάτων χρειάζεται αρχικά να γίνει υπολογισμός του συντελεστή της τριβής που προσδίδουν τα 2 ρουλεμάν στο ρότορα του VEH. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες θα γίνει η μέτρηση θα πρέπει να είναι ίδιες με αυτές της δοκιμής του VEH.

Καθώς ο ρότορας του VEH παρουσιάζει πλήρη συμμετρία θα πρέπει να προσαρτηθεί περιμετρικά του μια έκκεντρη μάζα, ώστε να αποκτήσει συμπεριφορά περιστροφικού εκκρεμούς. Το βάρος της καθορίζεται πειραματικά, καθώς όσο αυξάνεται η έκκεντρη μάζα τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα έναρξης περιστροφής του εκκρεμούς. Κατασκευάζεται από μπρούτζινη πλάκα πάχους 5.7mm ένα παραλληλόγραμμο τεμάχιο, διαστάσεων 48.3X25.5X5.7 και βάρους 51gr. Το τεμάχιο θα στηριχθεί περιμετρικά του ρότορα στο κενό χώρο που υπάρχει μεταξύ των 2 δίσκων και θα εφάπτεται κατά μήκος ενός απ' τους μαγνήτες. Εφόσον η απόσταση μεταξύ των 2 δίσκων είναι 4mm το τεμάχιο φρεζάρεται κατά 1.7mm στο σημείο που θα εισέλθει στους δίσκους και ανοίγεται οπή Φ3 ώστε να τοποθετηθεί σε θέση που φέρει βίδα M3, για βέλτιστη στήριξη.



Σχήμα 4.7: Ο τελικός VEH.



PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	MAIN SHAFT
2	1	din6885_st_steel_4x4x20
3	2	STATIC DISC
4	8	MOVING MAGNET
5	1	COIL DISC
6	2	skf_bearing_w_61700_2
7	1	circlips_din471_11_1
8	1	MOVING DISC LEFT
9	1	MOVING DISC RIGHT
10	4	din_en_iso_4762_m3x16
11	4	nut_iso_4032-m3-6
12	8	STATIC MAGNET

Σχήμα 4.8: Exploded view της συναρμολόγησης του VEH.

4.3 Μέτρηση τριβής απόσβεσης στο ρότορα του VEH

4.3.1 Προετοιμασία και διενέργεια του πειράματος

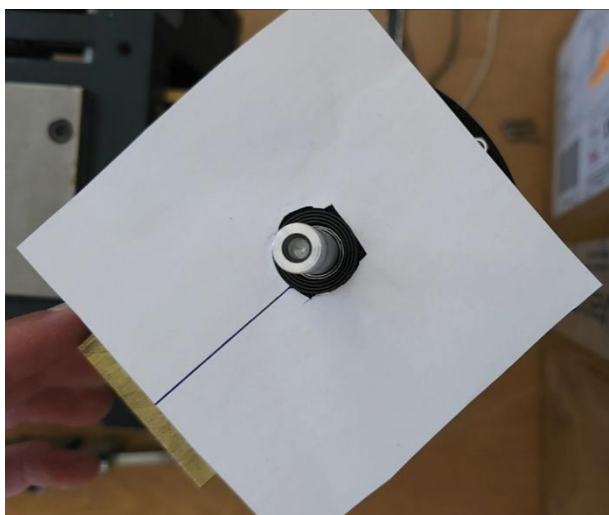
Ο συντελεστής τριβής απόσβεσης θα υπολογισθεί με την ίδια μέθοδο όπως προηγουμένως, δηλαδή μετρώντας πειραματικά τη γωνιακή μετατόπιση του ρότορα κατά την ελεύθερη ταλάντωση του με τη πάροδο του χρόνου και εφαρμόζοντας curve fitting της πειραματικής καμπύλης με τη θεωρητική.

Λόγω της αυξημένης τριβής απόσβεσης που προσδίδει στο σύστημα ο rotary encoder, η μέτρηση της γωνιακής μετατόπισης θα γίνει με βιντεοσκόπηση της ταλάντωσης και επεξεργασία του video με χρήση MATLAB, όπως έγινε παραπάνω. Αρχικά η επιφάνεια του ρότορα καλύπτεται από λευκό χαρτί το οποίο φέρει μια έντονη γραμμή, η οποία θα χρησιμεύσει ως «δείκτης» της εκάστοτε γωνίας ταλάντωσης. Το χαρτί τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε η γραμμή να βρίσκεται ακριβώς στο μέσον ενός εκ των 8 μαγνητών.

Η στήριξη του VEH γίνεται δημιουργώντας μια οπή Φ10 βάθους 40mm στη πλαϊνή πλευρά μιας πλαστικής πλάκας και παχτώνοντας την αριστερή πλευρά του άξονα του VEH σε αυτή. Η πλάκα έπειτα συσφίγγεται στην απέναντι πλευρά της στη μέγγενη του εργαστηρίου διασφαλίζοντας ότι ο άξονας περιστροφής του ρότορα είναι κάθετος με το έδαφος και ακλόνητος.

Η κάμερα του κινητού τοποθετείται περίπου 300mm πάνω από το ρότορα, εστιάζοντας στον άξονα περιστροφής του. Η ανάλυση του βίντεο ορίζεται στα 1080p και ο ρυθμός καρέ στα 120FPS.

Η καταγραφή ξεκινάει, ο ρότορας μετατοπίζεται προσεγγιστικά κατά 45 μοίρες και αφήνεται να ταλαντωθεί με μηδενική αρχική ταχύτητα. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται 4 ακόμη φορές με σκοπό να επιλεγεί το video στο οποίο οι 2 προηγούμενες συνθήκες είναι βέλτιστες.



Σχήμα 4.9: Ο ρότορας με τη γραμμή-δείκτη της ταλάντωσης.

4.3.2 Επεξεργασία των μετρήσεων

Οι 5 καταγραφές εξετάζονται καρέ-καρέ στο σημείο που γίνεται η έναρξη της ταλάντωσης. Για αποφυγή περισπασμών του κώδικα ανίχνευσης της γραμμής-δείκτη η περιοχή γύρω από το ρότορα καλύπτεται με μαύρο φόντο και ο άξονας του ρότορα με λευκό. Το επεξεργασμένο πλέον βίντεο εισάγεται στο κώδικα της MATLAB που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο πείραμα με σκοπό να γίνει υπολογισμός της γωνιακής μετατόπισης με τη μέθοδο Hough.

Για μια ενδεικτική εικόνα των ακραίων θέσεων του εκκρεμούς, το βίντεο επεξεργάζεται όπως στο προηγούμενο πείραμα και προστίθεται σε κάθε καρέ ακραίας θέσης μια παύση με τον αντίστοιχο χρόνο και γωνία να αναγράφονται πάνω αριστερά. Ωστόσο, στο τελευταίο καρέ που το εκκρεμές ισορροπεί παρατηρείται απόκλιση 3 μοιρών μεταξύ της γωνίας των 180 μοιρών, δηλαδή της θέσης ισορροπίας, και της θέσης που βρίσκεται η γραμμή. Αυτό πιθανώς οφείλεται σε κακή ευθυγράμμιση της κάμερας είτε του χαρτιού πάνω στο ρότορα. Για την εύκολη διόρθωση του σφάλματος ο κώδικας της MATLAB τροποποιείται έτσι ώστε να προσθέτει 3 μοίρες σε κάθε γωνία που υπολογίζει καθώς υπάρχει αρνητικό σφάλμα στις μετρήσεις.

Καθώς πλέον απαιτείται βέλτιστη ακρίβεια στον υπολογισμό του συντελεστή, τα πειραματικά δεδομένα θα πρέπει να περιλαμβάνουν τη γωνία του ρότορα σε κάθε καρέ του video, και όχι μόνο στις ακραίες θέσεις της ταλάντωσης όπως προηγούμενως.

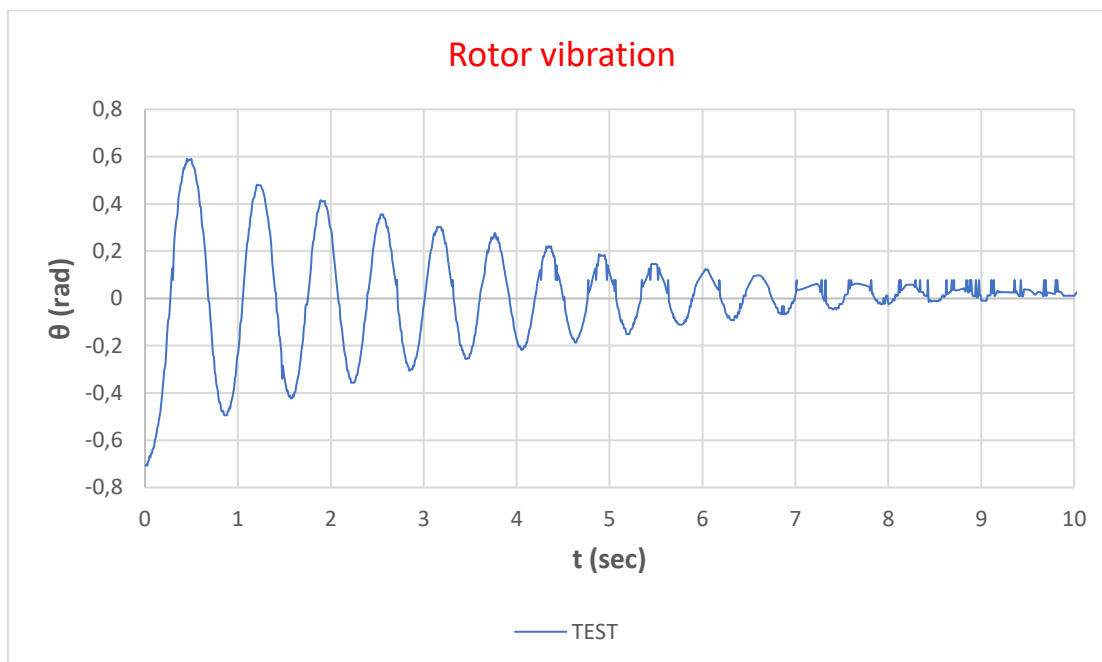
Συνεπώς, ο κώδικας τροποποιείται έτσι ώστε κατά την εκτέλεση του να αποθηκεύει στο Excel τη χρονική στιγμή του κάθε καρέ σε στήλη Time και την αντίστοιχη γωνία σε διπλανή στήλη Angle. Για τις περιπτώσεις που ο κώδικας ανίχνευε λανθασμένα τις παραπληρωματικές των γωνιών, προστίθεται έλεγχος ο οποίος προσθέτει ή αφαιρεί 180 μοίρες στη γωνία εάν αυτή υπολογίζεται εκτός ορίου των 2 αρχικών ακραίων θέσεων της ταλάντωσης.

Με τη πρώτη εκτέλεση του κώδικα παρατηρείται ότι, όπως και στο προηγούμενο πείραμα, ανιχνεύει τις παραπληρωματικές ορισμένων γωνιών και όχι τις σωστές γωνίες. Για να διορθωθεί το πρόβλημα αυτό προστίθεται ένας λογικός έλεγχος, ο οποίος προσθέτει ή αφαιρεί στις «λανθασμένες» γωνίες 180 μοίρες βάση ενός εύρους τιμών που μπορεί να λάβει η γωνία του ρότορα.

Για να βρεθεί το εύρος τιμών θα πρέπει να βρεθούν τουλάχιστον η αρχική γωνία του εκκρεμούς καθώς και η γωνία της πρώτης ακραίας θέσης του. Προφανώς, εφόσον πρόκειται για φθίνουσα ταλάντωση το εκκρεμές δε μπορεί να υπερβεί τις 2 αυτές θέσεις λόγω τριβής. Παρατηρείται ότι η 1^η ακραία θέση βρίσκεται στις 135.33 μοίρες και η 2^η στις 209,33. Συνεπώς, επιλέγεται ένας εύρος τιμών μεταξύ των 2 αυτών γωνιών με αποτέλεσμα όταν μια γωνία βρεθεί πριν από αυτό να αυξάνεται κατά 180 μοίρες ενώ όταν βρεθεί μετά από αυτό να μειώνεται, αντίστοιχα.

Τέλος, παρατηρείται πως ο αλγόριθμος εύρεσης ακμών που χρησιμοποιεί ο κώδικας δεν εντοπίζει τη γραμμή για ορισμένα καρέ/χρονικές στιγμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να θεωρεί ότι η γραμμή βρίσκεται στη θέση ισορροπίας, δηλαδή στις 180 μοίρες. Για την επίλυση του προβλήματος, προστίθεται έλεγχος στο κώδικα ο οποίος κάνει προσπέλαση του εντοπίζοντας από 2 και πάνω διαδοχικές τιμές γωνίας ίσες με 180. Στη περίπτωση αυτή αναγνωρίζει πως η γραμμή έχει πάψει να εντοπίζεται και διαγράφει όλα τα διαδοχικά σημεία από τα δεδομένα. Αντιθέτως αν βρει μεμονωμένη τιμή γωνίας ίση με 180 δε τη διαγράφει, καθώς πρόκειται για στιγμή που το εκκρεμές διέρχεται από τη θέση ισορροπίας του.

Με την εκτέλεση του βελτιωμένου κώδικα προκύπτει η παρακάτω γραφική παράσταση με τη μεταβολή της γωνίας του εκκρεμούς σε σχέση με το χρόνο για το ρότορα του VEH.



Σχήμα 4.10: Πειραματική καμπύλη της ταλάντωσης του ρότορα.

Η φθίνουσα ταλάντωση που εκτελεί ο ρότορας περιγράφεται από την ακόλουθη Σ.Δ.Ε. 1^{ης} τάξης:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left[\frac{\theta(2)}{-c_b \theta(2) - B \sin\left(\frac{n_p}{2} \theta(1)\right)} \right], \quad \vec{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

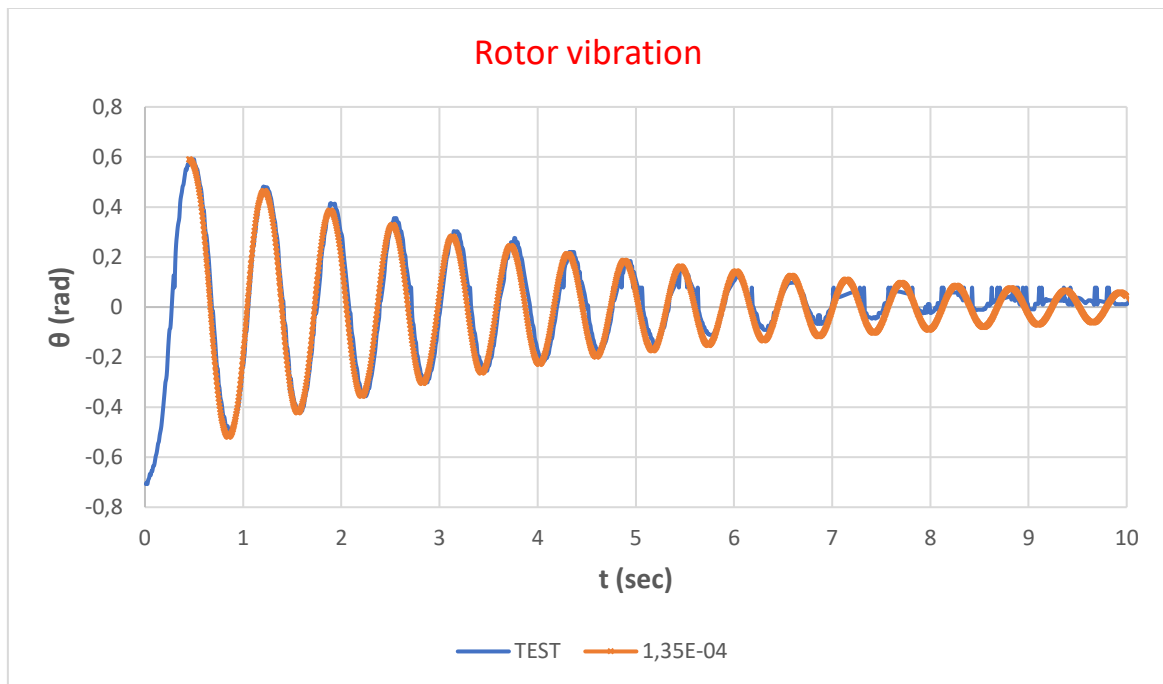
Η επίλυση της παραπάνω Σ.Δ.Ε. θα γίνει με χρήση κώδικα της MATLAB αφού πρώτα υπολογισθούν όλες οι παράμετροί της.

Παράμετρος	Τιμή
B	0.0096 Nm
n_p	8
I_{disc}	2979.11 kg · m ²
θ_0	0.590005142 rad

Πίνακας 4.11: Παράμετροι επίλυσης της Σ.Δ.Ε. για τη ταλάντωση του ρότορα.

Από προηγούμενα πειράματα, η τιμή της μαγνητικής ροπής επαναφοράς B υπολογίζεται 0.0096 Nm (βλ. Σχήμα 2.18).

Όπως και στο προηγούμενο fitting, η θεωρητική καμπύλη δε λαμβάνει υπόψιν την απλή τριβή που υπάρχει στο σύστημα μέχρι να βρεθεί στη 1^η του ακραία θέση. Συνεπώς η θεωρητική καμπύλη ξεκινάει τη χρονική στιγμή που ο ρότορας βρίσκεται στη 1^η ακραία θέση ($t_0 = 0.45045 \text{ sec}$), με αρχική γωνία τη γωνία που έχει στη θέση αυτή, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.12 Πειραματική και θεωρητική καμπύλη ταλάντωσης του ρότορα.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, ο συντελεστής τριβής για τη ταλάντωση του ρότορα προκύπτει $c_b = 1.35E^{-4} \text{ Nms/rad}$.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ VEH

5.1 Προετοιμασία των πειραμάτων

Στο τελευταίο κομμάτι της παρούσας εργασίας, ο VEH μελετάται ως προς τη συμπεριφορά του όταν ταλαντώνεται κατά τη διεύθυνση του άξονά του.

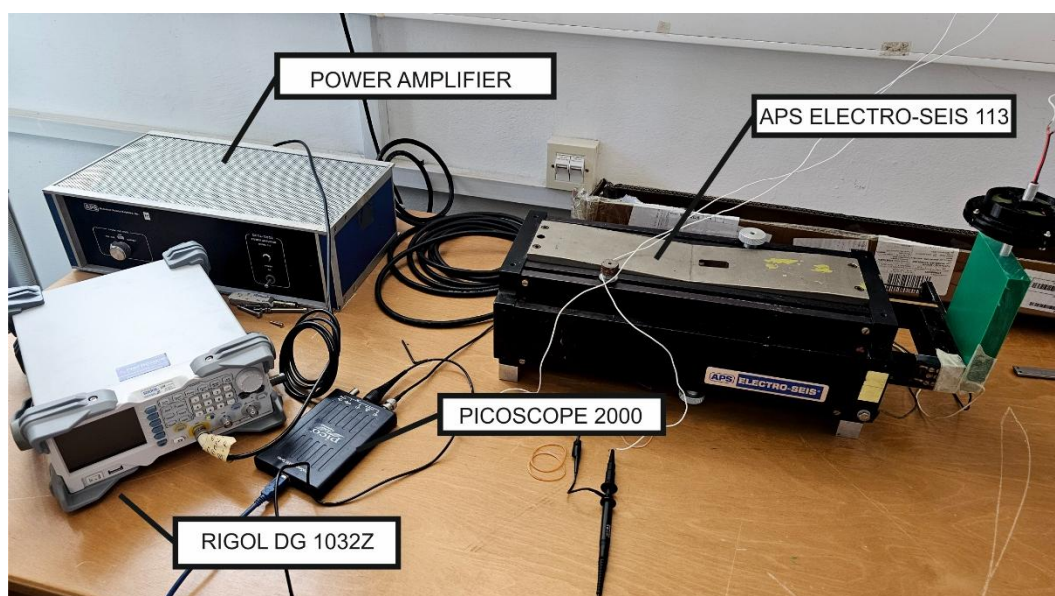
Για τη δημιουργία καθορισμένων ταλαντώσεων χρησιμοποιείται ένα Shaker Table (APS ELECTRO-SEIS 113) το οποίο με τη βοήθεια μιας γεννήτριας συχνοτήτων (RIGOL DG 1032Z) λαμβάνει ένα ημιτονοειδές σήμα εισόδου. Το σήμα αυτό καθορίζεται από το πλάτος του, τη συχνότητα και την αρχική του φάση.

Το σύστημα ελέγχου της συσκευής αναλύει το σήμα, μετατρέποντας τη συχνότητα του σε ταχύτητα της ταλάντωσης και το πλάτος σε ευθύγραμμη μετατόπιση του κινούμενου μέρους του. Στη συνέχεια, ένας ηλεκτρομαγνητικός ενεργοποιητής λαμβάνει τις εντολές και με τη βοήθεια ενός ενισχυτή δημιουργεί την επιθυμητή ταλάντωση του τραπέζιού.

Πάνω στο τραπέζι βρίσκεται ενσωματωμένος ένας αισθητήρας ανάδρασης ο οποίος μετατρέπει τη μετατόπιση του τραπεζιού σε σήμα ηλεκτρικής τάσης, ώστε ο χρήστης να παρακολουθεί τη κίνησή του.

Για την έναρξη του πειράματος, η πλαστική πλάκα που φέρει παχτωμένο το VEH βιδώνεται καλά στο πλαϊνό άκρο του τραπεζιού, κάθετη σε αυτό. Στη συνέχεια, ο ενισχυτής του τραπεζιού συνδέεται στο ρεύμα και έπειτα με το τραπέζι. Η γεννήτρια συχνοτήτων συνδέεται και αυτή στο ρεύμα και έπειτα στο καλώδιο εισόδου του ενισχυτή. Για τη παρακολούθηση του πειράματος, συνδέεται στον Η/Υ ο παλμογράφος Picoscope που φέρει 2 κανάλια εισόδου. Στο πρώτο κανάλι συνδέεται το καλώδιο του αισθητήρα ανάδρασης του τραπεζιού και στο δεύτερο το καλώδιο από την έξοδο των πηνίων του VEH.

Σκοπός του πειράματος είναι «δοθεί» ένα εύρος συχνοτήτων στο τραπέζι έτσι ώστε ο VEH να μελετηθεί ως προς την απόκριση σε αυτές. Τόσο στη φάση της ταλάντωσής του όσο και του συντονισμού θα καταγραφούν η τάση που παράγουν τα πηνία του VEH και η ταχύτητα ταλάντωσης του τραπεζιού.



Σχήμα 5.1: Η πειραματική διάταξη.

Για την έναρξη του πειράματος επιλέγεται η λειτουργία SWEEP στη γεννήτρια συχνοτήτων RIGOL και δίνονται οι ακόλουθοι παράμετροι:

SWEEP	100s
RETURN	100s
START	1Hz
STOP	5Hz
MARK	OFF
FREQ	1KHz
AMPL	5Vpp
PHASE	0

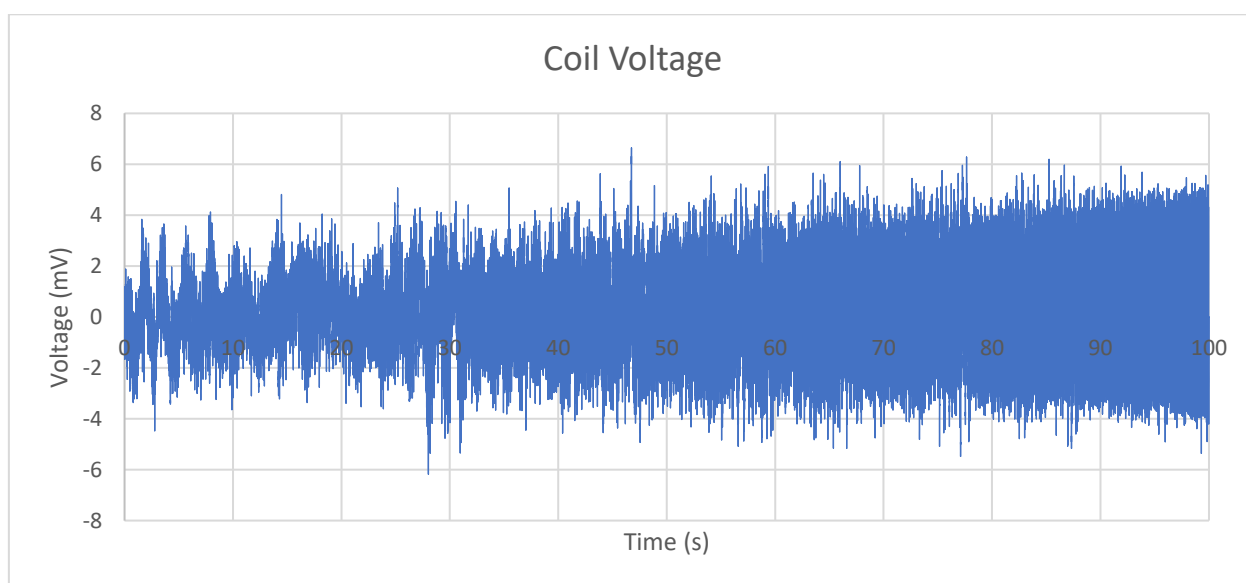
Πίνακας 5.2: Παράμετροι γεννήτριας συχνοτήτων.

5.2 Διενέργεια των πειραμάτων

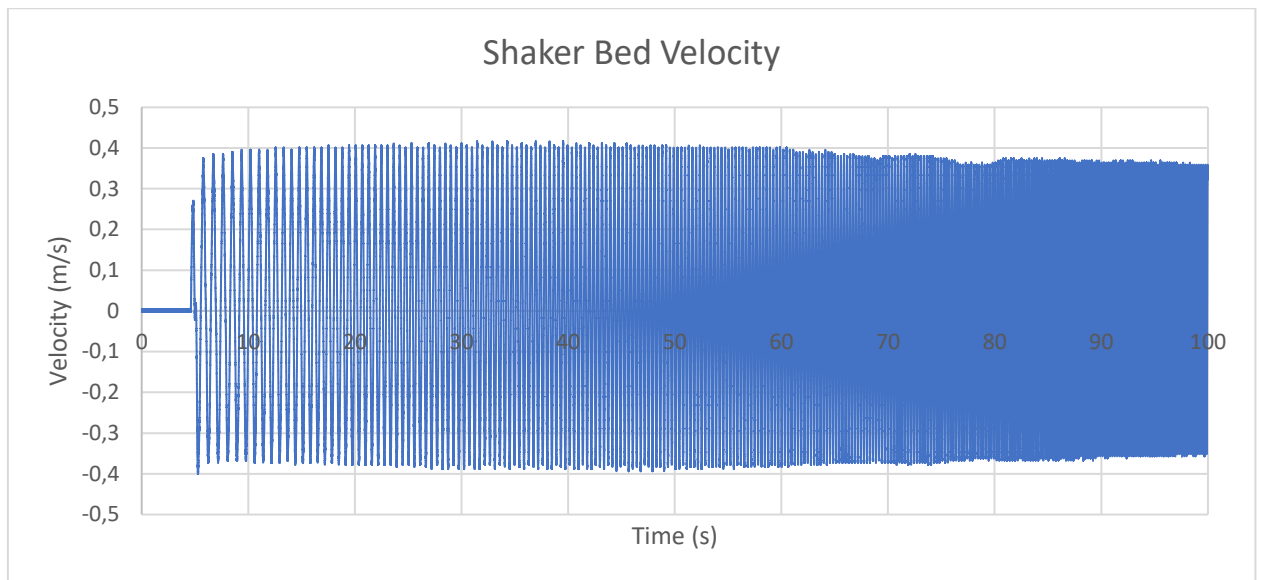
5.2.1 Πείραμα με συντονισμό του VEH

Παρατηρείται πως κατά την έναρξη της ταλάντωσης από 1Hz έως 2Hz ο ρότορας ταλαντώνεται με τη γωνιακή μετατόπιση κάθε κύκλου να αυξάνεται συνεχώς. Κοντά στα 2Hz η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσής του συντονίζεται με αυτή του τραπέζιου, με αποτέλεσμα να αρχίζει να εκτελεί πλήρεις περιστροφές.

Ο ρυθμός δειγματοληψίας στα 2 κανάλια του παλμογράφου είναι $f_s = 1\text{KHz}$, συνεπώς για $\Delta t = 100\text{s}$ που διαρκεί το πείραμα καταγράφονται 100.000 μετρήσεις τάσης συναρτήσει του χρόνου. Καθώς στο κανάλι που μετράει τη τάση των πηνίων υπάρχει μεγάλος θόρυβος, εφαρμόζεται φίλτρο τύπου lowpass με συχνότητα αποκοπής τα 50Hz. Συνεπώς, το σήμα γίνεται πιο ευκρινές, καθώς κάθε συχνότητα που υπερβαίνει τα 50Hz αφαιρείται. Για τη μετατροπή των μετρήσεων του αισθητήρα ανάδρασης από τάση σε ταχύτητα ταλάντωσης οι μετρήσεις διαιρούνται με τη σταθερά $S = 17.283$ που αναγράφεται στον αισθητήρα. Οι γραφικές παραστάσεις είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 5.3: Παραγόμενη τάση κατά τη διάρκεια του πειράματος.

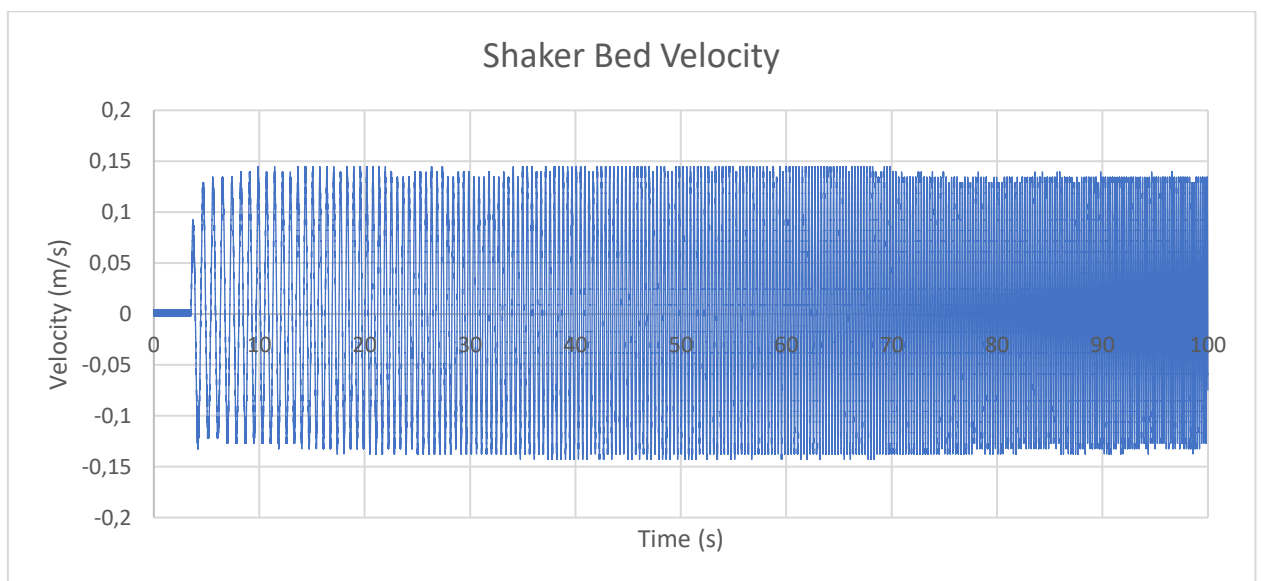


Σχήμα 5.4: Ταχύτητα ταλάντωσης του τραπεζιού κατά τη διάρκεια του πειράματος.

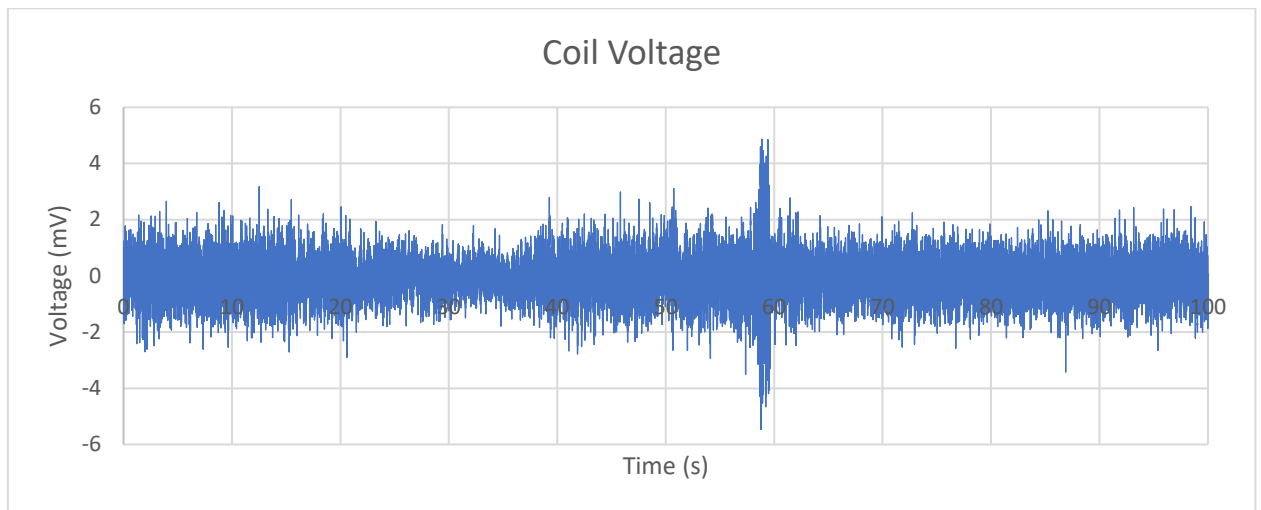
Για το συγκεκριμένο πλάτος κύματος και εύρος συχνοτήτων παρατηρείται πως η ταχύτητα του τραπεζιού εναλλάσσεται μεταξύ $\pm 4\text{m/s}$. Αντίστοιχα, η παραγόμενη τάση από τα πηνία του VEH αυξάνεται κατά μέση τιμή όλο και περισσότερο όσο ο ρότορας πλησιάζει το συντονισμό ενώ λαμβάνει μέγιστες τιμές (6mV) κατά το συντονισμό.

5.2.2 Πείραμα χωρίς συντονισμό του VEH

Για να μελετηθούν οι διαφορές της παραγόμενης τάσης κατά τη φάση της ταλάντωσης του ρότορα το πείραμα επαναλαμβάνεται, καταγράφοντας δεδομένα προτού ο VEH βρεθεί σε συντονισμό. Τα διαγράμματα ταχύτητας και τάσης ως προς το χρόνο είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 5.5: Ταχύτητα ταλάντωσης του τραπεζιού κατά τη διάρκεια του πειράματος.

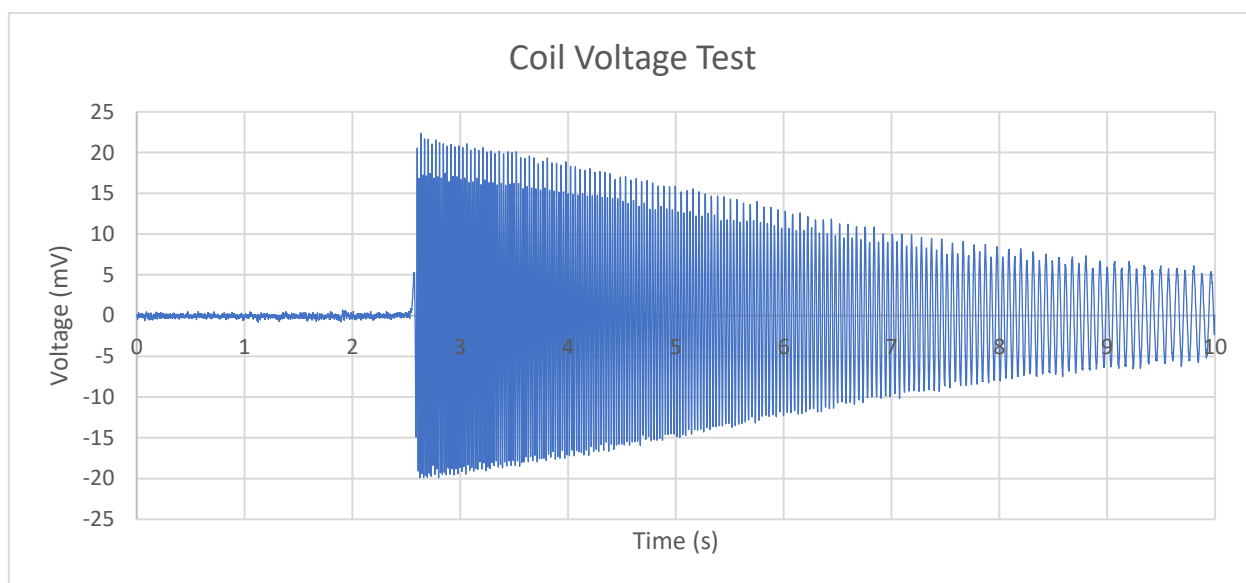


Σχήμα 5.6: Παραγόμενη τάση κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Παρατηρείται πως κατά την ταλάντωση του ρότορα η τάση κυμαίνεται κατά μέσο όρο στα $\pm 2\text{mV}$, δηλαδή τα πηνία πρακτικά δε παράγουν κάποια τάση πριν τη φάση του συντονισμού. Η ταχύτητα ταλάντωσης του τραπέζιου δεν υπερβαίνει τα 0.15m/s .

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

Η τάση που μετρήθηκε κατά το συντονισμό (6mV) είχε σημαντική απόκλιση από τη τάση που είχε υπολογισθεί θεωρητικά η οποία ήταν περίπου στα 80mV. Κύρια αιτία της απόκλισης αυτής θα μπορούσε να είναι η λάθος περιέλιξη των πηνίων ή η μη βέλτιστη διαστασιολόγησή τους. Για περεταίρω διερεύνηση, ο ρότορας λύνεται και αφαιρούνται, μη διαδοχικά, 4 από τους 8 μαγνήτες. Με αυτό το τρόπο θα εξεταστεί αν 2 διαδοχικά πηνία σχηματίζουν ένα πόλο, δηλαδή οι τάσεις τους προστίθενται, ή αν το ένα «ακυρώνει» το άλλο. Ο ρότορας συναρμολογείται ξανά και του δίνεται ώθηση να περιστραφεί, με ταχύτητα παρόμοια αυτής του συντονισμού του. Οι μετρήσεις είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 6.1: Παραγόμενη τάση κατά τη περιστροφή του ρότορα.

Η τάση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της τη χρονική στιγμή που ασκείται η ροπή στο ρότορα και φθίνει με τη πάροδο του χρόνου, καθώς η περιστροφή του επιβραδύνεται μέχρι ακινησίας λόγω τριβής. Η μέγιστη τιμή τάσης είναι πλέον τα 20mV αθροιστικά, υποδεικνύοντας πως το κάθε πηνίο μπορεί να παράξει τουλάχιστον 5mV. Συνεπώς, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως τα πηνία θα έπρεπε να είχαν τυλιχθεί με **εναλλασσόμενη** φορά, καθώς έτσι οι τάσεις τους θα αθροίζονταν. Στη παρούσα κατάσταση, η περιέλιξη τους όλων με την ίδια φορά οδηγεί στην αλληλεξουδετέρωση των τάσεων τους. Η ελάχιστη τάση (6mV) που μετρίεται οφείλεται σε τυχόν ανομοιομορφίες στο τύλιγμά τους, καθώς υπό ιδανικές συνθήκες θα έπρεπε να ήταν μηδενική.

Σαν μελλοντικός στόχος βελτίωσης της εργασίας τίθεται ο επανασχεδιασμός της βάσης τύλιξης των πηνίων και η περιέλιξη τους με την ορθή φορά.

Ως συμπέρασμα της παρούσας εργασίας καταγράφεται ότι η παραγόμενη τάση του VEH αυξάνεται όσο ο ρότορας πλησιάζει το συντονισμό. Μεγιστοποιείται δε κατά το συντονισμό, όπου ο ρότορας αποκτά τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής. Η μηχανολογική κατασκευή του VEH ήταν αρκετά ικανοποιητική και οι συμπεριφορά του ως προς το συντονισμό παραπλήσια των θεωρητικών αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ding W, Mao Z, Cao H, Wang K. Performance evaluation of a two-directional energy harvester with low-frequency vibration. *Smart Mater Struct* 2020;29(5): 055006.
- [2] Malaji PV, Ali SF. Magneto-mechanically coupled electromagnetic harvesters for broadband energy harvesting. *Appl Phys Lett* 2017;111:1–6. <https://doi.org/10.1063/1.4997297>.
- [3] Graves, J.; Kuang, Y.; Zhu, M.L. Counterweight-pendulum energy harvester with reduced resonance frequency for unmanned surface vehicles. *Sens. Actuator A-Phys.* 2021, 321, 112577.
- [4] Xu J, Tang J. Multi-directional energy harvesting by piezoelectric cantilever-pendulum with internal resonance. *Appl Phys Lett* 2015;107(21):213902.
- [5] Pan J, Qin W, Deng W, Zhang P, Zhou Z. Harvesting weak vibration energy by integrating piezoelectric inverted beam and pendulum. *Energy* 2021;227:120374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120374>.
- [6] Wu Y, Qiu J, Kojima F, Ji H, Xie W, Zhou S. Design methodology of a frequency up-converting energy harvester based on dual-cantilever and pendulum structures. *AIP Adv* 2019;9(4):045312.
- [7] Wang Y, Gao M, Ouyang H, Li S, He Q, Wang P. Modelling, simulation, and experimental verification of a pendulum-flywheel vibrational energy harvester. *Smart Mater Struct* 2020;29(11):115023.
- [8] Wang T, Zhu S. Analysis and Experiments of a Pendulum Vibration Energy Harvester with a Magnetic Multi-Stable Mechanism. *IEEE Trans Magn* 2022;58 (8):1–7.
- [9] Kuang Y, Hide R, Zhu M. Broadband energy harvesting by nonlinear magnetic rolling pendulum with subharmonic resonance. *Appl Energy* 2019:255. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113822>.
- [10] Ding W, Song B, Mao Z, Wang K. Experimental investigations on a low frequency horizontal pendulum ocean kinetic energy harvester for underwater mooring platforms. *J Mar Sci Technol (Japan)* 2016;21:359–67. <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0357-7>.
- [11] Li M, Deng H, Zhang Y, Li K, Huang S, Liu X. Ultra-low frequency eccentric pendulum-based electromagnetic vibrational energy harvester. *Micromachines* 2020;11:1–14. <https://doi.org/10.3390/mi11111009>.
- [12] Zhang T, Tang M, Li H, Li J, Zou Y, Pan Y, et al. A Multidirectional Pendulum Kinetic Energy Harvester Based on Homopolar Repulsion for Low-Power Sensors in New Energy Driverless Buses. *Int J Precision Eng Manuf - Green Technol* 2022; 9(2):603–18.
- [13] Bao B, Wang Q, Wu N, Zhou S. Hand-held piezoelectric energy harvesting structure: Design, dynamic analysis, and experimental validation. *Meas: J Int Meas Confederation* 2021;174:109011. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109011>.
- [14] Toma, D.M.; del Rio, J.; Carbonell-Ventura, M.; Masalles, J.M. Underwater energy harvesting system based on plucked-driven piezoelectrics. In *Proceedings of the Oceans 2015 Genova, Ctr Congressi, Genova, Genova, Italy, 18–21 May 2015*.

- [15] Shukla R, Bell AJ. PENDEXE: A novel energy harvesting concept for low frequency human waistline. *Sens Actuators, A* 2015;222:39–47. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.11.016>.
- [16] Martin JP, Li Q. Design, model, and performance evaluation of a biomechanical energy harvesting backpack. *Mech Syst Sig Process* 2019;134:106318. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106318>.
- [17] Bao, B.; Wang, Q.; Wu, N.; Zhou, S. Hand-held piezoelectric energy harvesting structure: Design, dynamic analysis, and experimental validation. *Measurement* **2021**, 174, 109011.
- [18] Wu, Y.P.; Qiu, J.H.; Zhou, S.P.; Ji, H.L.; Chen, Y.; Li, S. A piezoelectric spring pendulum oscillator used for multi-directional and ultra-low frequency vibration energy harvesting. *Appl. Energy* **2018**, 231, 600–614.
- [19] Zhang C, Zhou L, Cheng P, Liu Di, Zhang C, Li X, et al. Bifilar-Pendulum-Assisted Multilayer-Structured Triboelectric Nanogenerators for Wave Energy Harvesting. *Adv Energy Mater* 2021;11(12):2003616.
- [20] Jiang T, Pang H, An J, Lu P, Feng Y, Liang Xi, et al. Robust Swing-Structured Triboelectric Nanogenerator for Efficient Blue Energy Harvesting. *Adv Energy Mater* 2020;10(23):2000064.
- [21] He C, Chen BD, Jiang T, Xu L, Han CB, Gu GQ, et al. Radial-Grating Pendulum-Structured Triboelectric Nanogenerator for Energy Harvesting and Tilting-Angle Sensing. *Adv Mater Technol* 2018;3(4):1700251.
- [22] Zhong W, Xu L, Wang H, Li D, Wang ZL. Stacked pendulum-structured triboelectric nanogenerators for effectively harvesting low-frequency water wave energy. *Nano Energy* 2019;66:104108. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104108>.
- [23] Hou, C.; Chen, T.; Li, Y.F.; Huang, M.J.; Shi, Q.F.; Liu, H.C.; Sun, L.N.; Lee, C. A rotational pendulum based electromagnetic/triboelectric hybrid-generator for ultra-low-frequency vibrations aiming at human motion and blue energy applications. *Nano Energy* **2019**, 63, 103871.
- [24] Ren, Z.W.; Liang, X.; Liu, D.; Li, X.J.; Ping, J.F.; Wang, Z.M.; Wang, Z.L. Water-Wave Driven Route Avoidance Warning System for Wireless Ocean Navigation. *Adv. Energy Mater.* **2021**, 11, 2101116.
- [25] Xie, W.B.; Gao, L.X.; Wu, L.K.; Chen, X.; Wang, F.Y.; Tong, D.Q.; Zhang, J.; Lan, J.Y.; He, X.B.; Mu, X.J.; et al. A Nonresonant Hybridized Electromagnetic-Triboelectric Nanogenerator for Irregular and Ultralow Frequency Blue Energy Harvesting. *Research* **2021**, 2021, 5963293.
- [26] Zhang, C.G.; Yuan,W.; Zhang, B.F.; Yang, O.; Liu, Y.B.; He, L.X.;Wang, J.;Wang, Z.L. High Space Efficiency HybridNanogenerators for Effective Water Wave Energy Harvesting. *Adv. Funct. Mater.* **2022**, 32, 2111775.
- [27] Fang, L.; Zheng, Q.W.; Hou, W.C.; Zheng, L.; Li, H.X. A self-powered vibration sensor based on the coupling of triboelectric nanogenerator and electromagnetic generator. *Nano Energy* **2022**, 97, 107164.
- [28] D.H. Ballard, Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes, *Pattern Recognition*, Volume 13, Issue 2, 1981, Pages 111-122, ISSN 0031-3203, [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(81\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0031-3203(81)90009-1).

- [29] Ranita Biswas, Jaya Sil, An Improved Canny Edge Detection Algorithm Based on Type-2 Fuzzy Sets, *Procedia Technology*, Volume 4, 2012, Pages 820-824, ISSN 2212-0173, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.134>.
- [30] Jia Yu, Yan J, Soga K, Seshia AA. Parametric resonance for vibration energy harvesting with design techniques to passively reduce the initiation threshold amplitude. *Smart Mater Struct* 2014;23(6):065011.
- [31] Niroomand M, Foroughi HR. A rotary electromagnetic microgenerator for energy harvesting from human motions. *J Appl Res Technol* 2016;14:259–67. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.06.002>.
- [32] Lee BC, Chung GS. Design and analysis of a pendulum-based electromagnetic energy harvester using antiphase motion. *IET Renew Power Gener* 2016;10: 1625–30. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0396>.
- [33] Boren BC, Batten BA, Paasch RK. Active control of a vertical axis pendulum wave energy converter. In: *Proceedings of the American Control Conference*; 2014, 1033–8. <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859459>.
- [34] Yerrapragada K, Ansari MH, Karami MA. Enhancing power generation of floating wave power generators by utilization of nonlinear roll-pitch coupling. *Smart Mater Struct* 2017;26:94003. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa7710>.
- [35] Boren BC, Lomonaco P, Batten BA, Paasch RK. Design, Development, and Testing of a Scaled Vertical Axis Pendulum Wave Energy Converter. *IEEE Trans Sustainable Energy* 2017;8:155–63. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2589221>.
- [36] Yurchenko D, Alevras P. Parametric pendulum based wave energy converter. *Mech Syst Sig Process* 2018;99:504–15. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.06.026>.
- [37] Dostal L, Pick MA. Theoretical and experimental study of a pendulum excited by random loads. *Eur J Appl Math* 2019;30:912–27. <https://doi.org/10.1017/S0956792518000529>.
- [38] Anurakpandit T, Townsend NC, Wilson PA. The numerical and experimental investigations of a gimballed pendulum energy harvester. *Int J Non Linear Mech* 2020;120:103384. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2019.103384>.
- [39] Sommermann P, Cartmell MP. The dynamics of an omnidirectional pendulum harvester. *Nonlinear Dyn* 2021;104:1889–900. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06479-Z>.
- [40] Wang YJ, Lee CK. Dynamics and power generation of wave energy converters mimicking biaxial hula-hoop motion for mooring-less buoys. *Energy* 2019;183: 547–60. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.135>.
- [41] Sequeira D, Little J, Mann BP. Investigating threshold escape behavior for the gimballed horizontal pendulum system. *J Sound Vib* 2019;450:47–60. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.03.008>.
- [42] Graves J, Kuang Y, Zhu M. Counterweight-pendulum energy harvester with reduced resonance frequency for unmanned surface vehicles. *Sens Actuators, A* 2021;321:112577. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112577>.
- [43] Yurchenko D, Alevras P. Dynamics of the N-pendulum and its application to a wave energy converter concept. *Int J Dynam Control* 2013;1:290–9. <https://doi.org/10.1007/s40435-013-0033-x>.

- [44] Cai Q, Zhu S. Applying double-mass pendulum oscillator with tunable ultra-low frequency in wave energy converters. *Appl Energy* 2021;298:117228. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117228>.
- [45] Punyakaew S, Parnichkun M. Vibration energy harvesting for low frequency using auto-tuning parametric rolling pendulum under exogenous multi-frequency excitations. *Theor Appl Mech Lett* 2020;10:448–55. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2020.01.059>.
- [46] Izadgoshasb, I.; Lim, Y.Y.; Tang, L.H.; Padilla, R.V.; Tang, Z.S.; Sedighi, M. Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system. *Energy Convers. Manag.* **2019**, 184, 559–570.
- [47] Stachowiak, T.; Okada, T. A numerical analysis of chaos in the double pendulum. *Chaos Solitons Fractals* **2006**, 29, 417–422.
- [48] Nikolai, B.; Gabin, A.M.; Jimenez, R.Z. Double Pendulum Induced Stability. *Int. J. Appl. Mech.* **2015**, 7, 1550088.
- [49] 111. Oiwa, S.; Yajima, T. Jacobi stability analysis and chaotic behavior of nonlinear double pendulum. *Int. J. Geom. Methods Mod. Phys.* **2017**, 14, 1750176.
- [50] Wojna, M.; Wijata, A.; Wasilewski, G.; Awrejcewicz, J. Numerical and experimental study of a double physical pendulum with magnetic interaction. *J. Sound Vib.* **2018**, 430, 214–230.
- [51] Avanco, R.H.; Balthazar, J.M.; Tusset, A.M.; Ribeiro, M.A. Short comments on chaotic behavior of a double pendulum with two subharmonic frequencies and in the main resonance zone. *ZAMM-Z. Angew. Math. Mech.* **2021**, 101, e202000197.
- [52] Kumar R, Gupta S, Ali SF. Energy harvesting from chaos in base excited double pendulum. *Mech Syst Sig Process* 2019;124:49–64. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.037>.
- [53] Liang, C.W.; Wu, Y.; Zuo, L. Broadband pendulum energy harvester. *Smart Mater. Struct.* **2016**, 25, 095042.
- [54] Graves, J.; Zhu, M.L. Design and experimental validation of a pendulum energy harvester with string-driven single clutch mechanical motion rectifier. *Sens. Actuator A-Phys.* **2022**, 333, 113237.
- [55] Jiang W, Han X, Chen L, Bi Q. Improving energy harvesting by internal resonance in a spring-pendulum system. *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao* 2020;36: 618–23. <https://doi.org/10.1007/s10409-020-00945-4>.
- [56] Lin Z, Zhang B, Xie Y, Wu Z, Yang J, Wang ZL. Elastic-Connection and Soft- Contact Triboelectric Nanogenerator with Superior Durability and Efficiency. *Adv Funct Mater* 2021;31:1–8. <https://doi.org/10.1002/adfm.202105237>.
- [57] Martin JP, Li Q. Design, model, and performance evaluation of a biomechanical energy harvesting backpack. *Mech Syst Sig Process* 2019;134:106318. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106318>.
- [58] Castagnetti D. A simply tunable electromagnetic pendulum energy harvester. *Meccanica* 2019;54:749–60. <https://doi.org/10.1007/s11012-019-00976-7>.
- [59] Bao B, Zhou S, Wang Q. Interplay between internal resonance and nonlinear magnetic interaction for multi-directional energy harvesting. *Energy Convers Manage* 2021;244:114465. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114465>.

- [60] Tao Wang, Pendulum-based vibration energy harvesting: Mechanisms, transducer integration, and applications, *Energy Conversion and Management*, Volume 276, 2023, 116469, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116469>.
- [61] 44. Zhang, C.; Tang, W.; Han, C.B.; Fan, F.R.; Wang, Z.L. Theoretical Comparison, Equivalent Transformation, and Conjunction Operations of Electromagnetic Induction Generator and Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy. *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 3580–3591.
- [62] Uzun Y, Kurt E, Hilal KH. Explorations of displacement and velocity nonlinearities and their effects to power of a magnetically-excited piezoelectric pendulum. *Sens Actuators, A* 2015;224:119–30. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.01.033>.
- [63] Ren H, Wang T. Development and modeling of an electromagnetic energy harvester from pressure fluctuations. *Mechatronics* 2018;49:36–45. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.11.008>.
- [64] Wanga YJ, De CC, Sunga CK. Design of a frequency-adjusting device for harvesting energy from a rotating wheel. *Sens Actuators, A* 2010;159:196–203. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.12.007>.
- [65] Roundy S, Tola J. Energy harvester for rotating environments using offset pendulum and nonlinear dynamics. *Smart Mater Struct* 2014;23(10):105004.
- [66] Zhang Y, Zheng R, Nakano K, Cartmell MP. Stabilising high energy orbit oscillations by the utilisation of centrifugal effects for rotating-tyre-induced energy harvesting. *Appl Phys Lett* 2018;112:2–7. <https://doi.org/10.1063/1.5019907>.
- [67] Hajidavalloo MR, Cosner J, Li Z, Tai WC, Song Z. Simultaneous Suspension Control and Energy Harvesting through Novel Design and Control of a New Nonlinear Energy Harvesting Shock Absorber. *IEEE Trans Veh Technol* 2022; 9545:1–15. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3159734>.
- [68] Shukla R, Bell AJ. PENDEXE: A novel energy harvesting concept for low frequency human waistline. *Sens Actuators, A* 2015;222:39–47. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.11.016>.
- [69] Zhang M, Hu G, Wang J. Bluff body with built-in piezoelectric cantilever for flow-induced energy harvesting. *Int J Energy Res* 2020;44:3762–77. <https://doi.org/10.1002/er.5164>.
- [70] Dostal L, Pick MA. Theoretical and experimental study of a pendulum excited by random loads. *Eur J Appl Math* 2019;30:912–27. <https://doi.org/10.1017/S0956792518000529>.
- [71] Wang T, Lou H, Zhu S. Prototyping and Electromagnetic Analysis of a Biaxial-Pendulum Wave Energy Harvester. *Oceans Conference Record (IEEE)* 2021; 2021-Sept:2–6. <https://doi.org/10.23919/OCEANS44145.2021.9706060>.
- [72] Lou H, Wang T, Zhu S. Design, modeling and experiments of a novel biaxial-pendulum vibration energy harvester. *Energy* 2022::124431. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124431>.

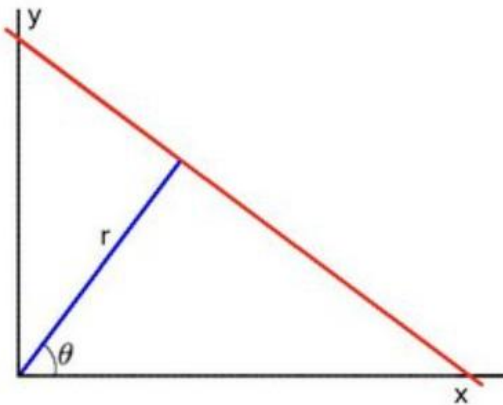
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

8.1 Παράρτημα 1: Μετασχηματισμός Hough

Πρόκειται για μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στην ανάλυση και ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, για την ανίχνευση απλών σχημάτων όπως γραμμές, κύκλοι και άλλες καμπύλες μέσα στην εικόνα. Μετατρέπει τα σημεία από το χώρο της εικόνας σε ένα χώρο παραμέτρων όπου οι γραμμές μπορούν να αναγνωριστούν ευκολότερα.[\[28\]](#)

Πιο αναλυτικά, μια γραμμή στο χώρο της εικόνας μπορεί να εκφραστεί με 2 μεταβλητές:

- Στο Καρτεσιανό Σ.Σ, με παραμέτρους (m, b)
- Στο Πολικό Σ.Σ, με παραμέτρους (r, θ)



Σχήμα 8.1: Καρτεσιανό και πολικό Σ.Σ.

Στο μετασχηματισμό Hough οι γραμμές εκφράζονται στο Πολικό Σ.Σ, συνεπώς η εξίσωση της ευθείας παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$y = \left(-\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right)x + \left(\frac{r}{\sin \theta}\right)$$

Επιλύοντας ως προς r η εξίσωση γίνεται:

$$r = x \cos \theta + y \sin \theta$$

Γενικά, για κάθε σημείο (x_0, y_0) της ευθείας, υπάρχει μια οικογένεια ευθειών που διέρχονται από το σημείο και εκφράζονται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$r_{\theta} = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta$$

όπου κάθε ζευγάρι (r_{θ}, θ) εκφράζει τη κάθε γραμμή που διέρχεται από το σημείο (x_0, y_0) .

Η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζει τα σημεία (x, y) της ευθείας σε παραμετρικά σημεία (θ, r) . Από κάθε σημείο (x_0, y_0) , λοιπόν, προκύπτει μια ημιτονοειδής συνάρτηση με παραμέτρους (θ, r_{θ}) . Αν 2 ή περισσότερες συναρτήσεις τέμνονται στο σημείο (θ, r_{θ}) τότε τα αντίστοιχα σημεία του χώρου (x, y) ανήκουν στην ίδια ευθεία.

Εφόσον οι συναρτήσεις που τέμνονται μεταξύ τους υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο ελάχιστο όριο (κατώφλι), τότε ορίζεται η ευθεία με τις παραμέτρους (θ, r_{θ}) του σημείου τομής.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε αρχικά εντοπίζει τις ακμές της εικόνας χρησιμοποιώντας τον Canny Algorithm [29]. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο πολλαπλών βημάτων που αναπτύχθηκε από τον **John F. Canny** και ξεχωρίζει για την αξιοπιστία και τις υψηλές δυνατότητες που προσφέρει στον εντοπισμό σημείων.

Στη συνέχεια, γίνεται παραμετρική αναπαράσταση των ακμών/σημείων της γραμμής από το Καρτεσιανό στο Πολικό Σ.Σ με χρήση της παραπάνω εξίσωσης. Τα παραμετρικά πλέον σημεία (θ, r) αποθηκεύονται σε ένα σωρευτικό διάνυσμα $[\theta, r]$ όπου η γωνία θ περιορίζεται σε τιμές από 90 έως -90 και η ακτίνα r στο ύψος της εικόνας.

Βάση του διανύσματος, τα σημεία των οποίων οι παραμετρικές καμπύλες τέμνονται αθροίζονται και εφόσον υπερβαίνουν ένα κατώφλι κρίνεται ότι σχηματίζουν μια ευθεία.

8.2 Παράρτημα 2: Κώδικες

8.1.1 Κώδικας μετασχηματισμού Hough στα αρχικά πειράματα

```
videoFile = 'C:\Users\Bonblue\Desktop\ssotiris\video5_1.mp4';
```

```
video = VideoReader(videoFile);
```

Φορτώνει το βίντεο από την καθορισμένη διαδρομή και δημιουργεί ένα αντικείμενο VideoReader για να διαβάσει το βίντεο καρέ-καρέ.

```
outputVideoFile = 'C:\Users\Bonblue\Desktop\output_video2.mp4';
```

```
outputVideo = VideoWriter(outputVideoFile, 'MPEG-4');
```

```
outputVideo.FrameRate = video.FrameRate;
```

```
open(outputVideo);
```

Δημιουργεί ένα αντικείμενο VideoWriter για να αποθηκεύσει το νέο βίντεο διατηρώντας το ρυθμό καρέ του αρχικού βίντεο.

```
firstFrame = readFrame(video);
```

```
if size(firstFrame, 1) > size(firstFrame, 2)
```

```
firstFrame = imrotate(firstFrame, 90);
```

```
end
```

Διαβάζει το πρώτο καρέ του βίντεο και ελέγχει αν είναι ανεστραμμένο (πιο ψηλό παρά πλατύ). Αν είναι, το περιστρέφει κατά 90 μοίρες.

```
firstFrame = imresize(firstFrame, [NaN, 800]);
```

```
imshow(firstFrame);
```

```
title('Select the center of the circle');
```

```
centerPoint = round(ginput(1));
```

```
title('Select a point on the circumference of the circle');
```

```
circumferencePoint = round(ginput(1));
```

Μειώνει το μέγεθος της εικόνας για να την εμφανίσει στην οθόνη και ζητάει από τον χρήστη να επιλέξει το κέντρο του κύκλου και ένα σημείο στη περιφέρειά του.

```
roiRadius = sqrt((centerPoint(1) - circumferencePoint(1))^2 + (centerPoint(2) - circumferencePoint(2))^2);
```

```
roi = [centerPoint - roiRadius, 2 * roiRadius, 2 * roiRadius];
```

Υπολογίζει την ακτίνα του κύκλου και ορίζει την περιοχή ενδιαφέροντος (ROI) ως ένα τετράγωνο που περιέχει τον κύκλο. Μια περιοχή ενδιαφέροντος (ROI) αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο τμήμα μιας εικόνας που επιλέγεται για περαιτέρω ανάλυση ή επεξεργασία. Με την απομόνωση της περιοχής ενδιαφέροντος, τα άσχετα δεδομένα αποκλείονται από την επεξεργασία, κάνοντας τον αλγόριθμο ταχύτερο και πιο αποδοτικό.

```
figure;
```

```
video = VideoReader(videoFile);
```

Δημιουργεί ένα νέο παράθυρο για την εμφάνιση των καρέ και ξεκινάει την ανάγνωση του βίντεο από την αρχή.

```
while hasFrame(video)
```

```
frame = readFrame(video);
```

```
if size(frame, 1) > size(frame, 2)
```

```
frame = imrotate(frame, 90);
```

```
end
```

```
frame = imresize(frame, [NaN, 800]);
```

```
croppedFrame = imcrop(frame, roi);
```

Διαβάζει κάθε καρέ του βίντεο μειώνοντας το μέγεθος του σε 800p και το αναστρέφει αν είναι ανάποδα.

```
grayFrame = rgb2gray(croppedFrame);
```

```
edges = edge(grayFrame, 'Canny');
```

Μετατρέπει το καρέ σε ασπρόμαυρο και εντοπίζει τα σημεία της γραμμής με τον Canny Algorithm.

```
[H, theta, rho] = hough(edges);  
peaks = houghpeaks(H, 1);  
lines = houghlines(edges, theta, rho, peaks, 'FillGap', 5, 'MinLength', 7);  
imshow(frame);  
hold on;
```

Αναγνωρίζει τη γραμμή/δείκτη με χρήση του μετασχηματισμού Hough και την εμφανίζει στο καρέ.

```
text(size(frame, 2) / 2, 20, '0°', 'Color', 'g', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold',  
    'HorizontalAlignment', 'center');  
text(20, size(frame, 1) / 2, '90°', 'Color', 'g', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold',  
    'VerticalAlignment', 'middle');  
text(size(frame, 2) / 2, size(frame, 1) - 20, '180°', 'Color', 'g', 'FontSize', 14, 'FontWeight',  
    'bold', 'HorizontalAlignment', 'center');  
text(size(frame, 2) - 20, size(frame, 1) / 2, '270°', 'Color', 'g', 'FontSize', 14, 'FontWeight',  
    'bold', 'VerticalAlignment', 'middle');
```

Τοποθετεί τις 4 βασικές γωνίες στο καρέ.

```
detected_angle = NaN;  
for k = 1:length(lines)  
    xy = [lines(k).point1; lines(k).point2];  
    dx = xy(2, 1) - xy(1, 1);  
    dy = xy(2, 2) - xy(1, 2);  
    detected_angle = atan2d(dy, dx);  
    adjusted_angle = mod(90 - detected_angle, 360);  
    if adjusted_angle < 0  
        adjusted_angle = adjusted_angle + 360;  
    end  
    plot([xy(1, 1), xy(2, 1)] + roi(1), [xy(1, 2), xy(2, 2)] + roi(2), 'LineWidth', 2, 'Color', 'r');  
    title(sprintf('Tracking the rotating line - Angle: %.2f°', adjusted_angle));  
end
```

Διορθώνει τη γραμμή ώστε να ξεκινάει από το κέντρο περιστροφής του εκκρεμούς και προσαρμόζει τη κλίση της με βάση τις 4 βασικές γωνίες.

```
if ~isnan(detected_angle)  
    text(20, 20, sprintf('Angle: %.2f°', adjusted_angle), 'Color', 'y', 'FontSize', 14, 'FontWeight',  
        'bold');
```



```

end
hold off;
frameWithOverlay = getframe(gca);
writeVideo(outputVideo, frameWithOverlay);
pause(0.01);
end
close(outputVideo);

```

Εμφανίζει τη τιμή της γωνίας πάνω αριστερά στο καρέ και το προσθέτει ξανά το βίντεο.

8.1.2 Κώδικας μετασχηματισμού Hough στο τελικό πείραμα

```

clear all
clc
% Eisagwgi tou video kai anagnwsi kare-kare
videoFile = 'C:\Users\Bonblue\Desktop\pendumum\disc_with_extra_mass.mp4'; %
Prosarmogi tis diadromis opws xreiazetai
video = VideoReader(videoFile);
% Dimiourgia antikeimenou VideoWriter gia apothikeusi neou video
outputVideoFile = 'C:\Users\Bonblue\Desktop\output_video2.mp4'; % Prosarmogi tis
diadromis opws xreiazetai
outputVideo = VideoWriter(outputVideoFile, 'MPEG-4');
outputVideo.FrameRate = video.FrameRate; % Diatirisi tw n kare ana sec (FPS)
open(outputVideo);
% Anagnwsi tou prwtou kare kai epilogi tis perioxis endiaferontos (ROI) gia ti grammi
firstFrame = readFrame(video);
% Anastrofi tou kare an einai anapoda
if size(firstFrame, 1) > size(firstFrame, 2)
    firstFrame = imrotate(firstFrame, 90);
end
% Meiwsi megethous tis eikonas gia emfanisi stin othoni
firstFrame = imresize(firstFrame, [NaN, 800]); % Prosarmogi sto platos 800 pixels
imshow(firstFrame);
title('Select the center of the circle');

```

```

centerPoint = round(ginput(1));
title('Select a point on the circumference of the circle');
circumferencePoint = round(ginput(1));
% Ypologismos tis aktinas tou kyklou
roiRadius = sqrt((centerPoint(1) - circumferencePoint(1))^2 + (centerPoint(2) -
circumferencePoint(2))^2);
roi = [centerPoint - roiRadius, 2 * roiRadius, 2 * roiRadius];
% Dimiourgia parathyrou gia tin emfanisi tw n kare
figure;
% Epanenarksi tis anagnwsis tou video apo tin arxi
video = VideoReader(videoFile);
% Arxikopoiisi tw n dianismatwn Angle kai Time
Angle = [];
Time = [];
% Diasxizoume to video kare-kare
while hasFrame(video)
    frame = readFrame(video);
    % Anastrofi tou kare an einai anapoda
    if size(frame, 1) > size(frame, 2)
        frame = imrotate(frame, 90);
    end
    % Meiws i megethos tis eikonas gia emfanisi stin othoni
    frame = imresize(frame, [NaN, 800]); % Prosarmogi sto platos 800 pixels
    % Perikopi tou kare stin perioxi endiaferontos
    croppedFrame = imcrop(frame, roi);
    % Metatropi se grayscale
    grayFrame = rgb2gray(croppedFrame);
    % Anixneusi akmw n
    edges = edge(grayFrame, 'Canny');
    % Evresi grammwn me Hough transform
    [H, theta, rho] = hough(edges);
    peaks = houghpeaks(H, 1); % Evresi tis pio isxyris koryfis
    lines = houghlines(edges, theta, rho, peaks, 'FillGap', 5, 'MinLength', 7);
    % Emfanisi tou kare me tin anixnevmeni grammi

```

```

imshow(frame);

hold on;

% Prosthiki keimenou gia tis 4 kyries gwnies

text(size(frame, 2) / 2, 20, '0 ', 'Color', 'g', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold',
'HorizontalAlignment', 'center'); % 0 moires (epanw)

text(20, size(frame, 1) / 2, '90 ', 'Color', 'g', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold',
'VerticalAlignment', 'middle'); % 90 moires (aristera)

text(size(frame, 2) / 2, size(frame, 1) - 20, '180 ', 'Color', 'g', 'FontSize', 14, 'FontWeight',
'bold', 'HorizontalAlignment', 'center'); % 180 moires (katw)

text(size(frame, 2) - 20, size(frame, 1) / 2, '270 ', 'Color', 'g', 'FontSize', 14, 'FontWeight',
'bold', 'VerticalAlignment', 'middle'); % 270 moires (deksia)

detected_angle = NaN; % Arxiki timi gia tin periptwsi pou den anixneuetai grammi

for k = 1:length(lines)

    xy = [lines(k).point1; lines(k).point2];

    % Ypologismos tis gwnias tis grammis se sxesi me to kentro

    dx = xy(2, 1) - xy(1, 1);
    dy = xy(2, 2) - xy(1, 2);
    detected_angle = atan2d(dy, dx);

    % Prosarmogi tis gwnias symfwna me tis prodiagrafes

    % Antistoixisi stin klimaka:: 0 moires (pros ta panw), 90 moires (pros ta aristera),
    % 180 moires (pross ta katw), 270 moires (pros ta deksia)

    adjusted_angle = mod(90 - detected_angle, 360);

    % Diorthosi tis gwnias wste na ksekina apo 0 moires pros ta panw

    if adjusted_angle < 0
        adjusted_angle = adjusted_angle + 360;
    end

    % Prosarmogi tis gwnias symfwna me to arxiko kai teliko simeio

    plot([xy(1, 1), xy(2, 1)] + roi(1), [xy(1, 2), xy(2, 2)] + roi(2), 'LineWidth', 2, 'Color', 'r');

    title(sprintf('Tracking the rotating line - Angle: %.2f ', adjusted_angle));

end

% Apothikeusi tis gwnias kai tou xronou sta dianismata Angle kai Time

if ~isnan(detected_angle)

    Angle(end+1) = adjusted_angle;

    Time(end+1) = video.CurrentTime; % Apothikeusi tou xronikou simeiou

```

```

    text(20, 20, sprintf('Angle: %.2f ', adjusted_angle), 'Color', 'y', 'FontSize', 14,
'FontWeight', 'bold');

    end

    hold off;

    % Prosthiki tou kare sto video eksodou
    frameWithOverlay = getframe(gca);
    writeVideo(outputVideo, frameWithOverlay);

    % Pausi gia na parakoloutheitai to video se pragmatiko xrono
    pause(0.01); % Mikri pausi gia na epitrepetai i enimerwsi tou parathyrou

end

% Kleisimo tou antikeimenou VideoWriter
close(outputVideo);

%{

% Rythmisi gwniwn meta tin epeksergasia
for i = 1:length(Angle)
    if Angle(i) < 133
        Angle(i) = Angle(i) + 180;
    end
    if Angle(i) > 211
        Angle(i) = Angle(i) - 180;
    end
end

end

% Elegxos gia lathos times
for i = 1:length(Angle)
    if Angle(i) < 133
        Angle(i), i
    end
    if Angle(i) > 211
        Angle(i), i
    end
end

end

% Afairesi 180 moirwn pou emfanizontai 2 fores kai panw diadoxika
% Arxikopoihsh deiktwn gia diatirisi
keepIndices = true(size(Angle));

```

```

% Evresi simeiw n pou to Angle einai 180
indices180 = find(Angle == 180);
% Arxikopoihsh metrisis
startIndex = 1;
while startIndex <= length(indices180)
    % Evresi akolouthias tw n 180 moirwn
    endIndex = startIndex;
    while endIndex < length(indices180) && indices180(endIndex + 1) ==
indices180(endIndex) + 1
        endIndex = endIndex + 1;
    end
    % Elegxos mikous tis akolouthias (length)
    if endIndex - startIndex >= 1 % 2 or more times
        % Simeiws i autwn tw n deiktwn, gia afairesi
        keepIndices(indices180(startIndex:endIndex)) = false;
    end
    % Metavasi stin epomeni akolouthia
    startIndex = endIndex + 1;
end
% Efarmogi 'maskas' gia na filtraroume tous anepithymitous deiktes
Angle = Angle(keepIndices);
Time = Time(keepIndices);
% Export Angle and Time data to Excel
dataTable = table(Time', Angle', 'VariableNames', {'Time', 'Angle'});
excelFile = 'C:\Users\Bonblue\Desktop\Cleaned_Angle_Time_Results.xlsx';
writetable(dataTable, excelFile);
% Display confirmation message
fprintf('Cleaned data successfully exported to %s\n', excelFile);
%}

```

8.1.3 Κώδικας ταλάντωσης φυσικού εκκρεμούς

```
% Run the nonlinear compound pendulum equation of motion
%
global IDisc mslot lslot g cb
%
IDisc=0.000453338;    % whole disc inertia (kgm^2)
mslot=0.15;    % eccentric mass (kg)
lslot=0.04153;    % Distance of eccentric mass CoG from rotation centre (m)
g=9.81;    % acceleration of gravity (m/s^2)
theta0=0.999*pi;    % initial vibration angle (rad)
tend=6;    % set the simulation time (sec)
dt=tend/2000;    % result time resolution (sec)
%
% You change cb until it matches the experiments
cb= 0.00025;    % Nms/rad
%
% Solves the equation of motion
%
[t,y] = ode45(@pendulum,[0:dt:tend],[theta0;0]);
%
theta=y(:,1);
dthetadt=y(:,2);
%
% Plotting the results
figure
plot(t,theta)
xlabel('time (sec)')
ylabel('theta (rad)')
title('Free pendulum vibration')
grid on
%
function dthetadt=pendulum(t,theta)
```

```

%
global IDisc mslot lslot g cb
%
dthetadt=[theta(2);(-cb*theta(2)-mslot*g*lslot*sin(theta(1)))/IDisc];
%
end

```

8.1.4 Κώδικας ταλάντωσης ρότορα

```

% Run the nonlinear compound pendulum equation of motion
%
global IDisc B np cb
%
IDisc=0.000297911; % whole disc inertia (kgm^2)
g=9.81; % acceleration of gravity (m/s^2)
theta0=0.590005142; % initial vibration angle (rad)
tend=10; % set the simulation time (sec)
dt=tend/2000; % result time resolution (sec)
np=8; % number of poles.
B=0.0096; % magnetic restoring torque peak (Nm)
%
% You change cb until it matches the experiments
cb= 0.000135; % Nms/rad
%
% Solves the equation of motion
%
[t,y] = ode45(@pendulum,[0:dt:tend],[theta0;0]);
%
theta=y(:,1);
dthetadt=y(:,2);
%
% Save variables t and theta to Excel
data = [t, theta]; % Combine time and theta into one matrix

```

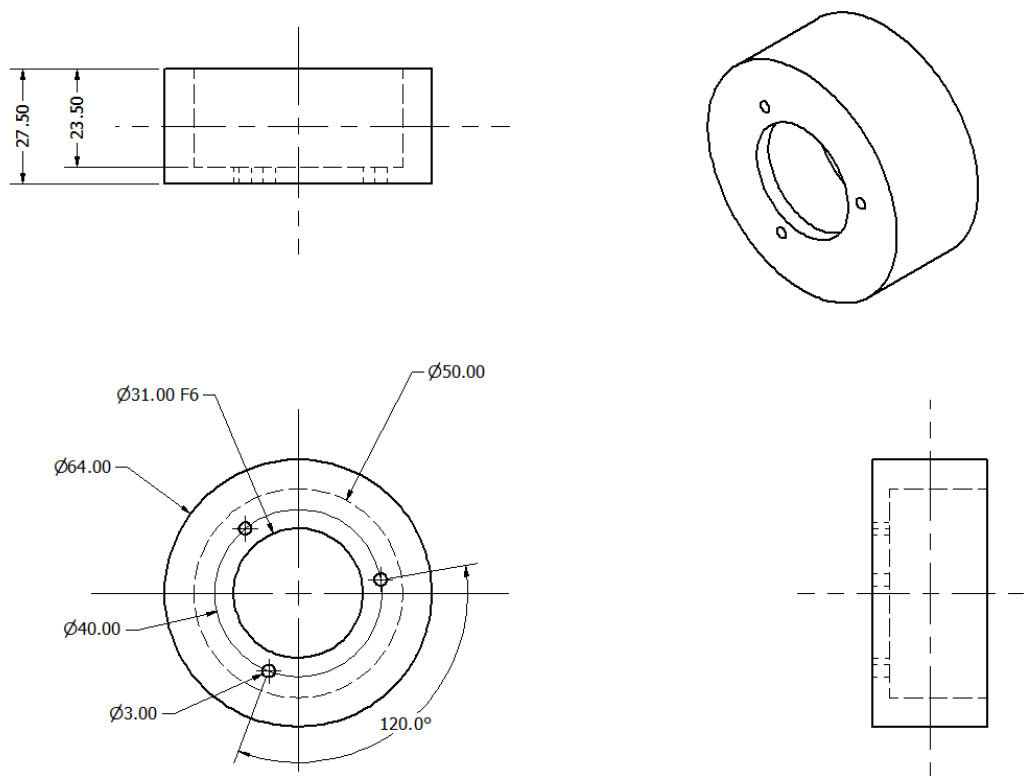
```

filename = 'pendulum_data_extra_mass135.xlsx';
writematrix(data, filename);
% Plotting the results
figure
plot(t,theta)
xlabel('time (sec)')
ylabel('theta (rad)')
title('Free pendulum vibration')
grid on
%
function dthetadt=pendulum(t,theta)
%
global IDisc B np cb
%
dthetadt=[theta(2);(-cb*theta(2)-B*sin(np/2*theta(1)))/IDisc];
%
end

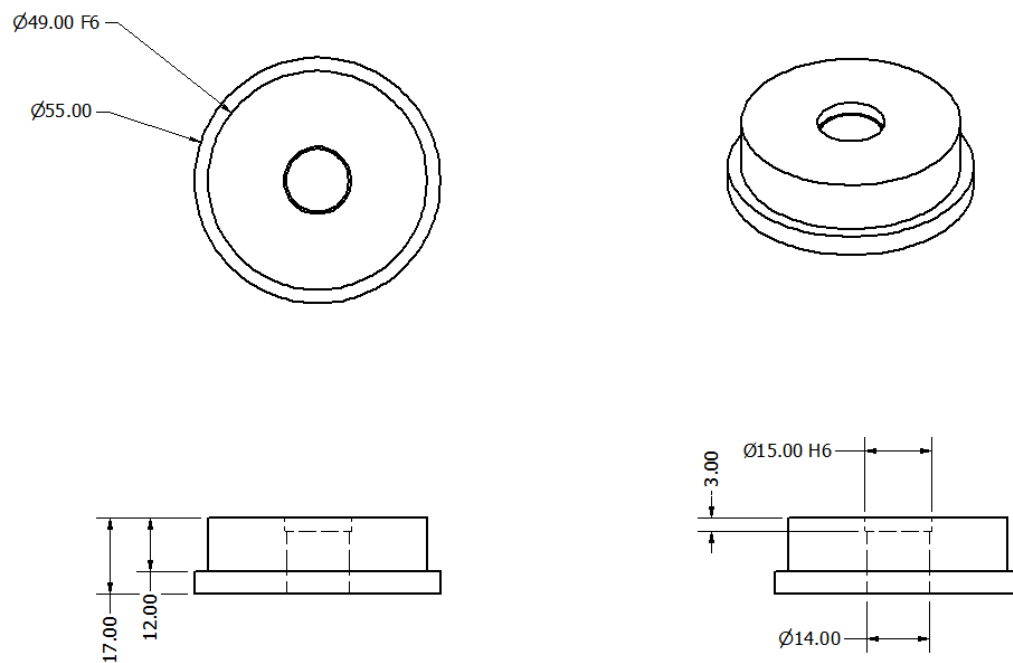
```


8.3 Παράρτημα 3: Μηχανολογικά σχέδια

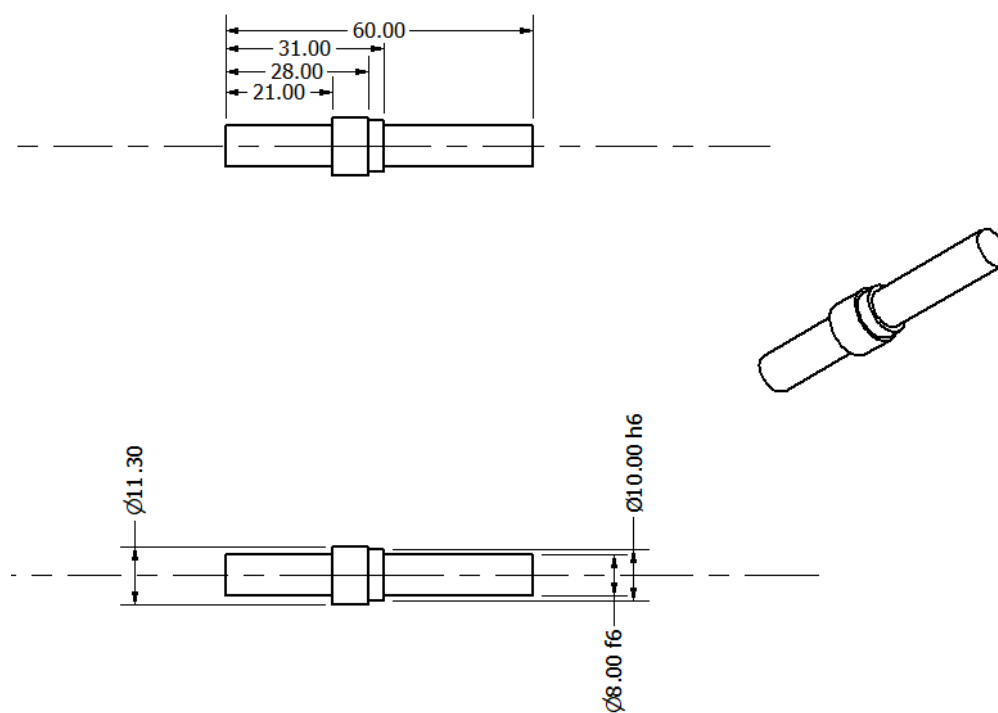
8.2.1 Σχέδια πειραματικής διάταξης υπολογισμού τριβής



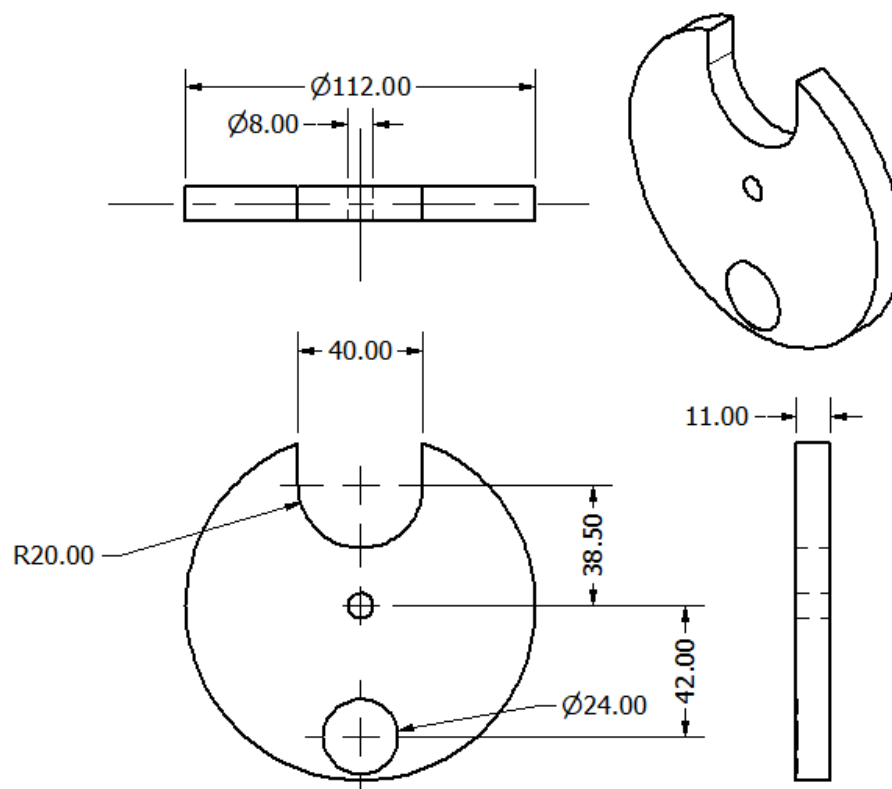
Σχήμα 8.2: Αριστερό στήριγμα πειραματικής διάταξης.



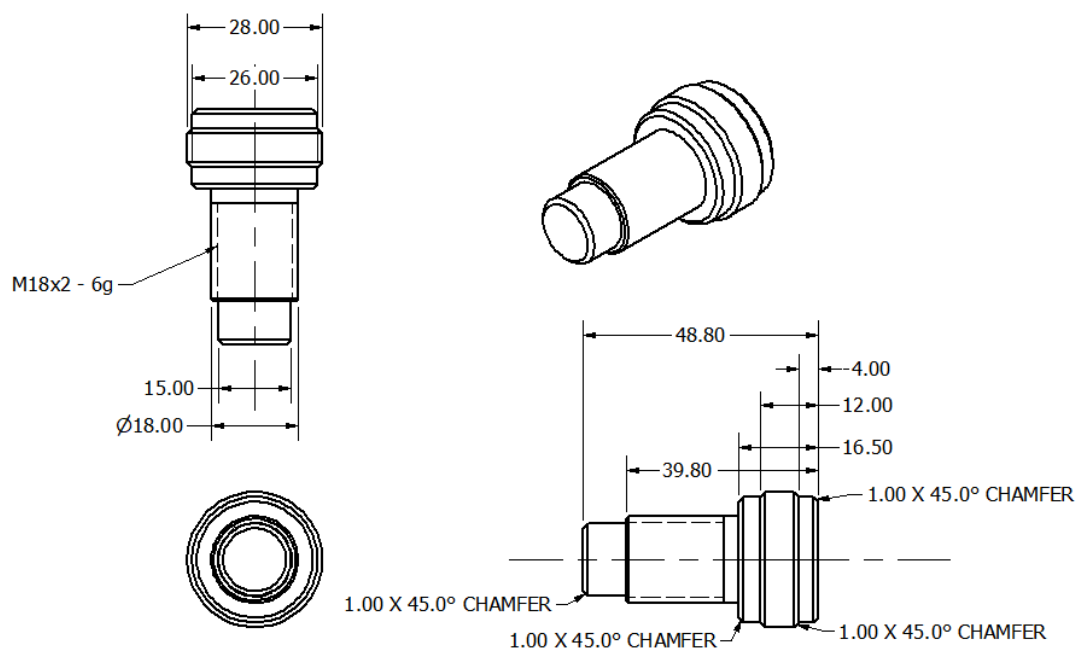
Σχήμα 8.3: Δεξιό στήριγμα της πειραματικής διάταξης.



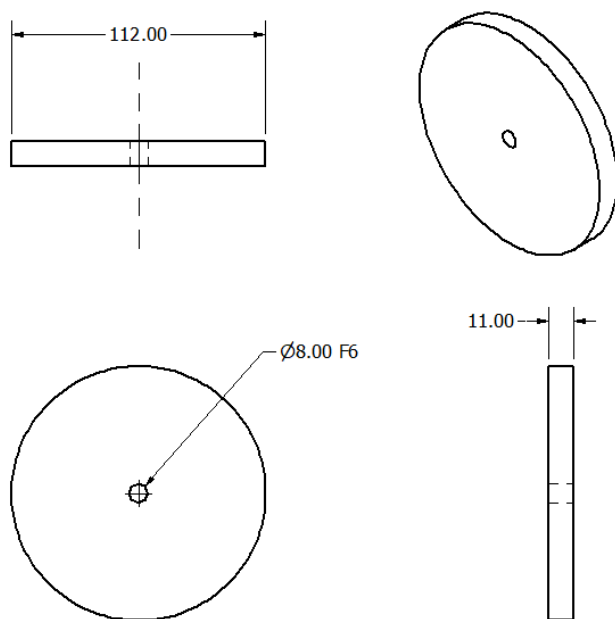
Σχήμα 8.4: Άξονας της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 8.5: Κυκλικός δίσκος της πειραματικής διάταξης φυσικού εκκρεμους.

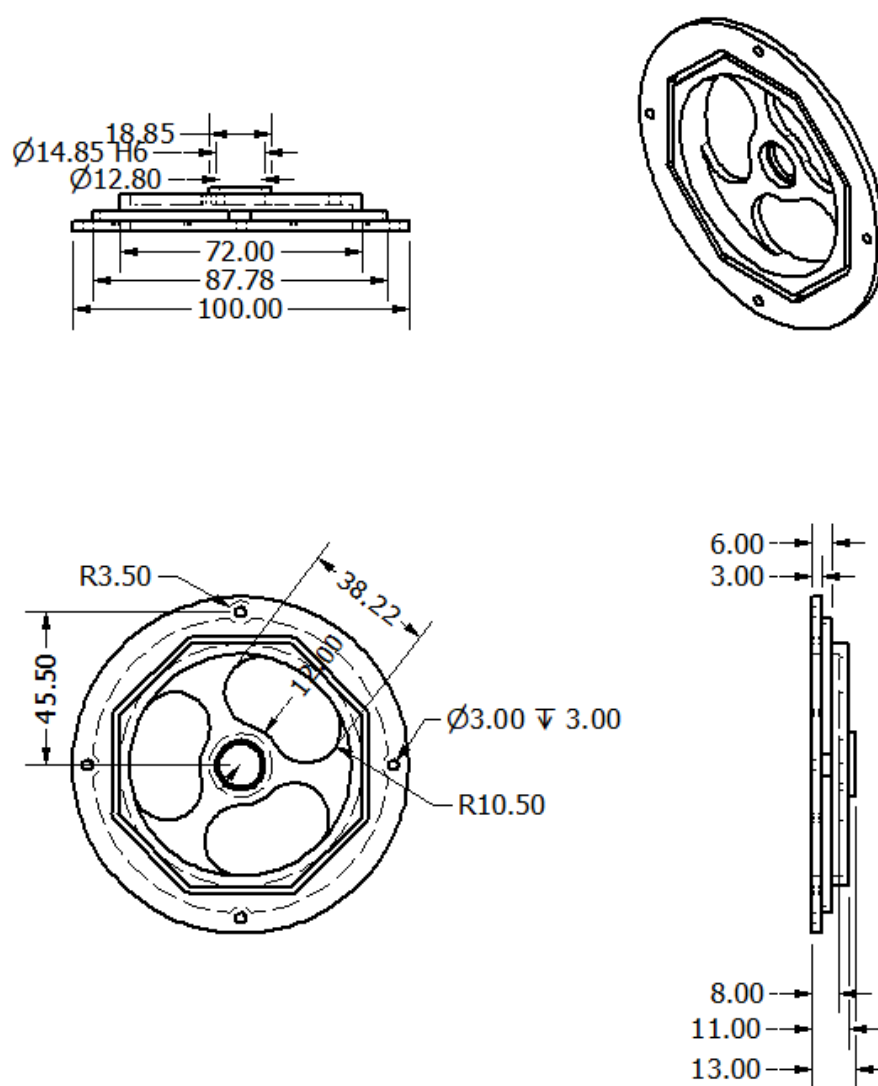


Σχήμα 8.6: Πρόσθετη μάζα/βίδα του δίσκου της πειραματικής διάταξης.

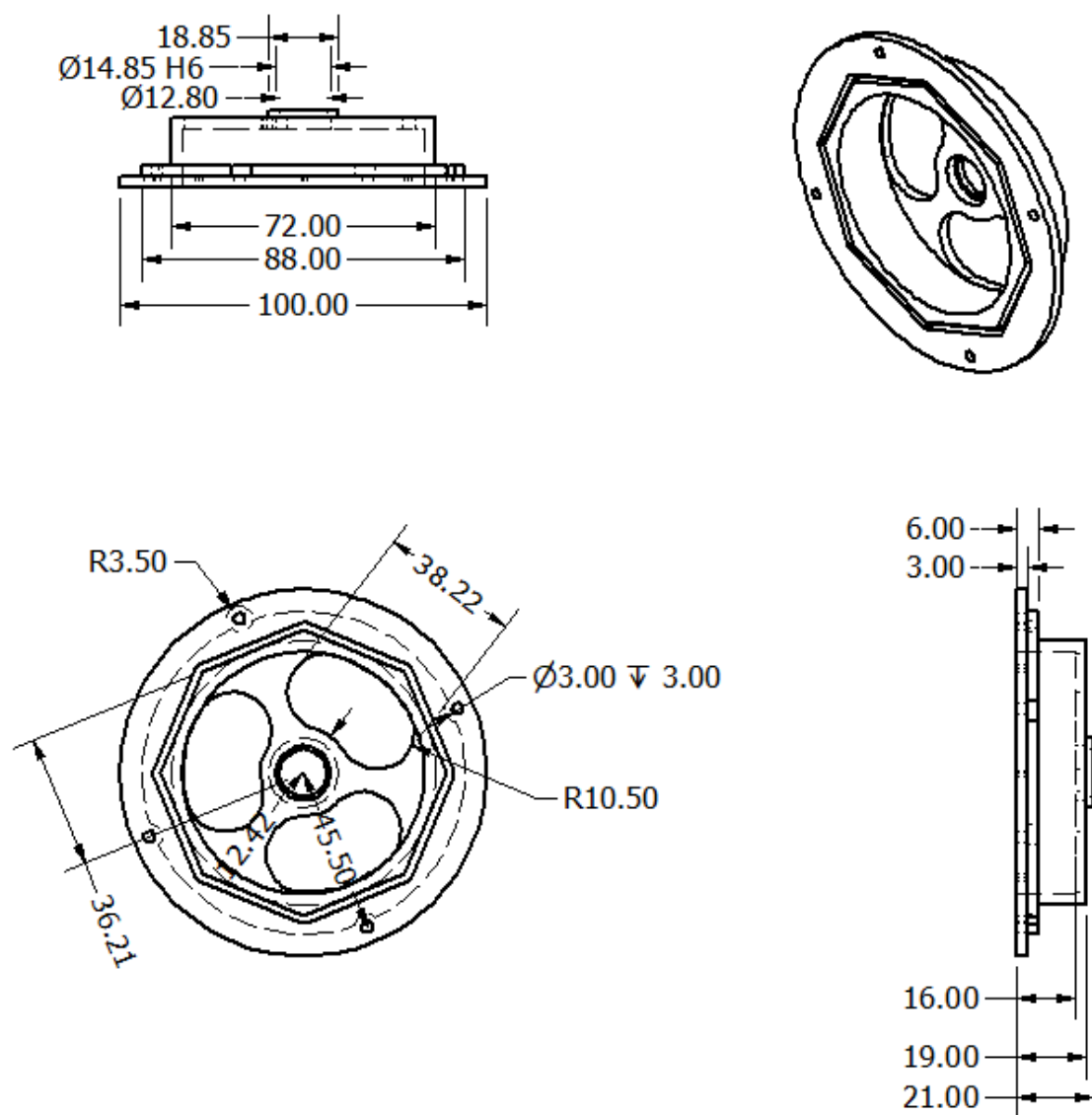


Σχήμα 8.7: Κυκλικός δίσκος της πειραματικής διάταξης.

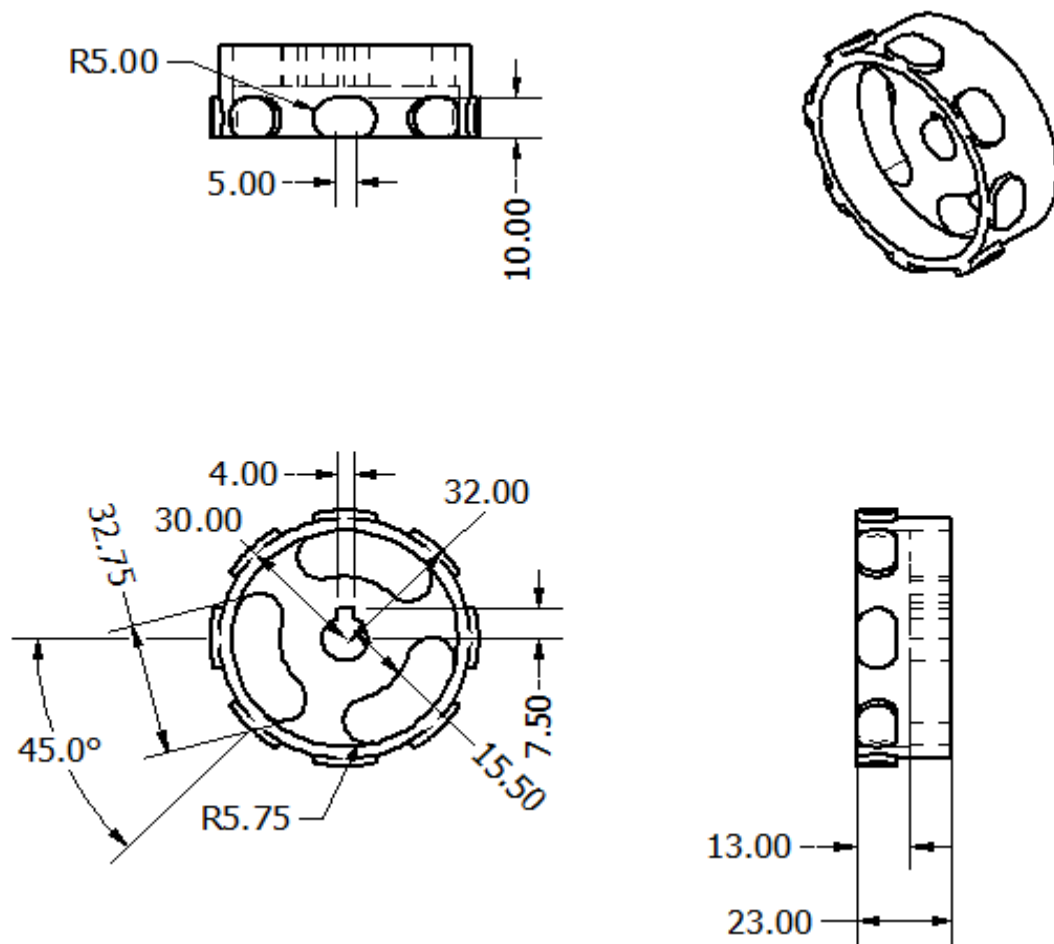
8.2.2 Σχέδια μη γραμμικού VEH



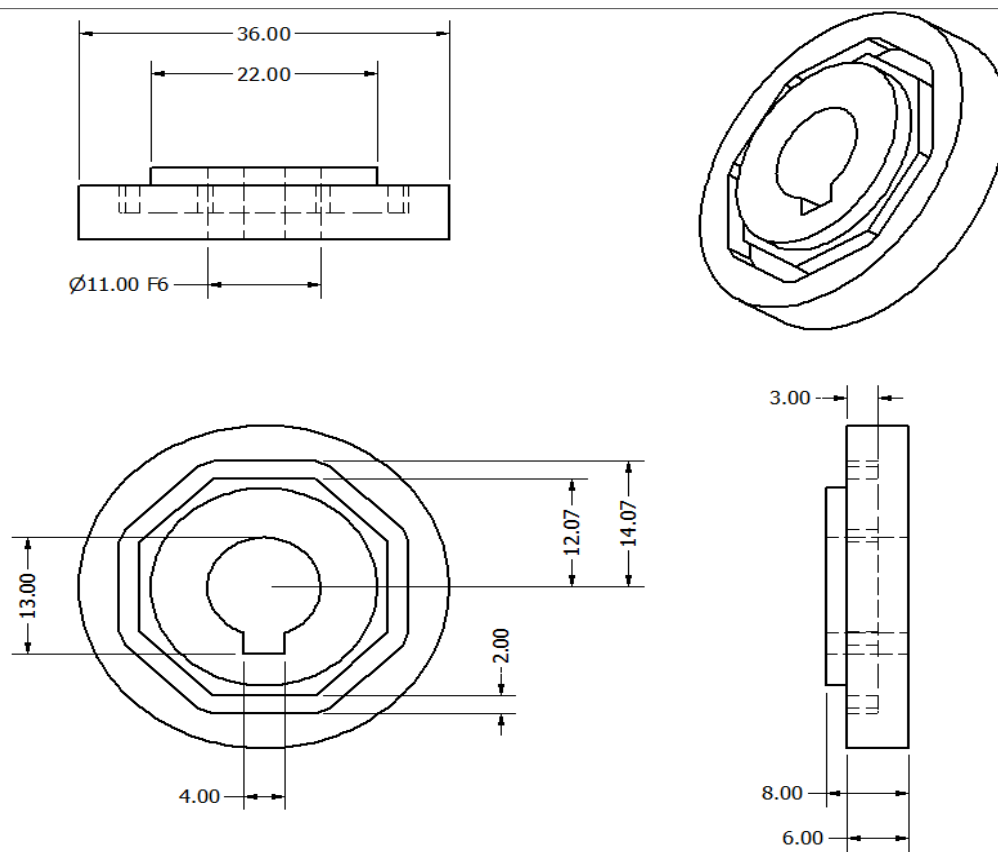
Σχήμα 8.8: Αριστερός δίσκος του ρότορα του VEH.



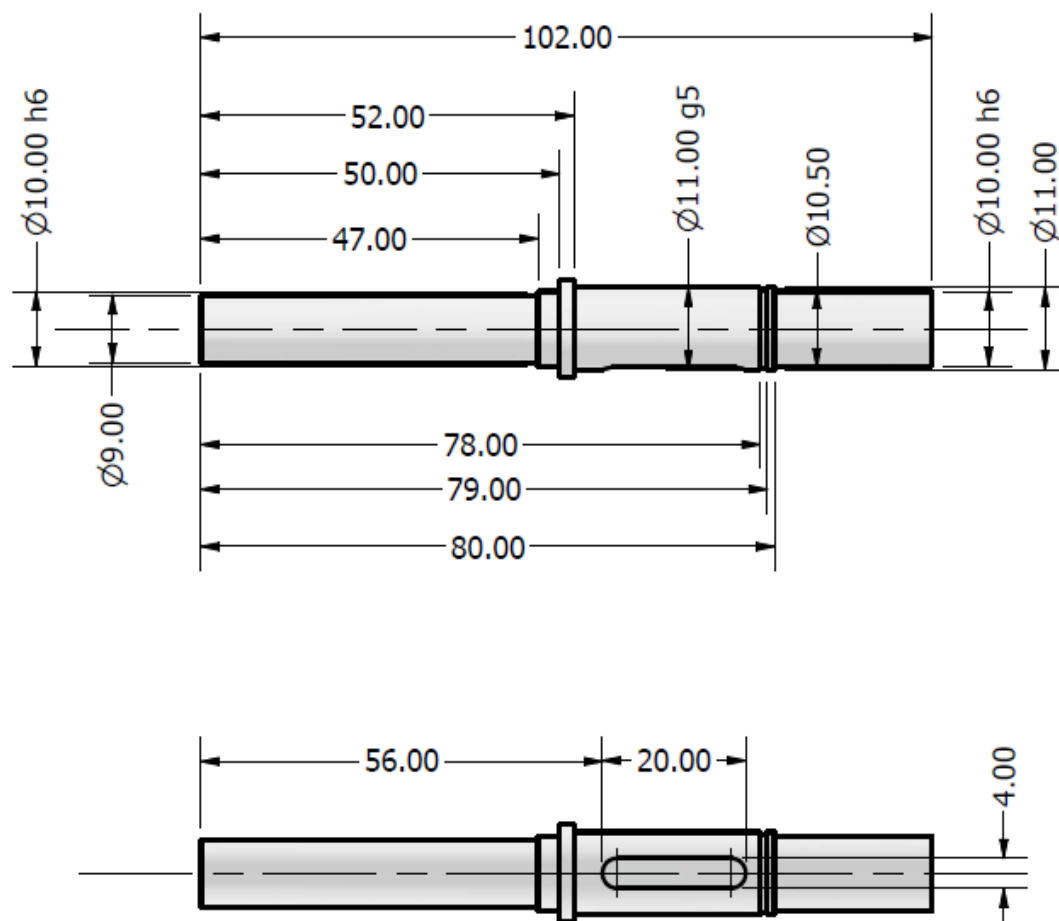
Σχήμα 8.9: Δεξιός δίσκος του ρότορα του VEH.



Σχήμα 8.10: Δίσκος που φέρει τα πηνία του VEH.



Σχήμα 8.11: Αριστερός/δεξιός δίσκος του στάτορα του VEH.



Σχήμα 8.12: Κεντρικός άξονας αλουμινίου του VEH.