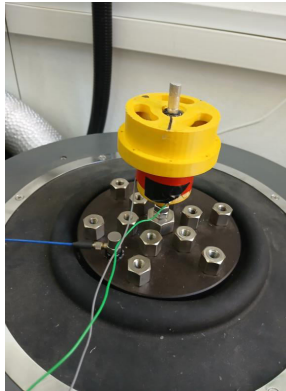


ΣΧΕΔΙΑΣΗ, ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΥΡΕΣΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΓΚΟΜΙΣΤΗ ΚΡΑΔΑΣΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΓΙΩΡΓΟΣ ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ
2020010019

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΔΡ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΛΕΥΡΑΣ

2026



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



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

Γιώργος Παπαδάκης

Στόχος της διπλωματικής αυτής είναι η κατασκευή ενός λειτουργικού ηλεκτρομαγνητικού συγκομιστή ενέργειας που θα συνδυάζει περιστροφική και αξονική κίνηση

Επιθυμητή είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής τάσης

2026



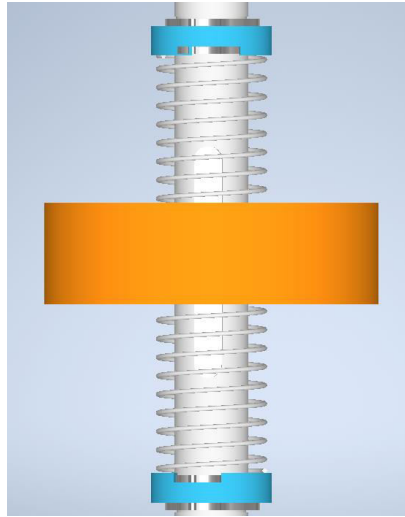
Στόχος της διπλωματικής

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



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

Γιώργος Παπαδάκης



Πρώτα έγινε ο συνολικός σχεδιασμός της διάταξης σε αρχείο assembly σε λογισμικό Autodesk Inventor

Γραμμικός ταλαντωτής ανάμεσα σε ίδια προσυμπιεσμένα ελατήρια στερεωμένα στον άξονα μέσω των βάσεων ελατηρίων

Η περιστροφή του περιορίζεται από μια σφήνα

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \Sigma F_{\epsilon\chi}$$

$$k = k_1 + k_2$$



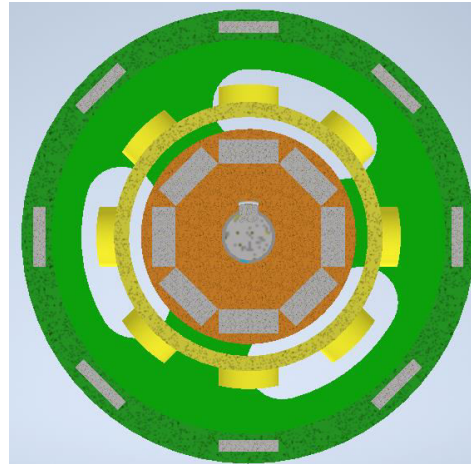
Σχεδιασμός διάταξης

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



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

Γιώργος Παπαδάκης



Ρότορας και δίσκος πηνίων

Ο ρότορας λειτουργεί ως εκκρεμές παραμετρικής διέγερσης

Ο δίσκος πηνίων είναι σταθερός με τα πηνία να βρίσκονται στην πάνω ακραία θέση του γραμμικού ταλαντωτή

8 μαγνήτες σε ρότορα και γραμμικό ταλαντωτή και 8 πηνία ευθυγραμμίζονται

Παραμετρική ταλάντωση είναι μια μορφή εξαναγκασμένης ταλάντωσης όπου αντί για εξωτερική δύναμη η διέγερση γίνεται μέσω αλλαγής των παραμέτρων της ταλάντωσης

$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + mL(\omega_s^2 A_s \cos(\omega_s t)) \sin \theta = 0$$



$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + mL(T(t)) \sin \theta = 0, \\ T(t) = T_0 + T_1 \cos(\omega t)$$



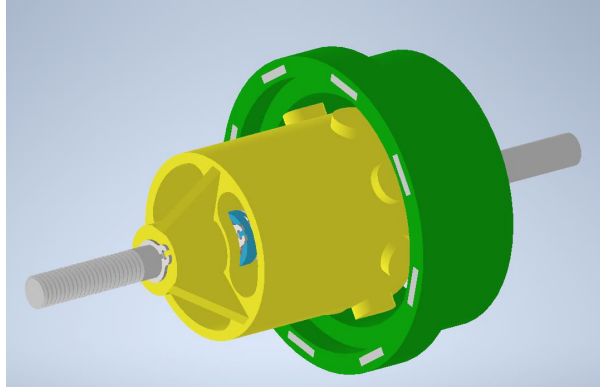
Σχεδιασμός διάταξης

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

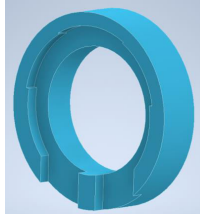


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης



Σχεδιασμός τρισδιάστατου
μοντέλου στο Inventor



Δημιουργία κώδικα G σε πρόγραμμα Slicer
(PrusaSlicer / Bambu Studio)

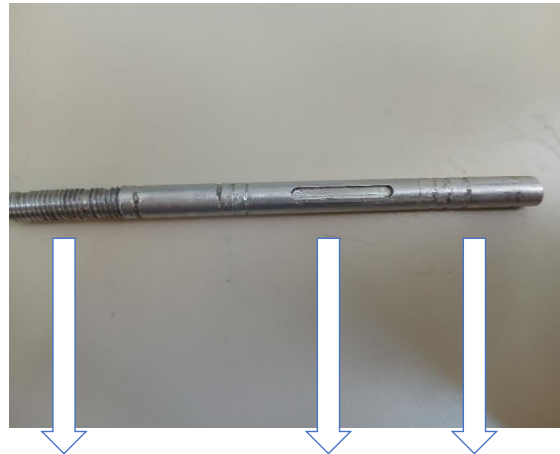


(Προσθήκη μαγνητών ή
τύλιγμα πηνίων)



Τρισδιάστατη
εκτύπωση
(FDM)





Δημιουργία
σπειρώματος M8 με
φιλιέρα

Δημιουργία θέσης
σφήνας με χρήση
φρέζας

Δημιουργία
θέσεων ασφαλειών
με πριόνι



Δημιουργία άξονα

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



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

Γιώργος Παπαδάκης

Επιλογή ελατηρίων με τους παρακάτω περιορισμούς

- $D > 9.5 \text{ mm}$ (τριβές με τον άξονα)
- $25 \leq L \leq 30$ (προσυμπίεσμένα ελατήρια)
- $7 \leq \omega \leq 10$ (ευκολία στην διεξαγωγή πειραμάτων)

$$k_i = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \longrightarrow k = 2 * k_i \longrightarrow \omega = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Τελικά, επιλέχθηκαν ελατήρια με μέση διάμετρο 11.5 mm, διάμετρο σύρματος 0.5 mm, ελεύθερο μήκος 25 mm και 14 σπείρες.



Επιλογή ελατηρίων

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



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

Γιώργος Παπαδάκης



Σφήνα DIN 6885 3 X 3 X 25 mm



Ασφάλειες για άξονα διαμέτρου 8 mm



Ρουλεμάν Skf 618/8 (8 X 16 X 4 mm)



Λοιπά εξαρτήματα

<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης

Η λειτουργία της διάταξης δοκιμάστηκε στο σύστημα δοκιμής κραδασμών (Shaker), ένα μηχάνημα που προκαλεί αξονική ταλάντωση της πάνω πλάκας του με συχνότητες από 5 έως 4500 Hz. Μετρήθηκε η παραγόμενη τάση για αυξανόμενη συχνότητα από 5 έως 15 Hz και τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω.

1. Η παραγόμενη τάση ήταν πολύ μικρή
2. Δεν παρατηρήθηκε ταλάντωση του ρότορα

Επίσης, εξετάζοντας την περιστροφή του ρότορα φάνηκε ότι ο γραμμικός ταλαντωτής περιστρέφεται σε μικρές γωνίες παρεμποδίζοντας την περιστροφή του ρότορα

Γίνονται πειράματα για την εύρεση άλλων σφαλμάτων και την επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του συστήματος που θα χρησιμοποιηθούν και για την κατασκευή της προσομοίωσης



Δοκιμή αρχικής διάταξης

<http://www.m3.tuc.gr>School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης

Πρώτα επιβεβαιώνεται η θέση ισορροπίας και η σταθερά ελατηρίων μετρώντας το μήκος των ελατηρίων με παχύμετρο σε κατάσταση ισορροπίας όταν ο άξονας είναι οριζόντια ή κάθετα για διάταξη χωρίς ρότορα, με ρότορα στις 0 μοίρες και με ρότορα στις 45 μοίρες.

ΧΩΡΙΣ ΡΟΤΟΡΑ	L_1 (mm)	L_2 (mm)
Κάθετα 1	22.7	11.3
Κάθετα 2	11.1	23
Οριζόντια	17.1	17
ΜΕ ΡΟΤΟΡΑ (0°)	L_1 (mm)	L_2 (mm)
Κάθετα 1	17.6	16.5
Κάθετα 2	10.9	23.2
Οριζόντια	13.8	20.3
ΜΕ ΡΟΤΟΡΑ (45°)	L_1 (mm)	L_2 (mm)
Κάθετα 1	25.8	8.3
Κάθετα 2	14	20.1
Οριζόντια	21.5	12.6

Από αυτές τις μετρήσεις βρέθηκε η θέση ισορροπίας του γραμμικού ταλαντωτή και η σταθερά ελατηρίου, που υπολογίστηκε μικρότερη από την θεωρητική.

2026



Μετρήσεις μήκους ελατηρίων

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

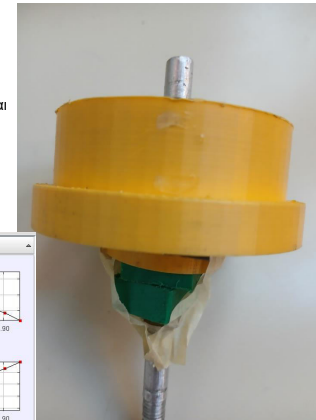
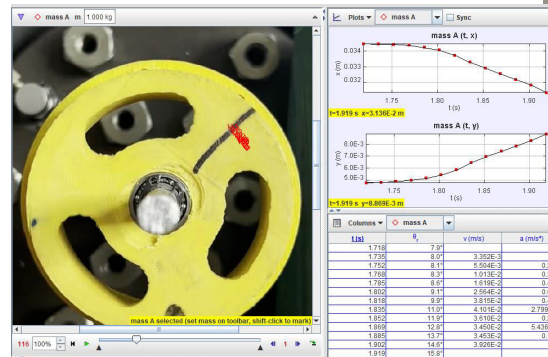


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης

Ο γραμμικός ταλαντωτής σταθεροποιείται με αποστάτες και χαρτοταινία σε συγκεκριμένες αποστάσεις (0, -4 mm, -9 mm, -13.5 mm) από την θέση που ευθυγραμμίζονται οι μαγνήτες. Γίνεται ελεύθερη ταλάντωση αφήνοντας τον ρότορα να περιστραφεί μόνος του από τις 45 μοίρες και τα δεδομένα συλλέγονται από βιντεοσκόπηση και επεξεργασία στο πρόγραμμα Tracker. Από τα αποτελέσματα δεν φαίνεται να παρεμποδίζει κάτι την περιστροφή.

Βρίσκεται η απόσβεση του ρότορα από την εκθετική καμπύλη του πλάτους.



2026



Μετρήσεις ελεύθερης ταλάντωσης ρότορα

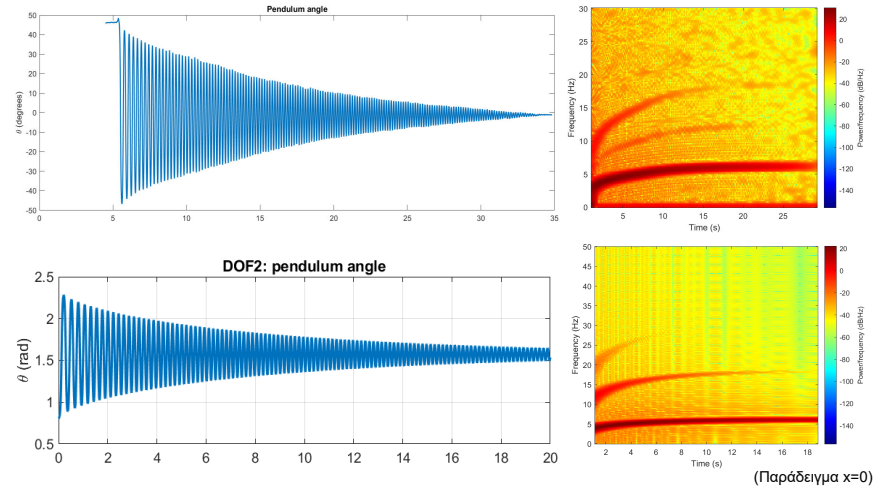
<http://www.m3.tuc.gr>



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

Γιώργος Παπαδάκης

Εισάγονται τα χαρακτηριστικά του συστήματος στην προσομοίωση και γίνεται σύγκριση αποτελεσμάτων. Τα διαγράμματα και τα σπεκτρογράμματα προκύπτουν παρόμοια με αποκλίσεις στις φυσικές συχνότητες στα 0.2 Hz.



2026



Μετρήσεις ελεύθερης ταλάντωσης ρότορα

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



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

Γιώργος Παπαδάκης



Για τον περιορισμό της περιστροφής του γραμμικού ταλαντωτή γίνονται οι παρακάτω αλλαγές.

- Αύξηση ύψους σφήνας και σφηνάλακα
- Δημιουργία εσοχής στην μέση της σφήνας για να λειτουργούν τα ελατήρια
- Αλλαγή υλικού σφήνας από μέταλλο σε πλαστικό PLA, μείωση της τριβής

Μειονέκτημα : Στις ακραίες θέσεις το ένα ελατήριο χάνει επαφή

2026



Περιορισμός περιστροφής γραμμικού ταλαντωτή

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



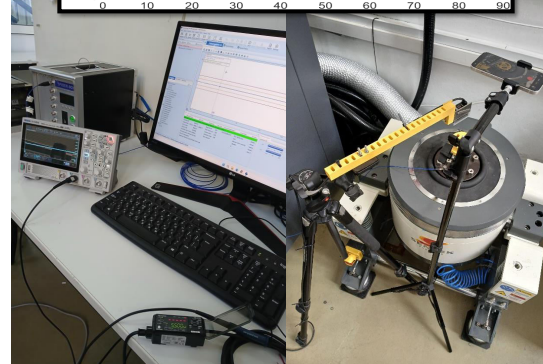
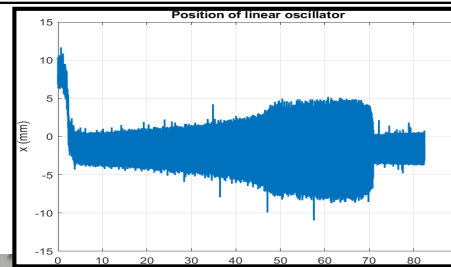
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης

Έπειτα, με την χρήση αισθητήρα λέιζερ εξετάζεται η κίνηση του γραμμικού ταλαντωτή. Γίνεται πείραμα μειούμενης συχνότητας στο Shaker και βρίσκεται ότι η φυσική συχνότητα του συστήματος είναι στα 6.5 Hz.

Γνωρίζοντας την φυσική συχνότητα, γίνονται μετρήσεις της κίνησης του γραμμικού ταλαντωτή και ταυτόχρονη μέτρηση της γωνίας περιστροφής του ρότορα για επιταχύνσεις 5 m/s^2 , 7.5 m/s^2 , 10 m/s^2 , 12.5 m/s^2 και 15 m/s^2 και σταθερή συχνότητα 6.5 Hz για εύρεση μεγέθους τριβών.

Επίσης, παρατηρείται αν ο ρότορας μπορεί να ταλαντωθεί από μόνος του και διεγείρεται με το χέρι για να φανεί αν μπορεί να διατηρήσει την ταλάντωση.



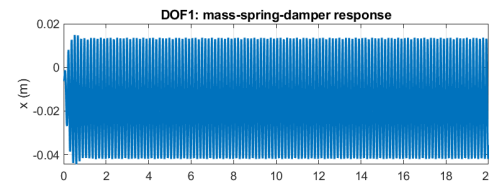
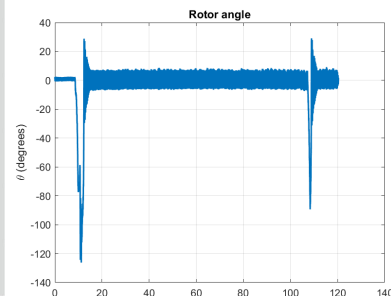
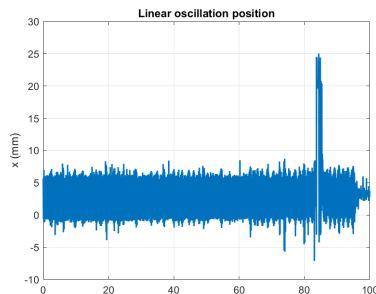
Μετρήσεις κίνησης γραμμικού ταλαντωτή

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

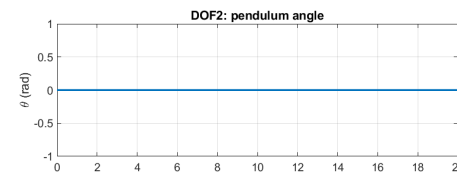


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης



Ταλάντωση σταθερού πλάτους όπως την προσομοίωση με εξαίρεση τις κορυφές που πιθανόν οφείλονται σε σφάλμα.



Ταλάντωση του ρότορα στις μεγάλες επιταχύνσεις στα πειράματα, καμιά ταλάντωση στην προσομοίωση. Επιβεβαίωση ύπαρξης μεγάλων τριβών.
Εμφάνιση προβλήματος με τις μαγνητικές δυνάμεις.
(Παράδειγμα 12.5 m/s^2)



Πειράματα σταθερής συχνότητας

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



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

Γιώργος Παπαδάκης

Από τα προηγούμενα πειράματα επίσης παρατηρήθηκε ότι ο γραμμικός ταλαντωτής μείωνε ταχύτητα όταν ο ρότορας ταλαντωνόταν. Έπειτα από περαιτέρω εξέταση ανακαλύφθηκε ότι σε μικρές γωνίες του ρότορα οι μαγνητικές δυνάμεις πιέζουν τον γραμμικό ταλαντωτή πάνω στην σφήνα μειώνοντας την κίνηση του σημαντικά.

Για την επίλυση του προβλήματος δοκιμάστηκε η μείωση των μαγνητών του ρότορα στους μισούς και βρέθηκε πειραματικά ότι μπορεί να υπάρξει πλήρης περιστροφή σε πείραμα με συχνότητα 6.5 Hz και υψηλή επιτάχυνση έπειτα από διέγερση του ρότορα.



2026



Αλλαγή αριθμού μαγνητών

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



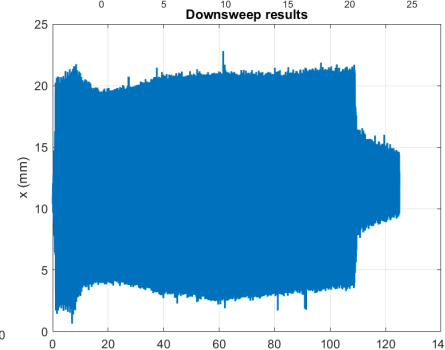
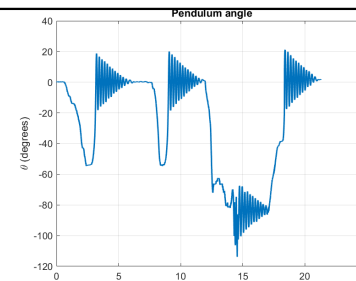
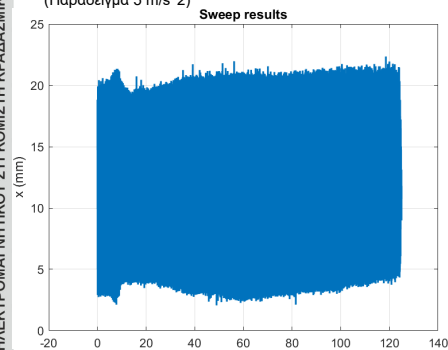
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης

Πρώτα, έγινε ένα πείραμα ελεύθερης ταλάντωσης για την επιβεβαίωση ότι η μείωση των μαγνητών δεν επηρεάζει την περιστροφή του ρότορα με θετικά αποτελέσματα.

Έπειτα, έγιναν πειράματα στο Shaker αυξανόμενης και μειούμενης συχνότητας σε 3 και 5 m/s² για να εξεταστεί αν επηρεάζεται η κίνηση του γραμμικού ταλαντωτή με την αλλαγή. Από αυτά διακρίνεται ότι το πλάτος ταλάντωσης περιορίζεται από τα όρια των ελατηρίων.

(Παράδειγμα 5 m/s²)



2026



Πειράματα στην διάταξη 4 μαγνητών

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



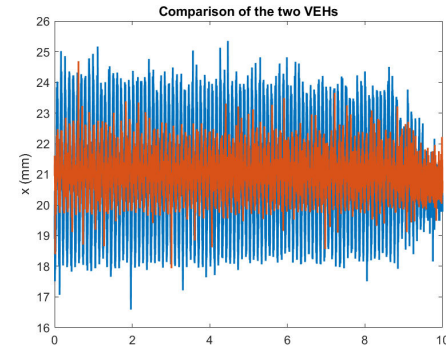
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης



Για την αύξηση του εύρους ταλάντωσης η κάτω βάση ελατηρίου μεταφέρθηκε σε χαμηλότερη υπάρχουσα ασφάλεια. Επίσης, εξετάστηκε η δημιουργία μιας ψηλότερης θέσης για την πάνω βάση ελατηρίου αλλά φάνηκε να οδηγεί σε μικρότερο πλάτος ταλάντωσης και απορρίφθηκε.

Παράλληλα, έγινε λείανση του άξονα και των αυλακιών για μείωση των αβεβαιοτήτων του συστήματος και δημιουργήθηκαν νέες βάσεις ελατηρίου για αύξηση της σταθερότητας.



Αλλαγές στην διάταξη για αύξηση του εύρους

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



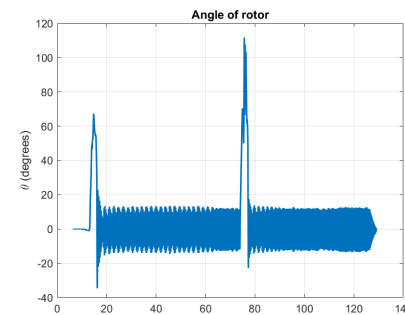
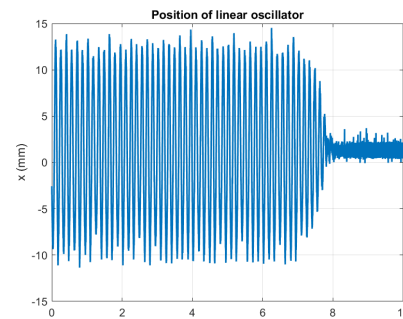
School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης

Μετά τις αλλαγές αυτές, γίνονται πειράματα για να εξεταστούν οι δυνατότητες της τελικής κατασκευής.

Μετρήσεις θέσης όταν δεν υπάρχει διέγερση και μετρήσεις γωνίας όταν υπάρχει διέγερση.

Πρώτα, γίνεται πείραμα σταθερής συχνότητας 6.5 Hz και επιτάχυνση 5 m/s² στο shaker, από το οποίο παρατηρήθηκε ταλάντωση του ρότορα και αποδεικνύεται η εξάλειψη των τριβών.



Τελικά πειράματα θέσης και γωνίας

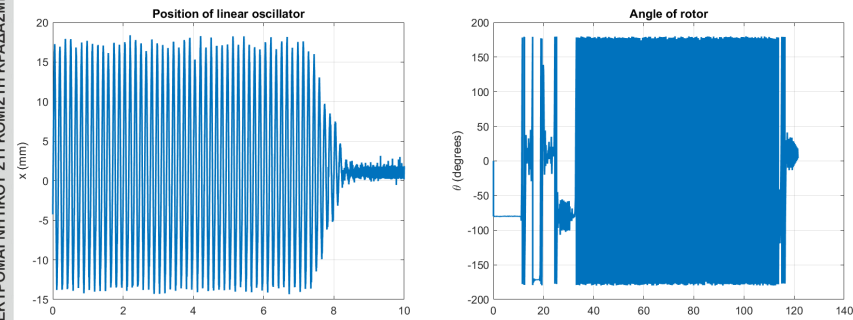
<http://www.m3.tuc.gr>



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

Γιώργος Παπαδάκης

Έπειτα, γίνεται πείραμα σταθερής συχνότητας 6.5 Hz και επιτάχυνση 10 m/s^2 στο shaker περιμένοντας να παρατηρηθεί πλήρης ταλάντωση. Παρατηρήθηκε πλήρης ταλάντωση μόνο όταν υπήρχε διέγερση με το χέρι, η οποία επιτεύχθηκε με την πρώτη διέγερση.



Τελικά πειράματα θέσης και γωνίας

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

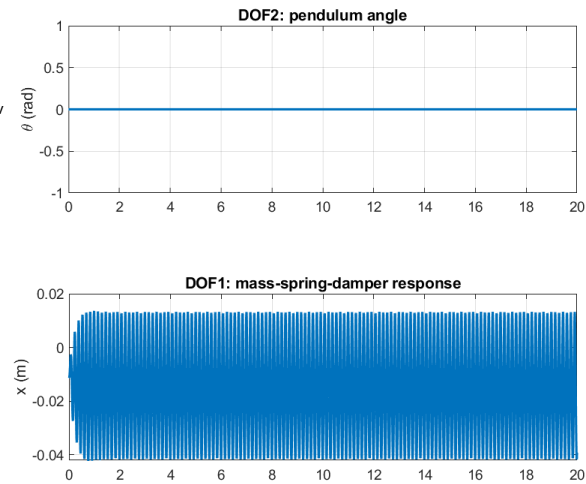


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης

Η προσομοίωση επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα στην περίπτωση που δεν υπάρχει διέγερση.

Τι γίνεται όμως στην περίπτωση που υπάρχει διέγερση;



(Παράδειγμα 10 m/s^2)



Προσομοίωση τελικών πειραμάτων θέσης και γωνίας

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

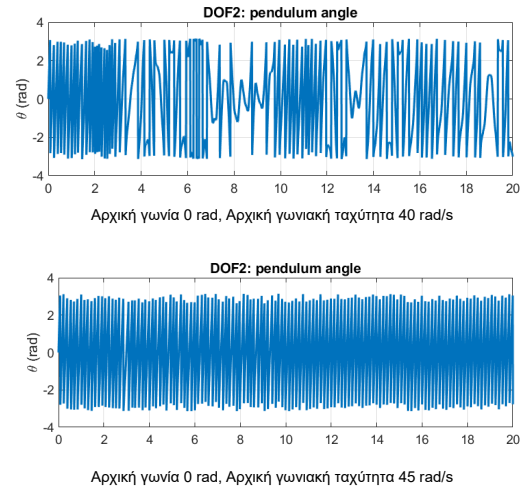


School of Production Eng. & Management
Micromachining & Manufacturing Modeling Lab
Prof. Aristomenis Antoniadis

Γιώργος Παπαδάκης

Η προσομοίωση της ταλάντωσης με διέγερση του ρότορα είναι δύσκολη καθώς δεν γνωρίζουμε τις ακριβείς αρχικές συνθήκες της διέγερσης.

Επίσης, με μικρές αλλαγές στις αρχικές συνθήκες μπορεί εύκολα το σύστημα να μεταφερθεί από περιστροφική συμπεριφορά σε χασοτική, όπως φαίνεται στα παραδείγματα.



Τέλος, μετρήθηκε η τάση που παράγεται στα πηνία κατά την λειτουργία σε σταθερή συχνότητα 6.5 Hz.

Η μέγιστη τάση μετρήθηκε περίπου στα 60 mV.

Παρατηρήθηκε διαφορά στην παραγωγή ενέργειας ανάλογα με την συμπεριφορά του ρότορα, αλλά απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για διεξαγωγή συμπερασμάτων.



Ευχαριστώ για την προσοχή σας!