Διδακτορική Διατριβή

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΕΛΡΑΝΟΥ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ-ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ)

Μιχαήλ Γρ. Φαρμακόπουλος
Διπλ. Μηχανολόγος και Αεροναυπηγός Μηχανικός
Πανεπιστημίου Πατρών

Πάτρα, 2014

Πρακτικό συνεδρίασης

Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για την κρίση της διδακτορικής διατριβής

του υποψηφίου διδάκτορα κ. Μιχαήλ Φαρμακόπουλου

Πάτρα 16 Ιανουαρίου 2015

Η Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή για την Διδακτορική Διατριβή του υποψήφιου Διδάκτορα κ. Μιχαήλ Φαρμακόπουλου, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, με τίτλο «Σχεδιασμός Υβριδικού Εδράνου Ολίσθησης (Υδροδυναμικού – Ηλεκτρομαγνητικού)», συγκροτήθηκε στην 7η συνεδρίαση της 31ης / 03 / 2009, από τους κκ.:

- Χρήστο Παπαδόπουλο, επιβλέποντα, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών,
- Παντελή Νικολακόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, και
- Νικόλαο Κούσουλα, Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών

και συμπληρώθηκε κατόπιν απόφασεως της 2^{ης} Γενικής Συνέλευσης με Ειδική Σύνοψη της 25^{ης} / 11/ 2014, με τους κκ.:

- Νικόλαο Ανυφαντή, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών,
- Αθανάσιο Μιχαηλίδη, Καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης,
- Αντώνιο Τζε, Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών,
- Χρήστο Ι. Παπαδόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Η εξεταστική επιτροπή συνεδρίασε σήμερα Παρασκευή, 16/01/2015 και ώρα 18:00 μ.μ, στην αίθουσα συνεδριάσεων του Τμήματος. Κατά την συνεδρίαση ο υποψήφιος διδάκτορας κ. Μιχαήλ Φαρμακόπουλος ανέπτυξε δημόσια και εκτενώς την διατριβή του ενώπιον της εξεταστικής επιτροπής και αφού απάντησε στις υποβληθείσες ερωτήσεις περατώθηκε η εξέταση.

Εν συνεχεία, στην κατ' ιδίαν συνεδρίαση η εξεταστική επιτροπή, κατόπιν συζήτησης, αποφάσισε ομόφωνα ότι η διατριβή αποτελεί πρωτότυπη και ουσιαστική συμβολή στην προαγωγή της επιστήμης. Μετά από ονομαστική ψηφοφορία, τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής ψήφισαν ομόφωνα υπέρ της απονομής του τίτλου του Διδάκτορα στον κ. Μιχαήλ Φαρμακόπουλο, τη δε διατριβή βαθμολόγησαν με τον βαθμό «Άριστα».

Η αναγόρευση του υποψηφίου σε διδάκτορα θα γίνει από την Γενική Συνέλευση με Ειδική Σύνοψη του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, σύμφωνα με το άρθρο 13 του νόμου 2083/92.

Η επταμελής εξεταστική επιτροπή,

Χρήστος Α. Παπαδόπουλος
Παντελής Νικολακόπουλος
Νικόλαος Κούσουλας
Νικόλαος Ανυφαντής
Αθανάσιος Μιχαηλίδης
Τζέζ Αντώνιος
Χρήστος Ι. Παπαδόπουλος

Εξεταστική Επιτροπή

1. Χρήστος Α. Παπαδόπουλος, Καθηγητής (Επιβλέπων Καθηγητής).
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών.
2. Παντελής Νικολακόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής (Μέλος τριμελούς
Συμβουλευτικής Επιτροπής).
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών.
3. Νικόλαος Κούσουλας, Καθηγητής (Μέλος τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής).
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών,
Πανεπιστήμιο Πατρών.
4. Νικόλαος Ανυφαντής, Καθηγητής.
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών.
5. Αθανάσιος Μιχαηλίδης, Καθηγητής.
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
6. Αντώνιος Τζες, Καθηγητής.
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών,
Πανεπιστήμιο Πατρών.
7. Χρήστος Ι. Παπαδόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής.
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών,
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ευχαριστίες

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, μου δόθηκε η ευκαιρία να συνεργαστώ με καθηγητές, φοιτητές, διοικητικούς υπαλλήλους του Πανεπιστημίου Πατρών καθώς και άλλων Πανεπιστημίων, τεχνικούς και άλλους που είχαν σχέση με τα διάφορα επιμέρους αντικείμενα της συγκεκριμένης εργασίας.

Ως επιβλέπων της διδακτορικής μου διατριβής είχε οριστεί ο καθηγητής του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών κ_{ος} Χρήστος Παπαδόπουλος, ο οποίος στάθηκε δίπλα μου ως σύμβουλος και καθοδηγητής. Με βοήθησε στην οργάνωση του υλικού της θεωρητικής προσέγγισης του θέματος, στην οργάνωση του υλικού της ερευνητικής διαδικασίας και γενικότερα στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Για όλα αυτά, του εκφράζω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Επίσης, θέλω να τον ευχαριστήσω διότι κατά τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής, αποκτήσαμε Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας, Ελληνικό, Ευρωπαϊκό και Διεθνές, το οποίο είχε αποτελέσει σημείο αναφοράς των προσδοκιών μου, και στο οποίο είναι εφευρέτες ο κ_{ος} Χρήστος Παπαδόπουλος, ο κ_{ος} Παντελής Νικολακόπουλος καθώς και εγώ. Ελπίζω και εύχομαι μέσω του Διπλώματος Ευρεσιτεχνίας, να μου δοθεί η ευκαιρία να συνεχίσω τη συνεργασία μου με τον κ_ο Χρήστο Παπαδόπουλο και τον κ_ο Παντελή Νικολακόπουλο και τα επόμενα χρόνια.

Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών κ_ο Παντελή Νικολακόπουλο για την αμέριστη επιστημονική συμπαράστασή του στα διάφορα επιμέρους αντικείμενα της παρούσας διατριβής. Ελπίζω στο μέλλον να συνεχίσουμε τη συνεργασία μας, με σκοπό την περαιτέρω ανάπτυξη, βελτίωση και προώθηση του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Επίσης, ευχαριστώ τον καθ. κ_ο Νικόλαο Κούσουλα, καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, ο οποίος με βοήθησε μεταξύ άλλων και στην κατανόηση των εννοιών του ελέγχου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Ο υποψήφιος διδάκτορας του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Μιχαήλ Θάνου, με βοήθησε αποτελεσματικά, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον και προθυμία στα θέματα θεωρίας, προσομοίωσης και εφαρμογής του ελέγχου στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης, και ως εκ' τούτου η διατριβή προχωρούσε με γρήγορους ρυθμούς και αποτελεσματικά.

Τέλος, ευχαριστώ και όλους όσους με βοήθησαν για να έλθει εις πέρας αυτή η εργασία.

Μιχαήλ Γ. Φαρμακόπουλος
Πάτρα, 2014

Περιεχόμενα

Εξεταστική Επιτροπή.....	V
Ευχαριστίες.....	VII
Περίληψη	XV
Abstract.....	XVII
Πρόλογος.....	XIX
Εισαγωγή	1
I.1 Το πρόβλημα γενικά και η σημασία του.....	1
I.2 Ιστορική αναδρομή και παρούσα κατάσταση.....	3
I.2.1 Είδη εδράνων	3
I.2.2 Υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης.....	4
I.2.3 Ενεργά Ηλεκτρομαγνητικά έδρανα	8
I.2.4 Υβριδικά έδρανα.....	11
I.3 Η τρέχουσα μελέτη, πρωτότυπα - καινοτόμα θέματα.....	14
I.3.1 Παραδοχές και μεθοδολογία.....	14
I.3.2 Εφαρμογές του υβριδικού εδράνου ολίσθησης	19
I.3.3 Συνεισφορά	20
Κεφάλαιο 1.....	21
CFD Σχεδιασμός και Ανάλυση Εδράνων Ολίσθησης (Ansys)	21
Εισαγωγή	21
Γεωμετρία υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης.....	21
Σημείο ισορροπίας υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης	22
Συντελεστές ελαστικότητας, συντελεστές απόσβεσης.....	23
Μοντελοποίηση του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης, με προγραμματισμό στο Ansys	23
Συμπεράσματα	36

Κεφάλαιο 2.....39

ΕΜΕ Σχεδιασμός και Ανάλυση Ενεργών Ηλεκτρομαγνητικών Εδράνων (Ansys).....39

Εισαγωγή	39
Γεωμετρία ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.....	39
Ισορροπία δυνάμεων.....	41
Γραμμικοποίηση της εξίσωσης κίνησης του ρότορα στο ΕΜΕ, με την 1 ^η μέθοδο Lyapunov	43
Συντελεστής ελαστικότητας, συντελεστής απόσβεσης.....	47
Μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, με προγραμματισμό στο Ansys	48
Συμπεράσματα	68

Κεφάλαιο 3.....71

Σχεδιασμός Συστήματος Ελέγχου Ενεργών Ηλεκτρομαγνητικών Εδράνων.....71

Εισαγωγή	71
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	73
Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου	74
Εξισώσεις κίνησης του ρότορα μέσα στο ΕΜΕ, με αζυγοσταθμία του ρότορα.....	75
Εξισώσεις κίνησης του ρότορα μέσα στο ΕΜΕ, με αζυγοσταθμία και γυροσκοπικό φαινόμενο του ρότορα	76
Προσομοίωση του συστήματος ελέγχου του ρότορα μέσα στο ΕΜΕ, με προγραμματισμό στο Matlab και στο Simulink module του Matlab	80
Εισαγωγή δεδομένων για την προσομοίωση του ΕΜΕ	81
Αποσυζευγμένος Έλεγχος	84
Επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο	87
Ελεγκτής PID	89
Επιβεβαίωση αποτελεσμάτων του ελεγκτή.....	91

Συμπεράσματα.....	92
Κεφάλαιο 4.....	95
Σχεδιασμός και Ανάλυση Υβριδικού Εδράνου Ολίσθησης (Υδροδυναμικού – Ηλεκτρομαγνητικού).....	95
Εισαγωγή	95
Γεωμετρικοί περιορισμοί και περιορισμοί ως προς τα υλικά ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου	95
Γεωμετρία - σχεδιασμός υβριδικού εδράνου ολίσθησης	99
Συντελεστής ελαστικότητας, συντελεστής απόσβεσης.....	105
Μοντελοποίηση του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, με προγραμματισμό στο Ansys	106
Τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης....	108
Περίπτωση λειτουργίας 1. Σταθερό φορτίο	109
Περίπτωση λειτουργίας 2. Σταθερό σημείο ισορροπίας	117
Περίπτωση λειτουργίας 3. Αύξηση σταθερότητας του ρότορα	117
Συμπεράσματα	118
Κεφάλαιο 5.....	119
Σχεδιασμός Συστήματος Ελέγχου Υβριδικών Εδράνων Ολίσθησης	119
Εισαγωγή	119
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	120
Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου	121
Εξισώσεις κίνησης του ρότορα μέσα στο ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο, με αζυγοσταθμία και γυροσκοπικό φαινόμενο του ρότορα...	121
Προσομοίωση του συστήματος ελέγχου του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, με προγραμματισμό στο Matlab και στο Simulink module του Matlab.....	123
Εισαγωγή δεδομένων για την προσομοίωση του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου	124
Αποσυζευγμένος έλεγχος	125

Επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή για το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο	127
Ελεγκτής PID	128
Τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης....	130
Περίπτωση λειτουργίας 1. Σταθερό εξωτερικό φορτίο.....	130
Περίπτωση λειτουργίας 2. Σταθερό σημείο ισορροπίας και αύξηση ικανότητας παραλαβής φορτίου	141
Περίπτωση λειτουργίας 3. Σταθερό σημείο ισορροπίας και αύξηση ευστάθειας	143
Συμπεράσματα.....	152
Κεφάλαιο 6.....	155
Σύστημα Ρότορα – Εδράνων.....	155
Εισαγωγή	155
Εξισώσεις κίνησης του ρότορα.....	155
Μητρώα λόγω του δίσκου.....	158
Μητρώα λόγω των εδράνων.....	159
Διάγραμμα Campbell, κρίσιμες ταχύτητες	160
Απόκριση του ρότορα λόγω αζυγοσταθμίας σε δίσκο.....	161
Δεδομένα για την επίλυση του συστήματος.....	163
Αποτελέσματα	168
Συμπεράσματα.....	176
Κεφάλαιο 7.....	179
Πειραματική Διαδικασία και Επαλήθευση	179
Εισαγωγή	179
Σχεδιασμός-κατασκευή εικονικού μοντέλου	179
Σχεδιασμός εικονικού μοντέλου	179
Κατασκευή εικονικού μοντέλου	183
Σχεδιασμός του πειράματος.....	187
Σχεδιασμός της μηχανής Bently Nevada RK4, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA.....	188

Σχεδιασμός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA	190
Σχεδιασμός του ρότορα, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA	193
Σχεδιασμός της βάσης στήριξης των αισθητήρων, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA	193
Συναρμολόγηση της κατασκευής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA	193
Κατασκευή του πειράματος.....	194
Κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης	194
Κατασκευή του ρότορα	200
Κατασκευή της βάσης στήριξης των αισθητήρων	200
Συναρμολόγηση της κατασκευής	200
Πειραματική διαδικασία	203
Δεδομένα μετρήσεων	203
Επίδραση της θερμοκρασίας των αισθητήρων στα σήματά τους	204
Εύρεση μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής έντασης ρεύματος	204
Εύρεση μέγιστης ικανότητας παραλαβής φορτίου	206
Σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις - επιβεβαίωση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων	207
Εύρεση χαρακτηριστικών αδράνειας συστήματος.....	209
Αρχιτεκτονική συστήματος ελέγχου	212
Συμπεράσματα	214
Γενικά Συμπεράσματα και Προτάσεις για Βελτιώσεις στο Μέλλον	215
Βιβλιογραφία - Ιστοσελίδες	217

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αναφέρεται σε έδρανα ολίσθησης. Συγκεκριμένα, αναφέρεται στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός νέου, πρωτότυπου υβριδικού εδράνου ολίσθησης, το οποίο έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως υδροδυναμικό, είτε ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό, είτε ως υβριδικό, δηλαδή υδροδυναμικό και ενεργό ηλεκτρομαγνητικό ταυτόχρονα.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός και η κατασκευή του συγκεκριμένου υβριδικού εδράνου ολίσθησης, έγιναν υπολογισμοί και προσομοίωση του υδροδυναμικού πεδίου για τα υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για τα ηλεκτρομαγνητικά έδρανα στο πρόγραμμα ANSYS. Η προσομοίωση των υβριδικών εδράνων ολίσθησης έγινε με επαναληπτική διαδικασία μεταξύ του υδροδυναμικού και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου προκειμένου να υπολογίζεται το κάθε επιθυμητό μέγεθος.

Για το σχεδιασμό του υβριδικού εδράνου ολίσθησης χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA.

Για την προσομοίωση του ελέγχου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Matlab, το οποίο ενεργοποιεί το πρόγραμμα Ansys για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του υδροδυναμικού και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του εδράνου και το Simulink module του Matlab για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του ελέγχου, ώστε να γίνονται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί αυτοματοποιημένα.

Τέλος, έγιναν υπολογισμοί και προσομοίωση δυναμικής περιστρεφόμενων αξόνων, με στήριξη του ρότορα σε δύο έδρανα και δίσκο προσαρμοσμένο στον ρότορα, στο πρόγραμμα Matlab, με σύνδεση με το Ansys για τον υπολογισμό των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης και το Simulink module του Matlab για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του ελέγχου, με σκοπό την ολοκληρωμένη ανάλυση του συστήματος.

Συμπερασματικά, μέσω της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής αποδεικνύεται πως ο σχεδιασμός, η λειτουργία και η κατασκευή του συγκεκριμένου πρωτότυπου υβριδικού εδράνου ολίσθησης είναι εφικτά, και από τα αποτελέσματα προκύπτει πως η λειτουργία ενός τέτοιου υβριδικού εδράνου ολίσθησης, έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα έδρανα στήριξης περιστρεφόμενων αξόνων, είτε αυτά είναι απλά είτε υβριδικά και μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε εργαστηριακό επίπεδο είτε σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Λέξεις κλειδιά: Υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης, ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα, υβριδικά έδρανα, CATIA, Ansys, Matlab, Simulink, ελεγκτής PID.

Abstract

The present doctoral thesis refers to hydrodynamic journal bearings. Specifically, it refers to the design and construction of a new, innovative hybrid journal bearing, which has the ability to function either as hydrodynamic or active magnetic or hybrid, i.e. both hydrodynamic and active magnetic, at the same time.

In order to be performed the design and construction of the specific hybrid journal bearing, calculations and simulation of the hydrodynamic field for the hydrodynamic journal bearings in the program ANSYS, have been made. The simulation of the hybrid journal bearings has been made with iterative process, between the hydrodynamic and active magnetic field, so that every desired magnitude can be calculated.

For the design of the hybrid journal bearing, the designing program CATIA has been used.

For the simulation of the control of the hybrid journal bearing, the program Matlab has been used, which activates the program Ansys, for the calculation of the features of the hydrodynamic and active magnetic field of the bearing and the Simulink module of Matlab, for the calculation of the features of control, so that all necessary calculations can be made automated.

Finally, calculations and simulation of rotor dynamics, with support of the rotor in two bearings and disc adjusted to the rotor, in Matlab, in connection to Ansys, for the calculation of the elastic and damping coefficients and the Simulink module of Matlab, for the calculation of the features of control, have been made, having as a purpose the complete analysis of the system.

In conclusion, through the specific doctoral thesis, it is proved that the design, function and construction of the specific, new hybrid journal bearing, can be achieved and the results show that the function of such a hybrid journal bearing, has many advantages compared to other bearings of support of rotors, either they are simple or hybrid and it can be applied either to laboratory level or industrial applications.

Keywords: Hydrodynamic journal bearings, active magnetic bearings, hybrid bearings, CATIA, Ansys, Matlab, Simulink, PID control.

Η διδακτορική διατριβή ξεκίνησε τον Μάρτιο του 2009, στο εργαστήριο Υπολογισμού και Σχεδιάσεως Στοιχείων Μηχανών, στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Χρήστου Παπαδόπουλου. Το αντικείμενο της διατριβής είναι ο σχεδιασμός υβριδικού εδράνου ολίσθησης (υδροδυναμικού – ηλεκτρομαγνητικού).

Κατά τη διάρκεια αυτής της διατριβής, σχετικοί με το αντικείμενο καθηγητές, φοιτητές, τεχνικοί και άλλοι βοήθησαν για τη διεξαγωγή της, με τις γνώσεις τους και τις εμπειρίες τους.

Επίσης, προκειμένου να καλυφθούν πληρέστερα όλες οι πτυχές και εκφάνσεις της συγκεκριμένης εργασίας, προσπάθησα να συλλέξω όσο το δυνατό περισσότερες πληροφορίες από την υπάρχουσα βιβλιογραφία και από στοιχεία τα οποία άντλησα από ιστότοπους του διαδικτύου. Η εργασία αυτή είναι το αποτέλεσμα της μακράς και συνεχούς προσπάθειάς μου να πετύχω το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, μέσα από μια συνεχή έρευνα και καταγραφή των απαραίτητων στοιχείων.

Παράλληλα, στο πλαίσιο της ερευνητικής μου δραστηριότητας πραγματοποίησα επισκέψεις και συνομιλίες με ειδικούς του αντικειμένου της εργασίας αυτής, από τους οποίους άντλησα χρήσιμες πληροφορίες.

Στον πρώτο χρόνο της διδακτορικής μου διατριβής, σκοπός ήταν η κατανόηση και ο σχεδιασμός υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης. Ο σχεδιασμός των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Ansys με CFD ανάλυση και με παραμετρικό τρόπο, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης των χαρακτηριστικών τους και εξαγωγής διαφορετικών αποτελεσμάτων.

Κατά τη διάρκεια του δεύτερου χρόνου της διδακτορικής διατριβής, σκοπός ήταν η κατανόηση και ο σχεδιασμός ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων ολίσθησης. Ο σχεδιασμός των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων ολίσθησης πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Ansys με επίλυση των εξισώσεων Maxwell. Τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα σχεδιάστηκαν με παραμετρικό τρόπο και έτσι υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης των χαρακτηριστικών τους και εξαγωγής διαφορετικών αποτελεσμάτων.

Κατά τον τρίτο χρόνο της διατριβής μου, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός, η ανάλυση και η κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Ο σχεδιασμός των υβριδικών εδράνων ολίσθησης πραγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA, με τέτοιο τρόπο ώστε το υβριδικό έδρανο ολίσθησης να είναι λειτουργικό. Η ανάλυση των υβριδικών εδράνων ολίσθησης επιτυγχάνεται μέσω του προγράμματος Ansys, με επαναληπτική διαδικασία μεταξύ υδροδυναμικών και ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων ολίσθησης.

Ο τέταρτος χρόνος της διδακτορικής διατριβής περιελάμβανε το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου μαγνητικών και υβριδικών εδράνων ολίσθησης. Ο σχεδιασμός του ελέγχου πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Matlab, το οποίο συνδέεται με το πρόγραμμα Ansys και το Simulink module του Matlab, ώστε να πραγματοποιούνται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί και να εξάγονται τα αποτελέσματα του ελέγχου.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα υβριδικά έδρανα έχουν βελτιωμένες ιδιότητες ως προς τη συμπεριφορά τους σε σχέση με τα μαγνητικά ή τα υδροδυναμικά έδρανα, προσφέροντας ασφάλεια στις κατασκευές στις οποίες τοποθετούνται.

Κατά τη διάρκεια του πέμπτου χρόνου της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός συστήματος ρότορα-εδράνων. Η ανάλυση του συστήματος αυτού και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Matlab, με σύνδεση με τα προγράμματα Ansys και Simulink module του Matlab. Τα έδρανα του συστήματος ρότορα-εδράνων είναι υβριδικά και έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν είτε ως υδροδυναμικά, είτε ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά, είτε ως υβριδικά. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής δίσκου στον ρότορα και ανάλυσης του συστήματος και σε αυτήν την περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη και το γυροσκοπικό φαινόμενο καθώς και τυχόν αζυγοσταθμίες σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος ρότορα-εδράνων.

Συμπερασματικά, μέσω της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκε η ιδέα του σχεδιασμού του υβριδικού εδράνου ολίσθησης καθώς και η κατασκευή του. Αυτό οφείλεται στον πετυχημένο σχεδιασμό των υδροδυναμικών και ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Έχοντας ολοκληρώσει λοιπόν τη διδακτορική μου διατριβή, μετά από συνεχή και εντατική ενασχόληση, αισθάνομαι ιδιαίτερη ικανοποίηση, διότι μπόρεσα να ασχοληθώ με ένα θέμα το οποίο με ενδιαφέρει βαθύτατα και κατάφερα να αποκτήσω πληρέστερη γνώση γύρω απ' αυτό.

Μιχαήλ Γ. Φαρμακόπουλος
Πάτρα, 2014

Εισαγωγή

1.1 Το πρόβλημα γενικά και η σημασία του

Η συγκεκριμένη εργασία, έχει ως σκοπό το σχεδιασμό ενός νέου τύπου υβριδικού εδράνου ολίσθησης, το οποίο θα είναι βελτιωμένο ως προς τις ιδιότητές του σε σχέση με τα προϋπάρχοντα έδρανα.

Στις περισσότερες μηχανές που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενους άξονες, χρησιμοποιούνται υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης για τη στήριξη των περιστρεφόμενων αξόνων και την έδρασή τους στις κατασκευές. Περισσότερες από 5000 εργασίες ερευνητών, οι οποίες αναφέρονται σε υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης, έχουν ήδη δημοσιευτεί, και ο αριθμός συνεχώς αυξάνεται.

Τα υδροδυναμικά έδρανα έχουν κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα είναι ότι η σχεδίαση του εδράνου και του εξωτερικού κελύφους είναι πολύ απλή, απαιτείται πολύ μικρή ακτινική χάρη για τη λειτουργία τους, άρα είναι και οικονομικά στο συνολικό τους μέγεθος, το κόστος κατασκευής τους είναι σχετικά μικρό, η σχεδίαση του άξονα είναι πολύ απλή, λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα θορύβου, έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν πολύ υψηλά φορτία, να αντέχουν σε καταστάσεις shock και λειτουργούν αξιόπιστα σε υψηλές, μεσαίες και χαμηλές στροφές. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να παραλαμβάνουν μεγάλα φορτία, έχοντας μεγάλες τιμές συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης.

Τα μειονεκτήματά τους είναι η φθορά του υλικού του εδράνου και του άξονα, οι υψηλές τριβές σε καταστάσεις ακραίας λειτουργίας της μηχανής, το σύστημα λίπανσης, το οποίο είναι απαραίτητο για τη λειτουργία τους, απαιτεί μεγάλη προσοχή και καθιστά το σύστημα πολύπλοκο, σχεδιάζονται για να παραλαμβάνουν μόνο ακτινικά ή αξονικά φορτία, είναι μη οικολογικά λόγω του λιπαντικού που περιλαμβάνουν στο σύστημα λίπανσής τους. Ακόμα, έχουν το μειονέκτημα να μην μπορούν να ελέγξουν την απόκριση του άξονα, κάτι που θα ήταν απαραίτητο κυρίως σε περιπτώσεις περιδίνησης του λιπαντικού που περιέχουν (oil whirl, oil whip).

Όταν ένα υδροδυναμικό έδρανο κατασκευαστεί σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις τυποποιήσεις που αφορούν τις διαστάσεις και τις ανοχές, συναρμολογηθεί και λιπαίνεται σωστά, τότε μπορεί να φέρει ένα συγκεκριμένο φορτίο, να λειτουργεί σε συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων περιστροφής και να έχει συγκεκριμένη διάρκεια ζωής, ως προς το ιξώδες και τις ιδιότητες του λιπαντικού και ως προς την αντοχή των υλικών του εδράνου και του ρότορα.

Τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύσσονται τα ηλεκτρομαγνητικά έδρανα, τα οποία είναι ενεργά και έρχονται να βελτιώσουν τη συμπεριφορά των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης. Περισσότερες από 3000 εργασίες ερευνητών, οι οποίες αναφέρονται σε μαγνητικά έδρανα, έχουν ήδη δημοσιευτεί, και συνεχώς ο αριθμός τους αυξάνεται με όλο και μεγαλύτερους ρυθμούς, καθώς είναι ένα θέμα το οποίο προσεγγίζει αρκετούς ερευνητές, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει αυτό το είδος εδράνων.

Τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα έχουν κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα είναι ότι δεν απαιτούν σύστημα λίπανσης,

αποφεύγοντας έτσι προβλήματα μόλυνσης του λιπαντικού, το σύστημα αποθήκευσης και μεταφοράς λαδιού και την περιοδική αντικατάστασή του, που είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών τεχνολογιών και από την άποψη του κόστους, και από την άποψη των χαμηλών ρύπων της μηχανής, μπορούν να λειτουργούν αποδοτικά σε δύσκολο περιβάλλον ή εντός κενού, είναι δυνατόν να λειτουργούν σε πολύ υψηλότερες στροφές από τα υδροδυναμικά έδρανα, διότι η περιστροφική ταχύτητα λειτουργίας περιορίζεται μόνο από την αντοχή του υλικού του ρότορα (φυγόκεντρες δυνάμεις), λειτουργούν πάντα με ευστάθεια, χωρίς οποιαδήποτε μηχανική επαφή, με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, με σημαντικά χαμηλότερο κόστος συντήρησης και με μικρές απώλειες στα έδρανα. Είναι ενεργά στοιχεία, γεγονός που επιτρέπει την επιλογή του σημείου ισορροπίας του άξονα με ακρίβεια και δίνει τη δυνατότητα μέτρησης και ελέγχου της θέσης και της απόκρισης του άξονα. Τέλος, η τεχνολογία των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων, λόγω των ενσωματωμένων συστημάτων, παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης και εποπτείας της μηχανής χωρίς πρόσθετα συστήματα καθώς επίσης και αναγνώριση των χαρακτηριστικών του συστήματος και διάγνωσης βλαβών. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος ρότορα-εδράνων, οι σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης μπορούν να μεταβάλλονται κατά τη λειτουργία, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα περιορισμού των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων, ενεργού και πραγματικού χρόνου ζυγοστάθμισης, μέτρησης των ασκούμενων δυνάμεων και προσδιορισμού και ελέγχου της θέσης του ρότορα.

Τα μειονεκτήματα είναι ότι έχουν μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος λόγω των ηλεκτρομαγνητών που διαθέτουν, δεν επιτρέπεται η διακοπή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στους ηλεκτρομαγνήτες, διότι σε αυτή την περίπτωση ο ρότορας ακουμπά στο εσωτερικό μέρος του εδράνου. Ακόμα, έχουν μεγάλο κόστος παραγωγής, κυρίως λόγω των αισθητήρων και του συστήματος ελέγχου που διαθέτουν, το οποίο απαιτεί μεγάλη ταχύτητα δειγματοληψίας, πολύ γρήγορους αλγόριθμους και πολύ μεγάλη ακρίβεια μηχανολογικής κατασκευής των εδράνων και των περιστρεφόμενων αξόνων. Τέλος, δεν μπορούν να παραλάβουν μεγάλα φορτία και δεν έχουν πολύ μεγάλες τιμές συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης σε σχέση με τα υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης.

Έχουν γίνει προσπάθειες για τη δημιουργία υβριδικών εδράνων ολίσθησης, με την εφαρμογή μόνιμων μαγνητών στην περιφέρεια των υδροδυναμικών εδράνων, με σκοπό την αύξηση της ικανότητας παραλαβής φορτίου. Αυτά τα υβριδικά έδρανα μόνιμου μαγνήτη αποτελούνται από κυλινδρικές συστοιχίες των μόνιμων μαγνητών, είναι συμπαγή και σχετικά χαμηλού κόστους παραγωγής. Όμως, μόνιμου μαγνήτη υβριδικά έδρανα, εμφανίζουν πολύ μικρό βαθμό απόσβεσης, δεν έχουν τα πλεονεκτήματα της προσαρμοζόμενης λειτουργίας που έχουν τα ενεργά μαγνητικά έδρανα και είναι γενικά ασταθή στην αξονική κατεύθυνση.

Για τους παραπάνω λόγους, κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός υβριδικού εδράνου ολίσθησης, με τέτοιο τρόπο που να είναι λειτουργικό, να μπορεί να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα των υδροδυναμικών και των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων και να έχει τη δυνατότητα να εξαλείψει τα μειονεκτήματά τους, καθώς τα έδρανα είναι τα μηχανολογικά στοιχεία τα οποία

συγκρατούν τους περιστρεφόμενους άξονες και είναι υπεύθυνα για την ασφάλεια των κατασκευών. Το υβριδικό έδρανο ολίσθησης αποκτά βέλτιστη δυναμική συμπεριφορά. Μπορεί, δηλαδή, να λειτουργεί ως υδροδυναμικό έδρανο, ως υδροδυναμικό έδρανο με έλεγχο απόκρισης μέσω λειτουργίας του ηλεκτρομαγνητικού εδράνου σε περιπτώσεις αστάθειας (oil whirl και oil whip), ως υδροδυναμικό έδρανο με το ηλεκτρομαγνητικό να λειτουργεί ως εξωτερικός παραμετρικός διεγέρτης για αναγνώριση του συστήματος και εντοπισμό βλαβών, ως υδροδυναμικό και ηλεκτρομαγνητικό ταυτόχρονα για αύξηση της ικανότητας παραλαβής φορτίου όταν αυτό είναι απαραίτητο ή ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο μόνο, χωρίς τη συμμετοχή της υδροδυναμικής λειτουργίας.

Ο προτεινόμενος νέος τύπος υβριδικού εδράνου ολίσθησης έχει τα εξής κύρια πλεονεκτήματα: έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος τιμών των ταχυτήτων περιστροφής του άξονα, έχει μεγάλη ικανότητα παραλαβής φορτίου, διότι η παραλαβή του συνολικού φορτίου W , μπορεί να γίνει από το υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης (παραλαβή φορτίου W_h) και από το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο (παραλαβή φορτίου W_m) ταυτόχρονα. Επίσης, μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα σε υψηλές, μεσαίες και χαμηλές στροφές, καθώς είναι δυνατή η επιλογή της κατάλληλης λειτουργίας του κάθε φορά, ως υδροδυναμικό, ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό ή ως υβριδικό, συνυπολογίζοντας την ταχύτητα περιστροφής του, την απαίτηση παραλαβής φορτίου κλπ. Ακόμα, μπορεί να αντέχει σε κρουστικές καταστάσεις, έχει μεγάλο χρόνο ζωής, μεγάλη αξιοπιστία στη λειτουργία του, χαμηλό κόστος συντήρησης και μικρές απώλειες στα έδρανα. Επίσης, είναι δυνατή η επιλογή του σημείου ισορροπίας του άξονα με ακρίβεια, ο περιορισμός των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων, η ζυγοστάθμιση ενεργού και πραγματικού χρόνου και η μέτρηση των ασκούμενων δυνάμεων.

Ένα τέτοιο υδροδυναμικό και ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο απαιτεί ιδιαίτερο σχεδιασμό ώστε να μπορεί να λειτουργήσει σωστά. Μεταξύ άλλων, κάποιες από τις ιδιαιτερότητες είναι η λειτουργία των δύο τύπων εδράνων επί κοινού κελύφους, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή του συστήματος ελέγχου της λειτουργίας του, ο υπολογισμός του κατάλληλου μαγνητικού διακένου καθώς και της κατάλληλης ακτινικής χάρης για την αδιάλειπτη λειτουργία του, τόσο στην κοινή περιοχή όσο και ανεξάρτητα, για κάθε τύπο εδράνου.

1.2 Ιστορική αναδρομή και παρούσα κατάσταση

1.2.1 Είδη εδράνων

Οι απαιτήσεις έδρασης στις διάφορες εφαρμογές ποικίλουν και γι' αυτό υπάρχουν πολλά είδη εδράνων. Τα έδρανα είναι ένας τομέας της μηχανολογίας ο οποίος εξελίσσεται συνεχώς.

Δύο σημαντικές κατηγορίες εδράνων είναι τα έδρανα κύλισης και τα έδρανα ολίσθησης. Οι δύο αυτές κατηγορίες εδράνων, διαφέρουν στο είδος της αναπτυσσόμενης τριβής. Στα έδρανα κύλισης, η περιστροφή του ρότορα (εσωτερικός δακτύλιος) ως προς το ακίνητο μέρος (εξωτερικός δακτύλιος), επιτυγχάνεται με την κύλιση στοιχείων κύλισης. Στα έδρανα ολίσθησης, η επιφάνεια του ρότορα ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του στάτη, με την παρεμβολή λιπαντικού, με

αποτέλεσμα να αναπτύσσεται τριβή ολίσθησης.

Επίσης, ανάλογα με τις δυνάμεις που παραλαμβάνουν, τα έδρανα διακρίνονται σε ακτινικά και αξονικά.

Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους διακρίνονται σε αυτορύθμιστα, τα οποία ρυθμίζουν την κλήση τους ανάλογα με την παραμόρφωση ή την κίνηση του ρότορα και σε σταθερά τα οποία εφαρμόζονται σε κατασκευές των οποίων ο ρότορας παραμένει πρακτικά απαραμόρφωτος και ακίνητος ως προς τον κεντρικό άξονα του εδράνου.

Ένα άλλο είδος εδράνων είναι τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα, στα οποία ο ρότορας αιωρείται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητών που δημιουργούνται με την κατάλληλη γεωμετρία του στάτη, με αποτέλεσμα να μηδενίζεται η τριβή μεταξύ των περιστρεφόμενων και των ακίνητων τμημάτων του εδράνου.

Άλλη κατηγορία εδράνων είναι τα αεροδυναμικά έδρανα, τα οποία λειτουργούν σε πολύ υψηλές στροφές. Σε αυτό το είδος εδράνων, κατά τη διάρκεια της περιστροφής εισέρχεται αέρας ανάμεσα στο περιστρεφόμενο και στο ακίνητο μέρος, με αποτέλεσμα την αιώρηση του ρότορα και τη μείωση της τριβής μεταξύ αυτών των τμημάτων.

Τέλος, ένα άλλο είδος εδράνων είναι τα υβριδικά έδρανα, τα οποία αποτελούν συνδυασμό τουλάχιστον δύο ειδών εδράνων. Ένα είδος υβριδικού εδράνου είναι τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά στα οποία τοποθετούνται και μόνιμοι μαγνήτες, με σκοπό την αύξηση παραλαβής φορτίου, τη μείωση της απαίτησης της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος κλπ. Άλλο είδος υβριδικού εδράνου ολίσθησης, είναι ο συνδυασμός υδροδυναμικού και ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, το οποίο παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη εργασία και αποτελεί καινοτομία.

1.2.2 Υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης

Φθορά υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης

Ένα από τα προβλήματα των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης, είναι η φθορά που δημιουργείται σε αυτά, έπειτα από πολλά χρόνια λειτουργίας ή λόγω τριβής του ρότορα με τα έδρανα κατά την έναρξη και κατά τη λήξη της λειτουργίας των μηχανών.

Μία συνήθης κατάσταση σε τέτοια συστήματα είναι η φθορά που συμβαίνει στην εσωτερική επιφάνεια των εδράνων ολίσθησης. Η φθορά προκύπτει λόγω υπερφόρτωσης ή λόγω της ξηράς τριβής κατά την εκκίνηση ή τον τερματισμό λειτουργίας του συστήματος, που οδηγεί στην επαφή μεταξύ του ρότορα και της εσωτερικής επιφάνειας του εδράνου ολίσθησης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η φθορά επηρεάζει το πάχος του λιπαντικού και κατά συνέπεια την κατανομή της πίεσής του. Επιπλέον, επηρεάζονται το σημείο ισορροπίας του ρότορα, οι δυναμικοί συντελεστές του εδράνου και η απόκριση του συστήματος.

Η φθορά αναλύθηκε από τον Dufrane και τους υπόλοιπους [1] το 1983, οι οποίοι ήταν οι πρώτοι που παρουσίασαν ένα γεωμετρικό και αναλυτικό μοντέλο της φθοράς.

Επίσης, ο Papanikolaou και οι υπόλοιποι [2, 3] παρουσίασαν την επίδραση της

φθοράς στους συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης σε μικρού μήκους έδρανο. Έχει εφαρμοστεί το γνωστό Dufrane [1] μοντέλο φθοράς, για την εισαγωγή φθοράς στο μαθηματικό μοντέλο. Έχει ερευνηθεί το μοντέλο ενός μικρού σε μήκος εδράνου. Οι δυνάμεις του λιπαντικού που δρουν στον ρότορα είναι αναλυτικά υπολογισμένες και παρουσιάστηκαν σε κλειστή μορφή για το έδρανο με και χωρίς φθορά. Η ίδια μέθοδος έχει εφαρμοστεί για τους συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης. Το μοντέλο έχει επιβεβαιωθεί χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης με τη χρήση του λογισμικού Ansys. Οι δυναμικοί συντελεστές παρουσιάζονται σε σχέση με το βάθος φθοράς. Ο σκοπός της εργασίας είναι να δώσει τις εκφράσεις κλειστής μορφής για τους δυναμικούς συντελεστές του ρότορα (ελαστικότητα και απόσβεση), για μικρού μήκους έδρανο ολίσθησης με φθορά ή έδρανο ολίσθησης με φθορά με μικρή αναλογία L/D , όπου η επίδραση της φθοράς είναι μεγαλύτερη, σύμφωνα με τους Kumar και Mishra [4]. Ο δεύτερος στόχος είναι να επιβεβαιώσει αυτές τις εκφράσεις κλειστής μορφής, χρησιμοποιώντας την CFD δυνατότητα του λογισμικού Ansys. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και επιβεβαιώνονται αριθμητικά οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης σε σχέση με το βάθος φθοράς.

Η έναρξη και η εξέλιξη της φθοράς σε απλό υδροδυναμικό έδρανο κάτω από επαναλαμβανόμενα ξεκινήματα / σταματήματα έχουν μελετηθεί πειραματικά από τον Mokhtar και τους υπόλοιπους συγγραφείς [5]. Η φθορά που συνέβη ήταν εύκολα ορατή, ωστόσο, αλλαγές στην ακτινική χάρη και διακυμάνσεις στην επιφάνεια του εδράνου μετρήθηκαν μετά από διάφορους αριθμούς κύκλων λειτουργίας. Μια μελέτη της φθοράς μέσα στα έδρανα έδειξε ότι προκλήθηκε εξ' ολοκλήρου από την τριβή που σημειώθηκε κατά την εκκίνηση και επίσης ότι κατά τον τερματισμό λειτουργίας δεν παρατηρήθηκε σημαντική συνεισφορά στη φθορά.

Οι Kumar και Mishra [4] ερευνούν αριθμητικά την επίδραση της γεωμετρικής μεταβολής λόγω της φθοράς στη σταθερότητα των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης, ακολουθώντας τη θεωρία τυρβώδους λίπανσης του Constantinescu. Παρουσιάζουν τις καμπύλες ευστάθειας για διάφορες τιμές του βάθους φθοράς, θεωρώντας διαταραχές. Η φθορά προκαλεί μείωση της σταθερότητας του ρότορα, σε περίπτωση που το έδρανο παραλαμβάνει μικρό φορτίο. Στην περίπτωση των φθαρμένων εδράνων, μία μικρότερη αναλογία L/D παρέχει καλύτερη ευστάθεια. Η επίδραση της φθοράς στην ικανότητα παραλαβής φορτίων και η τριβή είναι μεγαλύτερα σε μικρούς λόγους L/D .

Ο Awasthi και οι υπόλοιποι συγγραφείς [6] πραγματοποίησαν μια ανάλυση υβριδικών εδράνων με φθορά. Χρησιμοποίησαν την μέθοδο Newton-Raphson (FEM) για την επίλυση της εξίσωσης Reynolds για τη ροή του λιπαντικού εντός του εδράνου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η φθορά επηρεάζει την απόδοση του εδράνου σημαντικά. Παρατήρησαν ότι: (i) για συγκεκριμένο σχεδιασμό και συγκεκριμένο φορτίο οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά της απόδοσης ήταν πιο έντονες σε μεγαλύτερες τιμές φθοράς (ii) λόγω της σημαντικής διακύμανσης στα χαρακτηριστικά της απόδοσης του εδράνου, η επίδραση της φθοράς πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη λειτουργία ενός συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του.

Ο Hashimoto και οι υπόλοιποι συγγραφείς [7] παρουσίασαν την επίδραση της

μεταβολής της γεωμετρίας λόγω φθοράς στα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδράνων. Ανέλυσαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά, όπως τους συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης, ενός άκαμπτου ρότορα ο οποίος υποστηρίζεται από δύο πανομοιότυπα συμμετρικά ευθυγραμμισμένα έδρανα, για διάφορες τιμές βάθους φθοράς. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μεταβολή της γεωμετρίας που οφείλεται στη φθορά έχει σημαντικές επιπτώσεις στους κύριους συντελεστές ελαστικότητας και στους διαγώνιους συντελεστές απόσβεσης.

Ο Chasalevris και οι υπόλοιποι συγγραφείς [8] μελέτησαν την επίδραση της φθοράς του εδράνου στην απόκριση του ρότορα. Οι Rayleigh συζευγμένες εξισώσεις χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη διαταραχή του ρότορα ενώ οι δυνάμεις του εδράνου υπολογίστηκαν με την επίλυση της εξίσωσης Reynolds. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η φθορά επηρεάζει τη δυναμική του ρότορα εισάγοντας συμπληρωματικές ημι-αρμονικές: $1/2X$, $3/2X$, $5/2X$ κλπ. Οι $1/2X$ αρμονικές είναι πιο ευαίσθητες όταν η φθορά έχει αναπτυχθεί και η περιδίνηση του εδράνου είναι αρκετά μεγάλη.

Μια απόπειρα να συνδεθεί το βάθος φθοράς με τα δυναμικά χαρακτηριστικά παρουσιάζεται από τον Gertzos και τους υπόλοιπους συγγραφείς [9]. Χρησιμοποίησαν Computational Fluid Dynamics (CFD) ανάλυση για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes ενός υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης με φθορά. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όλα τα χαρακτηριστικά του εδράνου που παρουσιάζονται, μεταβάλλονται σημαντικά καθώς αυξάνεται το βάθος της φθοράς. Η εκκεντρότητα και η γωνία συμπεριφοράς αυξάνονται καθώς ο συντελεστής τριβής μειώνεται.

Οι Rozeanu και Kennedy [10] διαπίστωσαν ότι η φθορά εμφανίζεται σε τρεις διαφορετικές θέσεις στα έδρανα ολίσθησης, και κάθε μία από τις περιοχές δείχνει ένα διαφορετικό μηχανισμό φθοράς. Τέλος, έδειξαν ότι η μελέτη της φθοράς απαιτεί ένα διαφορετικό πρότυπο πείραμα για κάθε έναν από τους τρεις διαφορετικούς τρόπους φθοράς, και κάθε φθορά απαιτεί έναν διαφορετικό τρόπο για να επιτευχθεί η μείωσή της.

Οι Ronen και Malkin [11] διερεύνησαν μηχανισμούς φθοράς σε υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης με πρόσμειξη σωματιδίων στο φιλμ του λιπαντικού. Αυτό το είδος της φθοράς είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που ευθύνονται για την αστοχία των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης, ειδικά όταν λειτουργούν σε περιβάλλον με σκόνη. Έχουν διεξαχθεί πειράματα με δύο υλικά ρότορα και τρία υλικά του εδράνου, δίνοντας συνολικά έξι συνδυασμούς υλικών. Ως αποτέλεσμα, συνάγεται ότι μια μικρότερη αναλογία σκληρότητας, οδήγησε σε σχετικά μεγαλύτερη φθορά του εδράνου και μικρότερη φθορά του ρότορα.

Ο Li και οι υπόλοιποι συγγραφείς [12] πραγματοποίησαν προσομοίωση της κίνησης του ρότορα και μελέτησαν την πίεση του φιλμ του λιπαντικού σε ένα υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης, την πίεση του εδράνου, τους λόγους της αστοχίας και το μηχανισμό φθοράς του εδράνου, στο λογισμικό Ansys.

Ο Bouyer και οι υπόλοιποι συγγραφείς [13] επικεντρώνονται σε έδρανα 2-λοβών. Αυτά τα μηχανολογικά εξαρτήματα τείνουν να υποβάλλονται σε πολυάριθμα ξεκινήματα και σταματήματα. Κατά τη διάρκεια μεταβατικών περιόδων, η άμεση

επαφή μεταξύ του ρότορα και του εδράνου προκαλεί υψηλή τριβή στην λιπαινόμενη περιοχή και ως εκ τούτου, φθορά. Παρουσίασαν πειραματικά δεδομένα σχετικά με πολλές εκκινήσεις και σταματήματα του ρότορα. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων. Παρατήρησαν ότι η υδροδυναμική πίεση αυξάνει, ενώ η θερμοκρασία στο φιλμ λιπαντικού μειώνεται ελαφρώς στους δύο άνω και κάτω λοβούς.

Ο Nikolakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [14] παρουσίασαν ένα αναλυτικό μοντέλο για τη σχέση μεταξύ της δύναμης τριβής, τις γωνίες ευθυγράμμισης και το βάθος της φθοράς. Η εξίσωση Reynolds λύθηκε αριθμητικά και η δύναμη τριβής υπολογίστηκε στη θέση ισορροπίας. Ο συντελεστής τριβής παρουσιάστηκε σε σχέση με τις γωνίες ευθυγράμμισης και τα βάθη φθοράς για διαφορετικούς αριθμούς Sommerfeld, δημιουργώντας έτσι τις συναρτήσεις της τριβής σε σχέση με την κακή ευθυγράμμιση και τη φθορά του εδράνου. Επίσης, διερευνήθηκε η διακύμανση της απώλειας ισχύος του συστήματος ρότορα-εδράνων και παρουσιάζεται ως συνάρτηση του βάθους φθοράς και των γωνιών αποευθυγράμμισης.

Μη-κυκλικότητα υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης

Η φθορά δημιουργεί επίσης τοπικές αλλαγές στη γεωμετρία του εδράνου. Συγκεκριμένα αλλάζει το μέγεθος της ακτινικής χάρης, αλλάζει η ποιότητα της επιφάνειας καθώς και η γεωμετρία του εδράνου με τη δημιουργία μη-κυκλικής επιφάνειας, όπως αναφέρει ο Μπόμπος Δ. και οι υπόλοιποι συγγραφείς [15]. Συγκεκριμένα, μελέτησαν το μοντέλο ενός εδράνου με το ANSYS Multiphysics. Η επιφάνεια του εδράνου σχηματίζεται ως ένα άθροισμα ημιτονοειδών κυμάτων με διαφορετικά πλάτη και μήκη κύματος, προκειμένου να μελετηθεί η σχέση μεταξύ της μη-κυκλικότητας και τις ιδιότητες του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης. Η ροή του λιπαντικού προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Navier-Stokes, δίνοντας την ευκαιρία για διερεύνηση της επίδρασης των επιφανειακών ανωμαλιών στα χαρακτηριστικά της ροής του λιπαντικού. Το μήκος κύματος και το πλάτος του σφάλματος κυκλικότητας σημαίνουν επίδραση στο σημείο ισορροπίας του ρότορα μέσα στο έδρανο. Επίσης, εξετάζεται και η επίδραση της μη-κυκλικότητας στους συντελεστές τριβής, καθώς και στην ικανότητα παραλαβής φορτίου του εδράνου.

Υπάρχουν πολλές εργασίες οι οποίες ασχολούνται κυρίως με την επίδραση της μη-κυκλικότητας στην απόδοση των εδράνων ολίσθησης [16-18]. Οι ερευνητές ερευνούν την επίδραση στην απόδοση των εδράνων από τις μη-κυκλικότητες. Τα αποτελέσματα στη βιβλιογραφία [17] δείχνουν ότι η μη-κυκλικότητα του εδράνου επηρεάζει σημαντικά την λειτουργία των εδράνων. Στο [18], μια μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων πιστοποιήθηκε για να διακρίτοποιούμε τις εξισώσεις Navier-Stokes σχετικά με τρισδιάστατη κατάσταση του συμπιεστού ρευστού. Ερευνήθηκαν τα αποτελέσματα σχετικά με τα στατικά χαρακτηριστικά του εδράνου.

Σφάλματα κατασκευής, όπως η μη-κυκλική εσωτερική επιφάνεια των εδράνων, η κλίση, η κοιλότητα ή κυρτότητα που συμβαίνει στην επιφάνεια έδρασης είναι γνωστό ότι μειώνουν την απόδοση των εδράνων. Οι επιπτώσεις αυτές έχουν ήδη αντιμετωπιστεί σε μια σειρά από εργασίες [19-21]. Αυτές οι εργασίες αναφέρουν ότι η

ικανότητα παραλαβής φορτίου, η τριβή και ο συντελεστής τριβής του εδράνου σε μια κυρτή ή κυματιζόμενη επιφάνεια είναι μικρότερα από εκείνα του αντίστοιχου εδράνου με επίπεδη εσωτερική επιφάνεια.

Συντελεστές ελαστικότητας – απόσβεσης, ευστάθεια και δυναμική συμπεριφορά υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης

Όσον αφορά τα υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης, η δυναμική συμπεριφορά και η σταθερότητά τους εξαρτώνται από την ελαστικότητά τους και την απόσβεσή τους, και κατά συνέπεια, όλη η δομική ακεραιότητα του συστήματος περιστρεφόμενου ρότορα εξαρτάται από αυτές τις ιδιότητες. Πολλά άρθρα έχουν γραφτεί για το ευρύ αυτό θέμα με πειραματικούς [22, 23] και αναλυτικούς υπολογισμούς [24-27].

Ο Papadopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [28], παρουσίασαν μια νέα μέθοδο, όταν υπάρχει φθορά στην επιφάνεια των εδράνων, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις απόκρισης του ρότορα σε ένα συγκεκριμένο σημείο και σε δύο διαφορετικές ταχύτητες και σε διαφορετική φθορά. Παρουσίασαν ένα μοντέλο ρότορα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με 4 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, συμπεριλαμβανομένου του γυροσκοπικού φαινομένου. Οι 4×4 δυναμικοί συντελεστές του εδράνου υπολογίζονται καθώς επίσης και η σταθερότητα του συστήματος ως συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής και της φθοράς.

Ο Campos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [29] πρότειναν ένα απλό μοντέλο, ικανό να επιτρέπει την απεικόνιση των παραμέτρων και προβληματικών πτυχών που συνδέονται με έναν ρότορα με αζυγοσταθμία (de Laval ρότορα) με τη χρήση bond διαγραμμάτων. Έδωσαν ένα υψηλής πιστότητας, πειραματικά αποδεδειγμένο μοντέλο bond διαγραμμάτων του ρότορα de Laval. Αυτό το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σύνθετα μοντέλα δυναμικής αξόνων.

Ο Pedersen [30] παρουσίασε παραδείγματα της δυναμικής αξόνων de Laval και Stodola–Green ρότορα σε ένα bond διάγραμμα. Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ότι οι εξισώσεις της κίνησης ενός ρότορα με αζυγοσταθμία συνδέεται με τις εξισώσεις Lagrange με τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνουν τα φαινόμενα δυναμικής αξόνων και το γυροσκοπικό φαινόμενο.

1.2.3 Ενεργά Ηλεκτρομαγνητικά έδρανα

Σχεδιασμός ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων

Τα προβλήματα που παρουσιάζουν τα υδροδυναμικά έδρανα, τα οποία χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές, οδήγησαν τους ερευνητές στην ανάπτυξη νέων εδράνων. Αυτά τα νέα έδρανα είναι τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά, τα οποία λόγω της αιώρησης του περιστρεφόμενου ρότορα έχουν το πλεονέκτημα να μπορεί η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα να είναι πολύ υψηλή, καθώς δεν υπάρχει τριβή μεταξύ του ρότορα και του εδράνου. Τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα όμως, απαιτούν ανάλυση από τους ερευνητές προκειμένου να μοντελοποιηθούν, με σκοπό την ανάπτυξη κατάλληλων συστημάτων ελέγχου της θέσης του ρότορα. Για το σχεδιασμό του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, απαιτούνται λεπτομερείς υπολογισμοί ως προς τις διαστάσεις του και ως προς την επιλογή των υλικών του.

Ο Štimac και οι υπόλοιποι συγγραφείς [31] παρουσίασαν μια στρατηγική μοντελοποίησης για έναν εύκαμπτο ρότορα / ενεργό ηλεκτρομαγνητικό σύστημα εδράνων, με τη χρήση της μεθόδου non-collocation. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη μείωση των κραδασμών και τη σταθερή διέλευση από την πρώτη κρίσιμη ταχύτητα.

Ο Antila [32] παρουσίασε τα αποτελέσματα ορισμένων μη-ιδανικών ιδιοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών ενεργοποιητών σε ακτινικά ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα, όπως τα αποτελέσματα των δινορευμάτων στα ελάσματα, την ηλεκτρομαγνητική υστέρηση, κ.λπ.

Ο Zimon και οι υπόλοιποι συγγραφείς [33] παρουσίασαν ένα μη-συμμετρικό ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο δώδεκα πόλων. Στις προσομοιώσεις τους στον υπολογιστή περιλαμβανόταν το σύστημα ελέγχου. Χρησιμοποίησαν τη μέθοδο μοντελοποίησης πεδίου-κυκλώματος για διάφορες ταχύτητες του ρότορα. Έλυσαν την εξίσωση του ηλεκτρομηχανικού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις αναπόσπαστες παραμέτρους που προκύπτουν από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Επαλήθευσαν τους υπολογισμούς τους σε σχέση με τις μετρήσεις, για διάφορες ταχύτητες περιστροφής του ρότορα του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [34], παρουσίασαν συγκρίσεις μεταξύ των πειραματικών και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης σχετικά με το απαιτούμενο ρεύμα που εφαρμόζεται σε ένα ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, για την αιώρηση του ρότορα υπό διαφορετικά φορτία και θέσεις. Η προτεινόμενη μεθοδολογία και η σειρά δεδομένων που λαμβάνονται από τα πειράματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει ένα μη-γραμμικό μοντέλο των ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρομηχανικών διεργασιών και να βοηθήσει στην σχεδίαση ενός ψηφιακού συστήματος μικροελεγκτή, που θα μπορούσε να οδηγήσει τα ηλεκτρονικά ισχύος και να επιτρέψει στους ηλεκτρομαγνήτες να εφαρμόσουν την απαιτούμενη δύναμη στον ρότορα του εδράνου.

Έλεγχος ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων

Ο έλεγχος των διαταραχών στις περιστρεφόμενες μηχανές συνδέεται με μια κρίσιμη ταχύτητα, με μια διέγερση σε κάποια αρμονική ή με την αστάθεια της δυναμικής του ρότορα. Συνήθως, βαρείς ρότορες λειτουργούν κάτω από την κρίσιμη ταχύτητα, σε υποκρίσιμες συνθήκες, ενώ ελαφριοί ρότορες υψηλής ταχύτητας μπορούν να λειτουργήσουν σε υπερκρίσιμες συνθήκες. Ωστόσο υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι βαριές στροβιλογεννήτριες σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής λειτουργούν σε υπερκρίσιμες συνθήκες.

Στις μέρες μας, η πιο κοινή λύση ενεργού ελέγχου διαταραχών που χρησιμοποιείται σε περιστρεφόμενες μηχανές, είναι η χρήση ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων [35, 36]. Ένας ρότορας ανυψώνεται σε ένα διάκενο αέρος, από ενεργά ελεγχόμενες ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Η ανύψωση ενός ρότορα παρέχει πλεονεκτήματα όπως χαμηλή τριβή και λειτουργία που σχεδόν δεν χρειάζεται συντήρηση.

Ο σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων ελέγχου αποτελεί πρόκληση καθώς πρέπει να αντισταθμίσει την εγγενή αδράνεια του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και

παράλληλα να αποφύγει την αποσταθεροποίηση οποιωνδήποτε ευέλικτων λειτουργιών μπορεί να παρουσιάσει ο ρότορας, κυρίως σε υψηλές ταχύτητες.

Επίσης απαιτεί μια μικρή υπολογιστική ισχύ και παρέχει καλή ανθεκτικότητα και σταθερότητα, λαμβάνοντας υπόψη ότι το σημείο λειτουργίας βρίσκεται μέσα σε ένα γραμμικό εύρος λειτουργίας του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Η αναλογική – ολοκληρωτική - διαφορική μέθοδος ελέγχου (PID) χρησιμοποιούνταν ήδη από τον πρώτο καιρό των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων [37-39].

Η διαδικασία ελέγχου PID που συνδέεται με το σχεδιασμό αποκεντρωμένων ελεγκτών, είναι ικανό να ελέγχει συστήματα ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων με παράθεση της δύναμης και ανιχνευόμενη κατεύθυνση της κίνησης του ρότορα στην περιοχή του αισθητήρα θέσης, παρέχοντας ευστάθεια με τον διακριτό έλεγχο του χρόνου.

Επίσης, από την ανάλυση της βιβλιογραφίας, τις πηγές που περιγράφουν τις ποικίλες μεθόδους ελέγχου της ηλεκτρομαγνητικής ανύψωσης του περιστρεφόμενου ρότορα από την κατηγορία των γραμμικών ρυθμιστών, των βέλτιστων ρυθμιστών και των ρυθμιστών με robust νόμο ελέγχου [40, 41] μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι οι τυποποιημένοι ρυθμιστές PID σχετίζονται αρκετά με τον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου της ηλεκτρομαγνητικής αιώρησης.

Ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [42] παρουσίασαν το μοντέλο του συστήματος ελέγχου ενός ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου - σε ό,τι αφορά τους αισθητήρες - και περιγράφουν λεπτομερώς τους ενισχυτές ρεύματος και τις κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού του. Ως πρώτο βήμα εισάγεται η μη-γραμμική εξίσωση της κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, στις X και Y-διευθύνσεις. Στη συνέχεια, γίνεται η γραμμικοποίηση της συγκεκριμένης εξίσωσης σε ένα συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας και παρουσιάζονται στη συνέχεια και τα κατάλληλα κέρδη PID. Συνεπώς, η γραμμική εξίσωση μετατρέπεται μέσω του μετασχηματισμού Laplace και έτσι αναπτύσσεται το μοντέλο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Συντελεστές ελαστικότητας – απόσβεσης, ευστάθεια και δυναμική συμπεριφορά ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων

Τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα παρέχουν ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις για την διατήρηση ενός μικρού διακένου, μεταξύ του ρότορα και του εδράνου. Χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για την ανέπαφη ανύψωση του ρότορα σε μηχανές που περιστρέφονται με υψηλές ταχύτητες. Σε αυτές τις μηχανές, οι άξονες συμμετρίας του στάτη και του ρότορα, πρέπει φυσικά να είναι ευθυγραμμισμένοι. Για την αποφυγή ορισμένων αποκλίσεων, ο ρότορας ελέγχεται από μία ηλεκτρονική συσκευή (ελεγκτής), η οποία ενσωματώνει πολλά προηγμένα χαρακτηριστικά του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, όπως τον έλεγχο των διαταραχών. Ένας μεγάλος αριθμός ερευνών στο θέμα αυτό είναι διαθέσιμος στη βιβλιογραφία, δίνοντας έτσι ένα δείγμα του ενδιαφέροντος της ακαδημαϊκής και ιδιαίτερα της βιομηχανικής κοινότητας [43-46].

Οι Lei και Palazzolo [47] παρουσίασαν μια ανάλυση της δυναμικής του ρότορα,

ενός μεγάλου εύκαμπτου ρότορα ο οποίος στηρίζεται σε ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα. Μελετήθηκε ένα σύστημα σφονδύλου ως παράδειγμα για την κατασκευή ενός φυσικού ελεγκτή που παρέχει σταθερή αιώρηση του ρότορα και καλή εξάλειψη των διαταραχών σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας.

Ο Zhong και οι υπόλοιποι συγγραφείς [48] παρουσίασαν το δυναμικό μοντέλο ενός de Laval ρότορα με ρωγμή, με ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο. Επιπλέον, εξέτασαν την επίδραση του αλγορίθμου ελέγχου και των παραμέτρων του ελεγκτή του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, στη δυναμική συμπεριφορά του ρότορα με ρωγμή και την επίδραση της ρωγμής στην ευστάθεια του συστήματος και απέδειξαν ότι οι δυναμικές συμπεριφορές του ρότορα με ρωγμή με ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο είναι προφανώς περισσότερο πολύπλοκες από εκείνες του τυπικού συστήματος ρότορα με ρωγμή. Η διάγνωση της ρωγμής του ρότορα με τα παραδοσιακά χρησιμοποιούμενα χαρακτηριστικά είναι πιο χρήσιμη, όταν χρησιμοποιείται ελεγκτής PID.

1.2.4 Υβριδικά έδρανα

Σχεδιασμός υβριδικών εδράνων

Όποιο και να είναι το είδος του εδράνου το οποίο υποστηρίζει περιστρεφόμενο άξονα, πάντα θα έχει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με άλλα είδη εδράνων. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως θα μπορούσε να γίνει συνδυασμός εδράνων με τέτοιο τρόπο ώστε τα υβριδικά έδρανα που θα προκύψουν να μπορούν να έχουν τα πλεονεκτήματα του κάθε είδους από τα οποία αποτελούνται, και να μειώσουν τα μειονεκτήματά τους.

Μία κατηγορία υβριδικών εδράνων είναι αυτά που αποτελούνται από ένα υδροδυναμικό έδρανο που υποστηρίζεται και από ένα ηλεκτρομαγνητικό ενεργοποιητή ή μόνιμους μαγνήτες. Σε μια σειρά εργασιών [49-53] έχουν παρουσιαστεί διάφοροι σχηματισμοί για τους ηλεκτρομαγνήτες και το σύστημα ελέγχου, που εστιάζουν περισσότερο στον έλεγχο των διαταραχών των περιστρεφόμενων αξόνων υψηλής ταχύτητας.

Η προσομοίωση με τη βοήθεια υπολογιστή, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό είτε των υβριδικών εδράνων [54, 55] είτε των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων [56-61].

Ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [62] παρουσίασαν την έννοια και το βασικό σχεδιασμό ενός νέου τύπου εδράνου που καλείται ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο. Επιπλέον, οι συγγραφείς παρουσίασαν και τα δυναμικά του χαρακτηριστικά [63].

Διαφορετικές γεωμετρίες παθητικών μαγνητικών εδράνων παρουσιάζονται στο [64]. Περιγράφονται λεπτομερώς οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται από διαφορετικούς δημιουργούς για να υπερβούν τους περιορισμούς ενός παθητικού μαγνητικού εδράνου, όπως η χαμηλή απόσβεση, η χαμηλή δυσκαμψία καθώς και η εγγενής του αστάθεια. Για την υπέρβαση των εν λόγω περιορισμών, περιγράφονται διαφορετικές τεχνικές υβριδοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν από διαφορετικούς ερευνητές. Τέλος, περιγράφεται και μία νέα γεωμετρία υβριδικού εδράνου ολίσθησης

που δημιουργήθηκε από τους συγγραφείς.

Σύμφωνα με τον Bassani [65] τα παθητικά μαγνητικά έδρανα και τα συστήματά τους μελετήθηκαν σε σχέση με την αστάθειά τους, η οποία μειώνει τη χρήση τους σε τεχνικές εφαρμογές, όπου η απουσία της τριβής και της φθοράς στα οποία οδηγεί ο μαγνητισμός, θα ήταν πολύ σημαντική.

Ο Papadopoulos και οι υπόλοιποι [66] παρουσίασαν μια ευρεσιτεχνία σχετικά με ένα ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο. Η ευρεσιτεχνία αφορούσε ένα υβριδικό έδρανο ολίσθησης ικανό να λειτουργεί ως υδροδυναμικό, ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό ή ως υβριδικό.

Ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [62] παρουσίασαν μια νέα ιδέα που συνδυάζει τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα και τα υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης. Αυτή η καινοτόμα ιδέα βασίζεται στην αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει κάθε τύπος εδράνου. Το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο που προτείνεται εδώ μπορεί να λειτουργεί ως υδροδυναμικό, ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό ή ως υβριδικό έδρανο ολίσθησης, ανάλογα με τις ανάγκες της μηχανής, βελτιστοποιώντας τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ρότορα-εδράνων. Επιπλέον, όταν το υδροδυναμικό έδρανο είναι ενεργό, το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σταθεροποιήσει τη λειτουργία του ρότορα, να αυξήσει την ικανότητα παραλαβής φορτίου και επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εξωτερικός παραμετρικός διεγέρτης για την ανίχνευση βλαβών.

Επίσης, ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [67] παρουσίασαν μια αναλυτική μελέτη υπολογισμού των δυνάμεων του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και των δυνάμεων του υδροδυναμικού πεδίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Στόχος τους ήταν να προτείνουν ένα νέο είδος εδράνου το οποίο θα είναι σε θέση να υπερβεί τους περισσότερους από τους περιορισμούς σχετικά με τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά και τα υδροδυναμικά έδρανα. Στην εργασία τους, πρώτα παρουσιάστηκε ο ορισμός του προβλήματος και η βασική γεωμετρία των υδροδυναμικών και των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων και έπειτα ακολουθήθηκε μια λεπτομερή περιγραφή του νέου προτεινόμενου υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Έλεγχος υβριδικών εδράνων

Ένα υβριδικό έδρανο ολίσθησης που ελέγχεται με ελεγκτή PID παρουσιάζεται από τον Zhang P. και τους υπόλοιπους συγγραφείς [68]. Οι συγγραφείς πρότειναν μια έρευνα σχετικά με την παράμετρο ασαφούς αυτοσυντονισμού του αλγορίθμου ελέγχου PID για υβριδικά μαγνητικά έδρανα και σχεδίασαν ένα ψηφιακό σύστημα ελέγχου των υβριδικών μαγνητικών εδράνων, με βάση την παράμετρο ασαφούς αυτοσυντονισμού PID και τον επεξεργαστή ψηφιακού σήματος TMS320F2812.

Ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι [69] παρουσίασαν ένα σύστημα ελέγχου PID σε ένα μη-γραμμικό μοντέλο ενός υβριδικού εδράνου ολίσθησης, το οποίο αποτελείται από υδροδυναμικό και ένα ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα. Αρχικά, εισάγονται και γραμμικοποιούνται οι μη-γραμμικές ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις της κίνησης του ρότορα, στις X και Y-διευθύνσεις, οι οποίες στη συνέχεια μετατρέπονται

μέσω του μετασχηματισμού Laplace. Επίσης έλαβαν υπόψη την αζυγοσταθμία και το γυροσκοπικό φαινόμενο του ρότορα καθώς και τις υδροδυναμικές δυνάμεις, για την παραγωγή των τελικών εξισώσεων της κίνησης του ρότορα εντός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα των πηνίων λαμβάνεται επίσης υπόψη και η απόκριση του ρότορα, η υπερακόντισή του και οι διαταραχές του ρότορα ελέγχονται από τον ελεγκτή και τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται λεπτομερώς.

Συντελεστές ελαστικότητας – απόσβεσης, ευστάθεια και δυναμική συμπεριφορά υβριδικών εδράνων

Πρόσφατα, ο El-Shafei και οι υπόλοιποι συγγραφείς [70] παρουσίασαν μια καινοτόμα προσέγγιση ενός συνδυασμού ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και ενός εδράνου ολίσθησης για τον έλεγχο της αστάθειας του ρότορα.

Ταυτοχρόνως, οι κύριες λειτουργίες του υβριδικού εδράνου ολίσθησης τις οποίες παρουσίασαν ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [1] είναι η αύξηση της ικανότητας παραλαβής φορτίου, ο επιμερισμός του ίδιου φορτίου και στα δύο πεδία του εδράνου κατά την μετάβαση από την μία λειτουργία στην άλλη και η πρόληψη της αστάθειας (στροβιλισμός λιπαντικού - oil whirl/whip), ο έλεγχος των διαταραχών καθώς και διαγνωστικές λειτουργίες.

Ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [63] υπολόγισαν τους συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης για ένα υδροδυναμικό, ενεργό ηλεκτρομαγνητικό και υδρομαγνητικό έδρανο. Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Ansys multiphysics, για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για το υδροδυναμικό πεδίο και τις εξισώσεις Maxwell όσον αφορά το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα χαρακτηριστικά ελαστικότητας και απόσβεσης του υδροδυναμικού και του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου υπολογίζονται αρχικά και στη συνέχεια υπολογίζονται με επαλληλία οι αντίστοιχες ιδιότητες που αφορούν το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο.

Ο Farmakopoulos και οι υπόλοιποι συγγραφείς [67] παρουσίασαν μια συστηματική μεθοδολογία για τον υπολογισμό των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης, στην περίπτωση των υδρομαγνητικών εδράνων. Κάθε υβριδικός συντελεστής αποτελείται από δύο μέρη: το υδροδυναμικό και το ηλεκτρομαγνητικό. Όταν η λειτουργία είναι καθαρά υδροδυναμική, το ηλεκτρομαγνητικό μέρος των δυναμικών συντελεστών ισούται με μηδέν και αντιστρόφως, ενώ και τα δύο μέρη υπάρχουν στην υβριδική λειτουργία.

Ο Allaire και οι υπόλοιποι συγγραφείς [71] μελέτησαν τη δυναμική ενός εύκαμπτου ρότορα που στηρίζεται σε ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα και συνέκριναν την διαδικασία αυτή με μια παρόμοια διαδικασία για υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι τα πρότυπα προδιαγραφών των διαταραχών είναι ικανοποιητικά για βιομηχανικά συστήματα ρότορα-υδροδυναμικά έδρανα. Στην εργασία τους, οι συγγραφείς πραγματεύονται συγκριτικές μελέτες περιστρεφόμενων αξόνων σε ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα και υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης συμπεριλαμβανομένων κρίσιμων ταχυτήτων, τιμών ελαστικότητας και απόσβεσης για ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα και υδροδυναμικά έδρανα

ολίσθησης.

Ο Mendes και οι υπόλοιποι συγγραφείς [72] παρουσίασαν την ανάπτυξη ενός ελεγκτή για τη μείωση των διαταραχών ή ακόμη και για τον έλεγχο των ασταθειών του ρότορα σε υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης. Παρουσίασαν τη μελέτη και μοντελοποίηση ενός ηλεκτρομαγνητικού ενεργοποιητή, που χρησιμοποιείται ως εξωτερική πηγή διέγερσης για ένα περιστρεφόμενο σύστημα. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο μοντέλο ενεργοποιητή και στην αλληλεπίδρασή του με το σύστημα του ρότορα. Ο έλεγχος της εξωτερικής δύναμης διέγερσης βασίζεται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που υπολογίζεται απευθείας από αισθητήρα Hall, ο οποίος τοποθετείται στο κέντρο του πόλου του πυρήνα του ηλεκτρομαγνητικού ενεργοποιητή.

I.3 Η τρέχουσα μελέτη, πρωτότυπα - καινοτόμα θέματα

I.3.1 Παραδοχές και μεθοδολογία

Σε αυτή την εργασία γίνονται κάποιες παραδοχές, μερικές από τις οποίες βασίζονται σε προηγούμενες έρευνες και εργασίες και κάποιες άλλες αναφέρονται στη συγκεκριμένη εργασία για πρώτη φορά, καθώς το συγκεκριμένο υβριδικό έδρανο ολίσθησης δεν προϋπήρχε.

Μία παραδοχή είναι ο τρόπος μοντελοποίησης του ρότορα, το γεγονός δηλαδή ότι σε κάποια σημεία της εργασίας ο ρότορας θεωρείται άκαμπος κατά το μήκος του και απαραμόρφωτος κατά την περιφέρειά του.

Επίσης, μία άλλη παραδοχή γίνεται στη μοντελοποίηση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων ολίσθησης. Συγκεκριμένα, γίνεται η παραδοχή ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές δε βγαίνουν έξω από την περιφέρεια των εδράνων αυτών, αλλά περιορίζονται μόνο στο εσωτερικό τους.

Όλες οι παραδοχές αναφέρονται στα επιμέρους τμήματα της εργασίας αυτής, αναλυτικά.

Τα κυριότερα τμήματα αυτής της εργασίας είναι:

- 1) Ο προγραμματισμός στο ANSYS,
 - α) για την προσομοίωση της λειτουργίας του υδροδυναμικού εδράνου,
 - β) για την προσομοίωση της λειτουργίας του ηλεκτρομαγνητικού εδράνου,
 - γ) για την προσομοίωση της λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.
- 2) Ο σχεδιασμός στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA ενός εικονικού μοντέλου.
- 3) Η κατασκευή του εικονικού μοντέλου του εδράνου.
- 4) Ο σχεδιασμός στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA των παρακάτω τμημάτων:
 - α) της μηχανής GE Bently Nevada RK4 Rotor Kit,
 - β) του υβριδικού εδράνου ολίσθησης,
 - γ) του ρότορα ο οποίος θα περιστρέφεται μέσα στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης,
 - δ) της βάσης στήριξης των αισθητήρων,καθώς και η συναρμολόγηση των παραπάνω.

- 5) Η κατασκευή:
 - α) του υβριδικού εδράνου ολίσθησης,
 - β) του ρότορα που θα περιστρέφεται μέσα στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης,
 - γ) της βάσης στήριξης των αισθητήρων,και η προσαρμογή τους στην μηχανή Bently Nevada Rotor Kit 4.
- 6) Ο προγραμματισμός του ελέγχου του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και του υβριδικού εδράνου ολίσθησης στο Matlab και στο Simulink του Matlab, με σκοπό:
 - α) την εύρεση του σημείου ισορροπίας του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης, για διάφορες συνθήκες λειτουργίας,
 - β) την εξομοίωση της λειτουργίας του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου,
 - γ) την εξομοίωση της λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.
- 7) Η κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, σύμφωνα με το σχεδιασμό που προηγήθηκε.

Ο τρόπος αντιμετώπισης των παραπάνω, παρουσιάζεται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια. Στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη περιγραφή των περιεχομένων των επόμενων κεφαλαίων.

Κεφάλαιο 1

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η ανάλυση των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης. Γίνεται ανάλυση των εξισώσεων που αφορούν την ισορροπία του άξονα μέσα στο έδρανο. Επίσης, γίνεται εκτενής αναφορά στη σημασία, στον τρόπο υπολογισμού και στον υπολογισμό των συντελεστών ελαστικότητας, απόσβεσης και τριβής.

Τέλος, πραγματοποιείται μοντελοποίηση των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης στο πρόγραμμα Ansys, με παραμετρικό τρόπο, προκειμένου να είναι δυνατή η εισαγωγή των διάφορων παραμέτρων, όπως είναι οι διαστάσεις των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορά τους, το ιξώδες του λιπαντικού, το επιθυμητό φορτίο και άλλα και μετά την επίλυση γίνεται εξαγωγή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων, όπως για παράδειγμα οι συντεταγμένες του σημείου ισορροπίας του άξονα, οι συντελεστές ελαστικότητας, απόσβεσης, τριβής και άλλα. Η μοντελοποίηση των υδροδυναμικών εδράνων στο Ansys αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο αντίστοιχο έτοιμο module.

Κεφάλαιο 2

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την ανάλυση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων. Στην αρχή του κεφαλαίου αυτού παραθέτονται οι μη-γραμμικές εξισώσεις που δίνουν την ηλεκτρομαγνητική δύναμη που ασκείται στον άξονα εσωτερικά του συγκεκριμένου εδράνου, καθώς και η γραμμικοποίηση αυτών των μη-γραμμικών εξισώσεων.

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή στον τρόπο υπολογισμού και στον

υπολογισμό των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Τέλος, πραγματοποιείται μοντελοποίηση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο πρόγραμμα Ansys, με παραμετρικό τρόπο, με σκοπό να είναι δυνατή η εισαγωγή των παραμέτρων των εδράνων αυτών, όπως είναι οι διαστάσεις τους, το σταθερό ρεύμα που διαρρέει τα πηνία, το επιθυμητό φορτίο, η επιθυμητή θέση ισορροπίας και άλλα, και μετά την επίλυση να γίνεται εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων, όπως είναι το ρεύμα ελέγχου για τις X και Y-διευθύνσεις ώστε να ισορροπεί ο άξονας στο επιθυμητό σημείο, οι διάφοροι συντελεστές και άλλα. Η μοντελοποίηση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο Ansys αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο αντίστοιχο έτοιμο module.

Κεφάλαιο 3

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Αρχικά, γίνεται σύνδεση του προγράμματος Matlab με το Ansys, ώστε μετά την επίλυση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο Ansys να εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα στο Matlab, όπως για παράδειγμα η γεωμετρία του εδράνου και του ρότορα, το σημείο ισορροπίας του ρότορα και άλλα.

Μέσω του Matlab ενεργοποιείται το Simulink module του Matlab, στο οποίο σχεδιάζεται PID ελεγκτής και γίνεται επίλυση του ελέγχου του ρότορα μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου διαχειρίζεται το Matlab, το οποίο εξάγει τα αποτελέσματα αυτά σε αρχεία Excel. Τα αποτελέσματα αυτά είναι το σημείο ισορροπίας του άξονα συναρτήσεως του χρόνου, το ρεύμα ελέγχου στις X και Y-διευθύνσεις συναρτήσεως του χρόνου, οι ταχύτητες στις X και Y-διευθύνσεις συναρτήσεως του χρόνου και άλλα.

Η μοντελοποίηση του ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο Matlab, με σύνδεση με το Ansys και το Simulink module του Matlab αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει έλεγχο ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Κεφάλαιο 4

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η ανάλυση υβριδικών εδράνων ολίσθησης (υδροδυναμικών και ενεργών ηλεκτρομαγνητικών).

Το κεφάλαιο αυτό στο σύνολό του αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου νέου υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Αναλύονται όλοι οι γεωμετρικοί περιορισμοί, οι περιορισμοί ως προς τα υλικά από τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν τα διάφορα τμήματα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης κλπ.

Επίσης, γίνεται η μοντελοποίηση του υβριδικού εδράνου ολίσθησης με προγραμματισμό στο Ansys, ώστε να έχουμε αποτελέσματα ανάλυσης υδροδυναμικού και ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ταυτόχρονα. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το υβριδικό έδρανο ολίσθησης είναι λειτουργικό.

Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, από τα αποτελέσματα των οποίων προκύπτει η βελτιωμένη λειτουργία του υβριδικού εδράνου ολίσθησης (ως υδροδυναμικό και ενεργό ηλεκτρομαγνητικό ταυτόχρονα), σε σχέση με κάθε ένα ξεχωριστά.

Κεφάλαιο 5

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου των υβριδικών εδράνων ολίσθησης. Το κεφάλαιο αυτό, αποτελεί μία επέκταση του τρίτου κεφαλαίου, στο οποίο πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Αρχικά, στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η σύνδεση του προγράμματος Matlab με το Ansys, ώστε μετά την επίλυση των υδροδυναμικών και των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο Ansys να εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα στο Matlab, όπως για παράδειγμα η γεωμετρία του υβριδικού εδράνου ολίσθησης και του ρότορα, το σημείο ισορροπίας του ρότορα και άλλα.

Μέσω του Matlab ενεργοποιείται το Simulink module του Matlab, στο οποίο σχεδιάζεται PID ελεγκτής και γίνεται επίλυση του ελέγχου του άξονα μέσα στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου διαχειρίζεται το Matlab, το οποίο εξάγει τα αποτελέσματα αυτά σε αρχεία Excel. Τα αποτελέσματα αυτά είναι το σημείο ισορροπίας του ρότορα συναρτήσει του χρόνου, το ρεύμα ελέγχου στις X και Y-διευθύνσεις συναρτήσει του χρόνου, οι ταχύτητες στις X και Y-διευθύνσεις συναρτήσει του χρόνου και άλλα.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το υβριδικό έδρανο ολίσθησης έχει βελτιωμένες ιδιότητες και προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και ασφάλεια στις κατασκευές που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενους άξονες, σε σχέση με τα υδροδυναμικά ή τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα.

Η μοντελοποίηση του ελέγχου των υβριδικών εδράνων στο Matlab, με σύνδεση με το Ansys και το Simulink module του Matlab αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει έλεγχο του συγκεκριμένου υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Κεφάλαιο 6

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση συστήματος ρότορα-εδράνων. Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύονται οι εξισώσεις εύκαμπτου ρότορα, ο οποίος στηρίζεται σε δύο έδρανα και έχει και έναν ή τρεις δίσκους (de Laval ή Kikuchi ρότορες).

Πραγματοποιείται ανάλυση στην περίπτωση που τα έδρανα είναι υδροδυναμικά, ενεργά ηλεκτρομαγνητικά και υβριδικά (υδροδυναμικά και ενεργά ηλεκτρομαγνητικά).

Η ανάλυση γίνεται στο πρόγραμμα Matlab, το οποίο αρχικά ενεργοποιεί το Ansys, ώστε να γίνει επίλυση του υδροδυναμικού και του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και να προκύψουν οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης.

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα Matlab επιλύει τη δυναμική του ρότορα στην περίπτωση που τα έδρανα είναι υδροδυναμικά ή ενεργοποιεί το Simulink module του Matlab, στο οποίο γίνεται η προσομοίωση του ελέγχου, για την περίπτωση που τα έδρανα είναι ενεργά ηλεκτρομαγνητικά ή υβριδικά.

Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι οι αποκρίσεις του ρότορα στην X και Y-διεύθυνση είναι μικρότερες όταν τα έδρανα είναι ηλεκτρομαγνητικά, σε σχέση με τα υδροδυναμικά, καθώς ο έλεγχος περιορίζει το εύρος της τροχιάς του ρότορα στα σημεία των εδράνων και επίσης, οι αποκρίσεις του ρότορα είναι ακόμα μικρότερες όταν τα έδρανα είναι υβριδικά, διότι και το λιπαντικό αλλά και ο έλεγχος του ρότορα μέσω των ηλεκτρομαγνητών συμβάλλουν ταυτόχρονα στη διατήρηση της επιθυμητής θέσης ισορροπίας του ρότορα.

Τέλος, παρατηρούμε ότι οι κρίσιμες ταχύτητες του συστήματος ρότορα-εδράνων είναι διαφορετικές στην περίπτωση που τα υβριδικά έδρανα λειτουργούν μόνο ως υδροδυναμικά, σε σχέση με την περίπτωση που τα έδρανα λειτουργούν μόνο ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά και σε σχέση με την περίπτωση που τα έδρανα λειτουργούν ως υβριδικά. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα εάν μεταβάλλουμε τη λειτουργία του υβριδικού εδράνου ολίσθησης επιλέγοντας ανάμεσα σε υδροδυναμική λειτουργία, ενεργή ηλεκτρομαγνητική λειτουργία ή υβριδική λειτουργία, να περνάμε από τις κρίσιμες ταχύτητες των συστημάτων ρότορα-εδράνων, με όσο το δυνατόν μικρότερες αποκρίσεις του ρότορα, καθώς όταν περνάμε από κάθε κρίσιμη ταχύτητα, θα μεταβάλλουμε τη λειτουργία των εδράνων των συστημάτων αυτών, επιλέγοντας ανάμεσα σε υδροδυναμική λειτουργία, ενεργή ηλεκτρομαγνητική ή υβριδική, με αποτέλεσμα να μην είναι κρίσιμες οι ταχύτητες αυτές για τους συγκεκριμένους τύπους εδράνων κάθε φορά.

Η προσομοίωση της δυναμικής αξόνων για την περίπτωση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων ή των υβριδικών εδράνων αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να προσομοιώνει κάτι αντίστοιχο. Επίσης, η δυνατότητα μεταβολής της λειτουργίας των υβριδικών εδράνων, επιλέγοντας ανάμεσα σε υδροδυναμική, ενεργή ηλεκτρομαγνητική ή υβριδική λειτουργία με σκοπό την αποφυγή των κρίσιμων ταχυτήτων των συστημάτων ρότορα-εδράνων, αποτελεί πρωτοτυπία.

Κεφάλαιο 7

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει την κατασκευή ενός εικονικού μοντέλου καθώς και του πραγματικού υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Στην αρχή του κεφαλαίου αυτού, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός εικονικού μοντέλου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Ο κυριότερος σκοπός του σχεδιασμού και της κατασκευής του εικονικού μοντέλου είναι να εμφανιστούν και να διορθωθούν πιθανά λάθη ή ατέλειες στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός της μηχανής Bently Nevada RK4, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA. Αυτό γίνεται με σκοπό να σχεδιαστεί στη συνέχεια το υβριδικό έδρανο με κατάλληλη γεωμετρία, ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί στη συγκεκριμένη μηχανή. Έτσι, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η

κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, του ρότορα και της βάσης στήριξης των αισθητήρων και η τοποθέτησή τους στη μηχανή Bently Nevada RK4.

1.3.2 Εφαρμογές του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Ο συγκεκριμένος νέος τύπος υβριδικού εδράνου ολίσθησης μπορεί να εφαρμοστεί σε εργαστηριακό επίπεδο αλλά και σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι στροβιλομηχανές κενού και παραγωγής ενέργειας, αεροσυμπιεστές φυσικού αερίου, μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ή εφαρμογές αεροναυπηγικής, όπου υπάρχει η απαίτηση για λειτουργία των μηχανών επί μακρό χρόνο σε υψηλές στροφές (> 20.000 rpm), και σε χαμηλές στροφές όταν είναι σε κατάσταση αναμονής, καθώς επίσης και σε αξονικά συστήματα πλοίων. Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής είναι οι περιπτώσεις προσγείωσης των αεροσκαφών, όπου παρατηρείται απότομη μεταβολή του φορτίου. Στην περίπτωση της προσγείωσης, όπως επίσης και σε περιπτώσεις ελιγμών του αεροσκάφους σε υψηλά g_a (g_a = επιτάχυνση της βαρύτητας) ή σε περίπτωση απώλειας πτερυγίου από τον κινητήρα του αεροσκάφους, υπάρχει πάντα το ερώτημα σχετικά με την καλή λειτουργία και προσαρμογή στις συνθήκες των συμβατικών εδράνων. Έτσι για παράδειγμα στην περίπτωση της ξαφνικής απώλειας πτερυγίου ή πτερυγίων από τον κινητήρα, η υβριδική λειτουργία του προτεινόμενου εδράνου είναι η καταλληλότερη για τον έλεγχο των αυξημένων ταλαντώσεων που θα προκληθούν, καθώς και την επαναφορά της ευστάθειας με ευεργετικές επιδράσεις στην ασφάλεια των επιβατών και του αεροσκάφους.

Με το υβριδικό έδρανο ολίσθησης της παρούσας εργασίας αξιοποιούμε πλήρως το σύστημα ρότορα-εδράνων ενεργειακά, ώστε να μην υπάρχουν τριβές ή εκπομπές καυσαερίων, ή φθορές σε πολύ υψηλές στροφές και θερμοκρασίες, καθώς επίσης και τον πλήρη έλεγχο των ταλαντώσεων του άξονα, ενώ σε χαμηλές στροφές ή σε κατάσταση αναμονής, με την λειτουργία του υδροδυναμικού εδράνου επιτυγχάνουμε την ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Το υβριδικό έδρανο ολίσθησης μπορεί να λειτουργήσει επίσης και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (> 200 °C), όπου η λειτουργία των υδροδυναμικών εδράνων δεν είναι δυνατή ή επιθυμητή, διότι τα λιπαντικά δεν αντέχουν σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες. Η εναλλαγή αυτή των καταστάσεων λειτουργίας προσδίδει αξιοπιστία και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο έδρανο και στη μηχανή γενικότερα.

Η δυνατότητα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης να λειτουργεί σε υψηλές στροφές και σε υψηλές θερμοκρασίες τόσο στην ηλεκτρομαγνητική όσο και στην υδροδυναμική του λειτουργία, χωρίς καθόλου τριβές ή με πολύ μικρές τριβές, με ή χωρίς λιπαντικό, με πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας, με πολύ χαμηλού επιπέδου ταλαντώσεις και έλεγχο της κίνησης του ρότορα, με αξιοπιστία και ενσωματωμένες διαγνωστικές δυνατότητες, το καθιστά περιβαλλοντικά συμβατό, με σημαντική προσφορά στην Εθνική και κατ' επέκταση στην Ευρωπαϊκή και παγκόσμια οικονομία.

Η εφαρμογή του συγκεκριμένου υβριδικού εδράνου ολίσθησης στη βιομηχανία (σε εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής), στην ναυτιλία (ως έδρανα ναυτικών κινητήρων), στην αεροναυπηγική (ως έδρανα αεριοτουρμπινών αεροσκαφών),

συμβάλλει στους σύγχρονους περιβαλλοντικούς στόχους της ευρύτερης σύγχρονης κοινωνίας και υπό το πρίσμα αυτό συμβάλλει και στις ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας και συνεπώς και της Ελληνικής, τοπικής ή μη, βιομηχανίας.

I.3.3 Συνεισφορά

Η καινοτομία και η συνεισφορά αυτής της διδακτορικής διατριβής στο συγκεκριμένο πεδίο των εδράνων, μπορεί εν συντομία να παρουσιαστεί ως εξής:

Ο σχεδιασμός του ενεργού υβριδικού εδράνου ολίσθησης. **Paper 1** [67] και **Paper 2** [62].

Ο ρόλος των ενεργών υβριδικών εδράνων ολίσθησης στην ασφάλεια των κατασκευών που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενους άξονες. **Paper 3** [63].

Ο ρόλος των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο σύστημα κίνησης των πλοίων. **Παρουσίαση 1** [73].

Ο σχεδιασμός PID ελεγκτή για τον έλεγχο των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων. **Paper 4** [42].

Η μοντελοποίηση και ο έλεγχος ηλεκτρομαγνητικού συστήματος αιώρησης του ρότορα στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης. **Paper 5** [34].

Ο σχεδιασμός γραμμικοποιημένου PID ελεγκτή για τον έλεγχο μη-γραμμικού μοντέλου του ενεργού υβριδικού εδράνου ολίσθησης. **Paper 6** [69].

Τέλος, στο πεδίο των εδράνων γενικότερα η καινοτομία και η συνεισφορά αυτής της διδακτορικής διατριβής, μπορεί εν συντομία να παρουσιαστεί ως εξής:

Η μοντελοποίηση ενός εδράνου ολίσθησης μη-κυκλικής εσωτερικής επιφάνειας. **Paper 7** [15].

Η μελέτη της τροποποίησης των δυναμικών συντελεστών μικρού μήκους εδράνου ολίσθησης λόγω της φθοράς. **Paper 8** [2].

Η τροποποίηση των δυναμικών συντελεστών μικρού μήκους εδράνου ολίσθησης λόγω της φθοράς του εδράνου. **Paper 9** [3].

Η παρουσίαση του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου στην 1^η έκθεση μεταφοράς τεχνογνωσίας 2012 [74].

Επίσης, το υβριδικό έδρανο ολίσθησης κατοχυρώθηκε από τον Οργανισμό Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας (Ο.Β.Ι.) με Ελληνικό **Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας** με τίτλο «**Υβριδικό Έδρανο Ολίσθησης**» [75], καθώς επίσης και με Ευρωπαϊκό [76] και Διεθνές [66, 77].

Κεφάλαιο 1

CFD Σχεδιασμός και Ανάλυση Εδράνων Ολίσθησης (Ansys)

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναφερθούμε στα υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης. Στα υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η φθορά μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του εδράνου και της εξωτερικής επιφάνειας του ρότορα, ανάμεσα σε αυτές τις δύο επιφάνειες υπάρχει λιπαντικό. Η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου του εδράνου είναι λίγα δέκατα, εκατοστά ή χιλιοστά του χιλιοστού μεγαλύτερη από τη διάμετρο του ρότορα, με σκοπό να δημιουργείται film λιπαντικού και να είναι αποτελεσματικό το υδροδυναμικό πεδίο και οι πιέσεις που ασκεί.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει ανάλυση της γεωμετρίας των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης, ανάλυση των εξισώσεων Navier-Stokes που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του υδροδυναμικού πεδίου, ανάλυση των εξισώσεων που δείχνουν την ισορροπία του ρότορα μέσα στο υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης, ανάλυση των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης του ρότορα μέσα στο έδρανο αυτό και ανάλυση του τρόπου μοντελοποίησης και προσομοίωσης της λειτουργίας των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης στο πρόγραμμα Ansys καθώς και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αυτής και σύγκρισής τους με προηγούμενες εργασίες. Ο σχεδιασμός των εδράνων αυτών γίνεται με παραμετρικό τρόπο, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα τροποποίησης των χαρακτηριστικών τους. Ο σχεδιασμός των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης στο πρόγραμμα Ansys αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης.

Γεωμετρία υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης

Η γεωμετρία του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης φαίνεται στην εικόνα 1, όπου O_b είναι το κέντρο του εδράνου, O_j είναι το κέντρο του ρότορα, R_b είναι η ακτίνα του εδράνου, R_j είναι η ακτίνα του ρότορα, e είναι η εκκεντρότητα του εδράνου και L είναι το μήκος του εδράνου. Ο λόγος εκκεντρότητας ε , ορίζεται ως ο λόγος της εκκεντρότητας e , προς την ακτινική χάρη c :

$$\varepsilon = \frac{e}{c} \quad (1)$$

Το πάχος του λιπαντικού εξαρτάται από τη γωνία θ και το μήκος z στο οποίο θέλουμε να βρούμε το πάχος. Δηλαδή, είναι:

$$h(\theta, z) \quad (2)$$

και συγκεκριμένα, το πάχος του λιπαντικού h κατά την περιφέρεια του εδράνου δίνεται από την εξίσωση:

$$h_0 = c + e \cdot \cos \theta \quad (3)$$

Εικόνα 1. Γεωμετρία υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης

Σύμφωνα με τη θεωρία των υδροδυναμικών εδράνων [78], η αναλογία της ακτίνας του εδράνου προς την ακτινική χάρη πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των τιμών 500 και 1000.

$$500 \leq R_b/c \leq 1000 \quad (4)$$

Σημείο ισορροπίας υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης

Το υδροδυναμικό έδρανο κατά τη λειτουργία του οδηγεί τον ρότορα σε σημεία ισορροπίας. Τα σημεία ισορροπίας είναι εκείνα τα σημεία, στα οποία η συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ασκούνται στον άξονα, ισούται με μηδέν.

Ο αριθμός Sommerfeld ορίζεται ως εξής [79]:

$$S = \frac{\mu N_s}{P} \left(\frac{R_j}{c} \right)^2 \quad (5)$$

Η εξίσωση (5), λύνοντας ως προς το φορτίο γίνεται:

$$F = \frac{\mu N_s L D}{S} \left(\frac{R_j}{c} \right)^2 \quad (6)$$

Η εξίσωση (6), δίνει ως αποτέλεσμα τη δύναμη που ασκεί το λιπαντικό στον ρότορα στο σημείο ισορροπίας του ρότορα, έχοντας ως δεδομένα τον αριθμό Sommerfeld, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εδράνου και του ρότορα καθώς και τις συνθήκες λειτουργίας. Το σημείο ισορροπίας είναι εκείνο το σημείο, στο οποίο η δύναμη που ασκεί το λιπαντικό στον ρότορα ισούται με τη δύναμη που ασκεί ο ρότορας στο λιπαντικό.

Συντελεστές ελαστικότητας, συντελεστές απόσβεσης

Στο υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης, στην περίπτωση που ο άξονας συμμετρίας του εδράνου είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένος με τον άξονα συμμετρίας του ρότορα, εμφανίζονται μόνο υδροδυναμικές δυνάμεις οι οποίες είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων x , y και των ταχυτήτων $\dot{x}$, $\dot{y}$ του ρότορα, στις δύο κύριες διευθύνσεις.

$$F_{x \text{ ή } y} = F_{x \text{ ή } y}(x, y, \dot{x}, \dot{y}) \quad (7)$$

Θεωρώντας μικρές μετατοπίσεις και διαταραχές του ρότορα γύρω από το σημείο ισορροπίας του, οι παραπάνω εξισώσεις των δυνάμεων, με βάση την σειρά Taylor, αγνοώντας τους υψηλής τάξης όρους, γράφεται:

$$\begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{oX} \\ F_{oY} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{Xx}^{Y\Delta PO} & K_{Xy}^{Y\Delta PO} \\ K_{Yx}^{Y\Delta PO} & K_{Yy}^{Y\Delta PO} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{Xx}^{Y\Delta PO} & C_{Xy}^{Y\Delta PO} \\ C_{Yx}^{Y\Delta PO} & C_{Yy}^{Y\Delta PO} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \dot{x} \\ \delta \dot{y} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

όπου οι γραμμικοί συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης ορίζονται ως εξής:

$$K_{ij}^{Y\Delta PO} = \frac{\partial F_i}{\partial X_j} \quad \text{και} \quad C_{ij}^{Y\Delta PO} = \frac{\partial F_i}{\partial \dot{X}_j} \quad (9)$$

όπου $X = x, y$, $\dot{X} = \dot{x}, \dot{y}$ και i και j αναφέρονται στις διευθύνσεις X και Y .

Για να προκύψουν οι γραμμικοί συντελεστές ελαστικότητας, πραγματοποιείται μια μικρή μετατόπιση του ρότορα στην X -διεύθυνση και έπειτα στην Y -διεύθυνση και υπολογίζονται οι νέες δυνάμεις που ασκεί το υδροδυναμικό πεδίο στον ρότορα σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Η διαφορά των νέων δυνάμεων μείον τις δυνάμεις στο σημείο ισορροπίας, προς τη μετατόπιση x ή τη μετατόπιση y , δίνουν τους διάφορους συντελεστές ελαστικότητας των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης.

Για να προκύψουν οι γραμμικοί συντελεστές απόσβεσης, πραγματοποιείται μία μικρή μεταβολή στη γραμμική ταχύτητα του ρότορα στη διεύθυνση X και έπειτα στη διεύθυνση Y και υπολογίζονται οι νέες δυνάμεις που ασκεί το υδροδυναμικό πεδίο στον ρότορα σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Η διαφορά των νέων δυνάμεων μείον τις δυνάμεις χωρίς αυτές τις επιπλέον ταχύτητες, προς την επιπλέον ταχύτητα $\dot{x}$ και την επιπλέον ταχύτητα $\dot{y}$, δίνουν τους διάφορους συντελεστές απόσβεσης των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης.

Μοντελοποίηση του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης, με προγραμματισμό στο Ansys

Η λειτουργία του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ANSYS MULTIPHYSICS. Για την επίλυση του υδροδυναμικού πεδίου, το πρόγραμμα ANSYS λύνει τις εξισώσεις Navier-Stokes. Με αυτόν τον τρόπο, μέσω του Ansys γίνεται επίλυση του υδροδυναμικού πεδίου μέσα στο υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης με μη-γραμμικές εξισώσεις, ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας.

Προκειμένου να γίνει η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, κάνουμε τις παραδοχές ότι το ρευστό είναι ισόθερμο και η ελάχιστη τιμή της πίεσης του λιπαντικού είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση, με σκοπό να μην δημιουργείται σπηλαιώση. Η εξίσωση της διατήρησης της μάζας (10) και της διατήρησης της ορμής (11) για την ασυμπίεστη και ισόθερμη ροή είναι:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u} + \rho g_a + \vec{F} \quad (11)$$

Όπου p είναι η πίεση του ρευστού, t είναι ο χρόνος, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, $\bar{u}$ είναι το διάνυσμα της ταχύτητας, μ είναι το ιξώδες του ρευστού, ρg_a είναι οι βαρυτικές δυνάμεις και $\vec{F}$ είναι οι εξωτερικές δυνάμεις.

Το μοντέλο "half Sommerfeld" χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες της πίεσης. Οι εξισώσεις (10) και (11) επιλύονται με τον Computational Fluid Dynamics (CFD) κώδικα στο ANSYS MULTIPHYSICS.

Τα δεδομένα τα οποία εισάγουμε προκειμένου να γίνει η επίλυση του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης είναι η ακτίνα του άξονα σε μέτρα, η ακτινική χάρη, ο λόγος μήκους προς διάμετρο του εδράνου $\frac{L}{D}$, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα σε rps, η πυκνότητα του λιπαντικού σε Kg/m^3 , το ιξώδες του λιπαντικού σε $\text{pa} \times \text{sec}$, μία αρχική εκτίμηση για τον λόγο ε και μία αρχική εκτίμηση για τη γωνία φ του τελικού σημείου ισορροπίας του ρότορα μέσα στο υδροδυναμικό έδρανο, τα οποία θα χρησιμοποιήσει σαν αρχικές τιμές η μέθοδος Newton-Raphson 2 μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκλιση των λύσεων και τέλος εισάγουμε τον αριθμό των στοιχείων του πλέγματος.

Το στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Fluid 142 - 3-D, το οποίο έχει 8 κόμβους, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.

Εικόνα 2. Στοιχείο Fluid 142 – 3-D, για τη μοντελοποίηση του υδροδυναμικού πεδίου στο Ansys

Για την επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας του πλέγματος, πραγματοποιήθηκε έλεγχος 16 διαφορετικών περιπτώσεων. Ο αριθμός στοιχείων κατά την περιφέρεια του εδράνου ήταν 45, 90, 180 και 360. Ο αριθμός στοιχείων κατά το μήκος του εδράνου ήταν 6, 8, 10 και 12 και ο αριθμός στοιχείων κατά το πάχος του λιπαντικού ήταν 6, 8, 10 και 12. Η βέλτιστη επιλογή για την πυκνότητα του

πλέγματος, συνυπολογίζοντας το σφάλμα των αποτελεσμάτων και τον απαιτούμενο χρόνο των υπολογισμών, είναι 180 στοιχεία κατά την περιφέρεια, 10 στοιχεία κατά το μήκος του εδράνου και 10 στοιχεία κατά το πάχος του λιπαντικού. Το πλέγμα συνολικά φαίνεται στην εικόνα 3 και κατά το πάχος του λιπαντικού στην εικόνα 4.

Εικόνα 3. Πλέγμα της μοντελοποίησης του λιπαντικού υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης στο Ansys

Εικόνα 4. Πλέγμα της μοντελοποίησης του λιπαντικού υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης στο Ansys, μεγέθυνση κατά το πάχος του λιπαντικού

Μετά τη δημιουργία του πλέγματος ορίζουμε μηδενικές ταχύτητες στους κόμβους του εδράνου, ώστε να προσομοιωθεί το γεγονός ότι το έδρανο δεν περιστρέφεται. Αυτό φαίνεται στις εικόνες 5 και 6.

Εικόνα 5. Εφαρμογή μηδενικών ταχυτήτων στους κόμβους του εδράνου του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης στο Ansys

Εικόνα 6. Εφαρμογή μηδενικών ταχυτήτων στους κόμβους του εδράνου του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης στο Ansys, μεγέθυνση

Ομοίως, στη συνέχεια ορίζουμε τις ταχύτητες στους κόμβους του ρότορα, σύμφωνα με την ταχύτητα περιστροφής του, που έχουμε εισάγει στα δεδομένα. Η εφαρμογή των ταχυτήτων περιστροφής του ρότορα φαίνεται στις εικόνες 7 και 8.

Εικόνα 7. Εφαρμογή ταχυτήτων στους κόμβους του ρότορα του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης στο Ansys

Εικόνα 8. Εφαρμογή ταχυτήτων στους κόμβους του ρότορα του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης στο Ansys, μεγέθυνση

Για οριακές συνθήκες επιλέγουμε μηδενική πίεση στους κόμβους των πλευρών του εδράνου, εκτός από τους κόμβους που αφορούν το έδρανο και τον ρότορα, διότι το ρευστό του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης εξέρχεται από το έδρανο χωρίς πίεση. Αυτό φαίνεται στις εικόνες 9 και 10.

Εικόνα 9. Εφαρμογή οριακών συνθηκών στους κόμβους των πλευρών του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης στο Ansys

Εικόνα 10. Εφαρμογή οριακών συνθηκών στους κόμβους των πλευρών του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης στο Ansys, μεγέθυνση

Εφαρμόζουμε και την επιτάχυνση βαρύτητας, ως μία επιτάχυνση σε όλα τα στοιχεία και τους κόμβους, η οποία θα έχει θετική φορά (προς τα πάνω) και τιμή ίση με την επιτάχυνση βαρύτητας. Επίσης, για τις ιδιότητες της επίλυσης επιλέγουμε μέγιστο αριθμό επαναλήψεων κατά τη διάρκεια που θα επιλύει το Ansys: 300 φορές, για συνθήκη τερματισμού ορίζουμε η πίεση που προκύπτει να έχει μικρότερη

διαφορά από 10^{-6} σε σχέση με την προηγούμενη επανάληψη. Επίσης επιλέγουμε η πυκνότητα και το ιξώδες να παραμένουν σταθερά και ίσα με τις τιμές που δίνουμε στην εισαγωγή των δεδομένων. Επιλέγουμε να γίνει συνυπολογισμός των διατμητικών τάσεων στις πιέσεις, ορίζουμε ως πίεση αναφοράς την ατμοσφαιρική πίεση, δηλαδή 101325 pa και τέλος ορίζουμε μέγιστο αριθμό προσπαθειών για την επίλυση κάθε προσπάθειας 100000000 φορές, καθώς όταν επιλέγουμε μικρό ιξώδες για το λιπαντικό του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης χρειάζονται αρκετές επαναλήψεις μέχρι να συγκλίνουν οι λύσεις και να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Κατά τη διάρκεια της επίλυσης, μηδενίζουμε τις αρνητικές πιέσεις και υπολογίζουμε τη δύναμη που δέχεται ο ρότορας από το υδροδυναμικό πεδίο.

Η μέθοδος Newton-Raphson 2 μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του σημείου ισορροπίας του ρότορα, καθώς η μετακίνηση του ρότορα προς τη μία διεύθυνση (π.χ. X-διεύθυνση), επηρεάζει τα αποτελέσματα και στην άλλη διεύθυνση (π.χ. Y-διεύθυνση).

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, μετά την εύρεση της πρώτης λύσης της δύναμης που απομένει στις δύο διευθύνσεις με επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, δηλαδή της δύναμης του υδροδυναμικού πεδίου στην X-διεύθυνση που ασκείται πάνω στον ρότορα μείον το φορτίο του ρότορα στην X-διεύθυνση και της δύναμης του υδροδυναμικού πεδίου που ασκείται πάνω στον ρότορα στην Y-διεύθυνση μείον το φορτίο του ρότορα στην Y-διεύθυνση, έστω $F_{\text{Χαρχική}}$ και $F_{\text{Υαρχική}}$, πραγματοποιούμε μία μικρή μεταβολή στην μία μεταβλητή που αναζητούμε την τιμή της, και συγκεκριμένα στην εκκεντρότητα, η οποία γίνεται:

$$\text{Νέα εκκεντροτητα} = \text{εκκεντροτητα} + \frac{\text{Ακτινική χαρη}}{1000} \quad (12)$$

διατηρώντας τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αμετάβλητα.

Μετά τη μεταβολή αυτή, πραγματοποιείται επίλυση του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης και βρίσκουμε τους λόγους των διαφορών των δυνάμεων που προκύπτουν, προς τη μεταβολή της εκκεντρότητας που πραγματοποιήθηκε, δηλαδή:

$$\Delta_{FY} \log \omega \Delta_{\text{εκκεντροτητας}} = \frac{\frac{F_Y - F_{\text{Υαρχική}}}{1}}{\frac{\text{Ακτινική χαρη}}{1000}} \quad (13)$$

και

$$\Delta_{FX} \log \omega \Delta_{\text{εκκεντροτητας}} = \frac{\frac{F_X - F_{\text{Χαρχική}}}{1}}{\frac{\text{Ακτινική χαρη}}{1000}} \quad (14)$$

Στη συνέχεια, επαναφέρουμε την εκκεντρότητα στην αρχική της τιμή, και πραγματοποιούμε μικρή μεταβολή στην άλλη μεταβλητή, και συγκεκριμένα στη γωνία συμπεριφοράς, η οποία γίνεται (σε μοίρες):

$$\text{Νεα γωνια} = \gamma_{\text{γωνια}} + 0.1 \quad (15)$$

διατηρώντας τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αμετάβλητα.

Μετά τη μεταβολή αυτή, πραγματοποιείται επίλυση του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης και βρίσκουμε τους λόγους των διαφορών των δυνάμεων, προς τη μεταβολή της γωνίας που πραγματοποιήθηκε, δηλαδή:

$$\Delta_{FY} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\gamma_{\text{γωνιας}}} = \frac{F_Y - F_{Y\text{αρχικη}}}{0.1} \quad (16)$$

και

$$\Delta_{FX} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\gamma_{\text{γωνιας}}} = \frac{F_X - F_{X\text{αρχικη}}}{0.1} \quad (17)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε:

$$\Delta = (\Delta_{FX} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\text{εκκεντροτητας}} \cdot \Delta_{FY} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\gamma_{\text{γωνιας}}}) - (\Delta_{FY} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\text{εκκεντροτητας}} \cdot \Delta_{FX} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\gamma_{\text{γωνιας}}}) \quad (18)$$

Επαναφέρουμε τη μεταβλητή της γωνίας στην αρχική της τιμή, και υπολογίζουμε:

$$\text{Βημα γωνιας} = (-F_{X\text{αρχικη}} \cdot \Delta_{FY} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\gamma_{\text{γωνιας}}} + F_{Y\text{αρχικη}} \cdot \Delta_{FX} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\gamma_{\text{γωνιας}}}) / \Delta \quad (19)$$

$$\text{Βημα εκκεντροτητας} = (-F_{Y\text{αρχικη}} \cdot \Delta_{FX} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\text{εκκεντροτητας}} + F_{X\text{αρχικη}} \cdot \Delta_{FY} \lambda_{\text{λογω}} \Delta_{\text{εκκεντροτητας}}) / \Delta \quad (20)$$

και οι νέες τιμές των δύο μεταβλητών είναι:

$$\text{Νεα εκκεντροτητα} = \text{εκκεντροτητα} + \text{Βημα γωνιας} \quad (21)$$

$$\text{Νεα γωνια} = \gamma_{\text{γωνια}} + \text{Βημα εκκεντροτητας} \quad (22)$$

Με τις παραπάνω μεταβολές στην εκκεντρότητα και στη γωνία, γίνεται επίλυση και υπολογίζουμε τις νέες δυνάμεις $F_{X2\text{αρχικη}}$ και $F_{Y2\text{αρχικη}}$.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς, μέχρι να ισχύουν και οι δύο παρακάτω συνθήκες τερματισμού της μεθόδου Newton-Raphson 2 μεταβλητών:

$$\frac{|\text{Νεα εκκεντροτητα} - \text{εκκεντροτητα}|}{\text{Ακτινικηχαρη}} < 10^{-6} \quad (23)$$

$$|\text{Νεα γωνια} - \gamma_{\text{γωνια}}| < 10^{-4} \quad (24)$$

ή μέχρι να ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$\sqrt{(F_{Y\text{Ναρχικη}} - \text{Φορτίο})^2 + F_{X\text{Ναρχικη}}^2} < \frac{\text{Φορτίο}}{1000} \quad (25)$$

όπου N είναι ο αριθμός επανάληψης.

Ορίζουμε ως μέγιστο αριθμό επαναλήψεων για τη μέθοδο Newton-Raphson 2 μεταβλητών τις 20 φορές.

Στην εικόνα 11, απεικονίζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του υδροδυναμικού πεδίου, με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson 2 μεταβλητών. Ο άξονας Y συμβολίζει τη συνισταμένη δύναμη των δύο διευθύνσεων X και Y:

$$\sqrt{(F_{X\text{Ναρχική}} - \text{Φορτίο X})^2 + (F_{Y\text{Ναρχική}} - \text{Φορτίο Y})^2} \quad (26)$$

δηλαδή, το σφάλμα που απομένει. Ο άξονας X συμβολίζει τον αριθμό των επαναλήψεων. Παρατηρούμε ότι μετά από μόνο τέσσερις επαναλήψεις, η επίλυση έχει ολοκληρωθεί με συνισταμένη δύναμη 0.02 Newton, παρόλο που στην πρώτη επανάληψη η συνισταμένη δύναμη ήταν 1567 Newton.

Εικόνα 11. Αποτελέσματα επίλυσης υδροδυναμικού πεδίου με τη μέθοδο Newton-Raphson 2 μεταβλητών

Στην εικόνα 12, απεικονίζεται η πίεση του λιπαντικού στο μοντέλο του υδροδυναμικού εδράνου, το οποίο προκύπτει μέσω της ανάλυσης του υδροδυναμικού πεδίου στο πρόγραμμα ANSYS και αναφέρεται σε αριθμό Sommerfeld 1, ακτίνα του ρότορα 15 mm, ακτινική χάρη 20 μm, λόγος μήκους εδράνου προς διάμετρο εδράνου 0.5, ταχύτητα περιστροφής του ρότορα 50 rps, πυκνότητα λιπαντικού $960 \frac{kg}{m^3}$, και ιξώδες λιπαντικού $0.012 \text{ } \rho a \cdot sec$.

Εικόνα 12. Πίεση του λιπαντικού, στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Η κατανομή της πίεσης του λιπαντικού κατά την περιφέρεια του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης απεικονίζεται στην εικόνα 13, με φορά μέτρησης της γωνίας, όπως η γωνία θ στην εικόνα 1.

Εικόνα 13. Κατανομή πίεσης του λιπαντικού κατά την περιφέρεια του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν μέσω του ANSYS, με αποτελέσματα προηγούμενων εργασιών.

Οι σχετικές εκκεντρότητες (ε) και οι γωνίες συμπεριφοράς (φ), για διάφορους λόγους μήκους εδράνου προς διάμετρο (L/D), επαληθεύθηκαν με τα αντίστοιχα

αποτελέσματα των Γκέρτζος, Νικολακόπουλος και Παπαδόπουλος [80]. Στην εικόνα 14 και στην εικόνα 15, φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ καλή προσέγγιση και σχεδόν απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων.

Εικόνα 14. Σχετικές εκκεντρότητες συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld, για διάφορους λόγους μήκους προς διάμετρο υδροδυναμικών εδράνων

Εικόνα 15. Γωνία συμπεριφοράς συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld, για διάφορους λόγους μήκους προς διάμετρο υδροδυναμικών εδράνων

Για τον υπολογισμό των συντελεστών ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C) χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα Ansys.

Συγκεκριμένα, μετά την επίλυση της ισορροπίας του ρότορα στο υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης και ενώ έχουμε αποθηκεύσει τα αποτελέσματα της ισορροπίας, πραγματοποιούμε μία μετατόπιση του ρότορα κατά την Y-διεύθυνση η οποία ισούται με την ακτινική χάρη (σε μέτρα) δια 1000, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει αυτή τη μετατόπιση, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το υδροδυναμικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε.

Στη συνέχεια, επαναφέρουμε τον ρότορα στην αρχική του Y-θέση και τον μετατοπίζουμε κατά την X-διεύθυνση απόσταση ίση με ακτινική χάρη (σε μέτρα) δια 1000. Υπολογίζουμε τις νέες δυνάμεις που δέχεται ο ρότορας κατά την Y και X-διεύθυνση.

Οι συντελεστές ελαστικότητας (K), πρακτικά υπολογίζονται ως εξής:

$$K_{Xx}^{Y\Delta PO} = \frac{F_{X\log\omega\Delta x} - F_{Xαρχικη}}{\Delta x} = \frac{F_{X\log\omega\Delta x} - F_{Xαρχικη}}{\frac{c}{1000}} \quad (27)$$

$$K_{Yx}^{Y\Delta PO} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta x} - F_{Yαρχικη}}{\Delta x} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta x} - F_{Yαρχικη}}{\frac{c}{1000}} \quad (28)$$

$$K_{Xy}^{Y\Delta PO} = \frac{F_{X\log\omega\Delta y} - F_{Xαρχικη}}{\Delta y} = \frac{F_{X\log\omega\Delta y} - F_{Xαρχικη}}{\frac{c}{1000}} \quad (29)$$

$$K_{Yy}^{Y\Delta PO} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta y} - F_{Yαρχικη}}{\Delta y} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta y} - F_{Yαρχικη}}{\frac{c}{1000}} \quad (30)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών απόσβεσης (C), επαναφέρουμε τα δεδομένα της ισορροπίας του ρότορα στο υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης και προσθέτουμε μία γραμμική ταχύτητα στους κόμβους του ρότορα κατά την Y-διεύθυνση η οποία ισούται με:

$$\frac{\text{Γωνιακή ταχύτητα του στροφεα} \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right] \cdot \text{εκκεντροτητα} [m]}{1000} \quad (31)$$

διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει αυτή τη μεταβολή στη γραμμική ταχύτητα του ρότορα, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το υδροδυναμικό πεδίο κατά την Y και X-διεύθυνση και τις αποθηκεύουμε.

Στη συνέχεια, επαναφέρουμε τις αρχικές συνθήκες και τα αρχικά δεδομένα της ισορροπίας του ρότορα στο υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης και προσθέτουμε μία γραμμική ταχύτητα στους κόμβους του ρότορα κατά την X-διεύθυνση η οποία ισούται με τη γραμμική ταχύτητα που είχαμε προσθέσει και κατά την Y-διεύθυνση

(εξίσωση (31)) διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει αυτή τη μεταβολή στη γραμμική ταχύτητα του ρότορα, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το υδροδυναμικό πεδίο κατά την Y και X-διεύθυνση και τις αποθηκεύουμε.

Οι συντελεστές απόσβεσης (C), πρακτικά υπολογίζονται ως εξής:

$$C_{Xx}^{Y\Delta PO} = \frac{F_{X\log\omega\Delta Ux} - F_{Χαρχικη}}{\Delta Ux} = \frac{F_{X\log\omega\Delta Ux} - F_{Χαρχικη}}{\frac{\Omega \cdot e}{1000}} \quad (32)$$

$$C_{Yx}^{Y\Delta PO} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta Ux} - F_{Υαρχικη}}{\Delta Ux} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta Ux} - F_{Υαρχικη}}{\frac{\Omega \cdot e}{1000}} \quad (33)$$

$$C_{Xy}^{Y\Delta PO} = \frac{F_{X\log\omega\Delta Uy} - F_{Χαρχικη}}{\Delta Uy} = \frac{F_{X\log\omega\Delta Uy} - F_{Χαρχικη}}{\frac{\Omega \cdot e}{1000}} \quad (34)$$

$$C_{Yy}^{Y\Delta PO} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta Uy} - F_{Υαρχικη}}{\Delta Uy} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta Uy} - F_{Υαρχικη}}{\frac{\Omega \cdot e}{1000}} \quad (35)$$

Οι συντελεστές ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C) οι οποίοι υπολογίστηκαν μέσω του ANSYS, επαληθεύθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των Νικολακόπουλος και Παπαδόπουλος [81]. Στην εικόνα 16 και στην εικόνα 17, φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι έχουμε πολύ καλή προσέγγιση.

Εικόνα 16. Αδιάστατοι συντελεστές ελαστικότητας $\bar{K}_{ij}^{Y\Delta PO} = K_{ij}^{Y\Delta PO} (c/W_h)$ συναρτήσεως του αριθμού Sommerfeld, $L/D=0.5$

Εικόνα 17. Αδιάστατοι συντελεστές απόσβεσης $\bar{C}_{ij}^{YAPO} = C_{ij}^{YAPO} (c\omega/W_h)$ συναρτήσει του αριθμού Sommerfeld, $L/D=0.5$

Τέλος, μετά τον υπολογισμό των συντελεστών ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C), υπολογίζουμε και τους συντελεστές τριβής για το έδρανο και τον ρότορα. Προκειμένου να γίνει αυτό, επαναφέρουμε όλες τις αρχικές συνθήκες και αρχικές τιμές που είχαμε από την ισορροπία του ρότορα μέσα στο υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης και στη συνέχεια υπολογίζουμε τους συντελεστές τριβής μέσω των ροπών λόγω των διατμητικών τάσεων στην Z -διεύθυνση.

Τα αποτελέσματα που εξάγονται από την επίλυση του υδροδυναμικού πεδίου του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης είναι το σημείο ισορροπίας του ρότορα στην X και Y -διεύθυνση, θεωρώντας ως $(0,0)$ το κέντρο του εδράνου, ο λόγος της εκκεντρότητας ε , η εκκεντρότητα e και η γωνία συμπεριφοράς φ , η κατανομή της πίεσης του λιπαντικού κατά μήκος της περιφέρειάς του, οι αδιάστατοι συντελεστές ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C), οι συντελεστές ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C) και οι συντελεστές τριβής του εδράνου και του ρότορα.

Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της γεωμετρίας των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης, ανάλυση των εξισώσεων που τα αφορούν, ανάλυση των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης του ρότορα μέσα σε αυτά τα έδρανα και η μοντελοποίηση και προσομοίωση με παραμετρικό τρόπο της λειτουργίας τους στο πρόγραμμα Ansys, το οποίο επιλύει τις εξισώσεις Navier-Stokes και δίνει τα αποτελέσματα για τα υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης.

Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα από την προσομοίωση των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης στο Ansys, όπως προγραμματίστηκε στην εργασία αυτή, είναι το σημείο ισορροπίας του ρότορα στην X και Y -διεύθυνση, θεωρώντας ως $(0,0)$ το

κέντρο του εδράνου, ο λόγος της εκκεντρότητας e , η εκκεντρότητα e και η γωνία συμπεριφοράς φ , η κατανομή της πίεσης του λιπαντικού κατά μήκος της περιφέρειάς του, οι αδιάστατοι συντελεστές ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C), οι συντελεστές ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C) και οι συντελεστές τριβής του εδράνου και του ρότορα.

Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η προσομοίωση δίνει ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελέσματα σε σύγκριση με άλλες εργασίες.

Αυτά τα αποτελέσματα το Ansys αποθηκεύει σε αρχεία txt, τα οποία θα χρειαστούν στη συνέχεια.

Η προσομοίωση των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης στο πρόγραμμα Ansys αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης.

Κεφάλαιο 2

EME Σχεδιασμός και Ανάλυση Ενεργών Ηλεκτρομαγνητικών Εδράνων (Ansys)

Εισαγωγή

Τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα, είναι ένα είδος εδράνου με πολλά πλεονεκτήματα, το οποίο εξελίσσεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια. Τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα αποτελούνται από ηλεκτρομαγνήτες τοποθετημένους περιμετρικά γύρω από τον ρότορα ο οποίος περιστρέφεται. Μέσω μιας μονάδας ελέγχου, ο κάθε ηλεκτρομαγνήτης τροφοδοτείται με το κατάλληλο ρεύμα ώστε να επιτυγχάνεται αιώρηση του ρότορα στο επιθυμητό σημείο, εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει ανάλυση της γεωμετρίας των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων, ανάλυση των εξισώσεων Maxwell που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, ανάλυση των μη-γραμμικών εξισώσεων που δείχνουν την ισορροπία του ρότορα μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο καθώς και γραμμικοποίηση αυτών, ανάλυση των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης του ρότορα μέσα στο έδρανο αυτό και ανάλυση του τρόπου μοντελοποίησης και προσομοίωσης της λειτουργίας των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο πρόγραμμα Ansys καθώς και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αυτής και σύγκρισής τους με προηγούμενες εργασίες. Ο σχεδιασμός των εδράνων αυτών γίνεται με παραμετρικό τρόπο, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα τροποποίησης των χαρακτηριστικών τους. Ο σχεδιασμός των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο πρόγραμμα Ansys αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα.

Γεωμετρία ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου

Τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα αποτελούνται από ηλεκτρομαγνήτες τοποθετημένους περιμετρικά γύρω από τον ρότορα ο οποίος περιστρέφεται. Οι ηλεκτρομαγνήτες δημιουργούνται με την κατάλληλη διαμόρφωση ενός ενιαίου υλικού, το οποίο στα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα ονομάζεται στάτης, όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Αποτελούνται από τρεις, έξη, οκτώ ή και περισσότερους πόλους. Συνήθως όμως αποτελούνται από οκτώ πόλους ηλεκτρομαγνητών, λόγω γεωμετρικών περιορισμών, καθώς εάν οι πόλοι είναι λιγότεροι από οκτώ δεν ασκούν αρκετή δύναμη στον ρότορα και δεν προσφέρουν αρκετή ευστάθεια σε αυτόν και εάν οι πόλοι είναι περισσότεροι από οκτώ δεν υπάρχει αρκετός χώρος για τις περιελίξεις των πηνίων ώστε να ασκούν οι ηλεκτρομαγνήτες αρκετή δύναμη στον ρότορα. Οι οκτώ πόλοι των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων είναι ανά δύο ενωμένοι. Ο τρόπος σύνδεσης και η φορά περιέλιξης των πηνίων του κάθε ζεύγους πόλων γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται μαγνητική ροή μεταξύ αυτών των πόλων. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται τέσσερις ηλεκτρομαγνήτες σχήματος πετάλου, όπως φαίνεται στην εικόνα 18. Τα τέσσερα ζευγάρια ηλεκτρομαγνητών διατάσσονται

ομοιόμορφα, περιμετρικά του ρότορα, ο οποίος πρόκειται να αιωρείται κατά τη λειτουργία του εδράνου. Συνήθως το ένα ζευγάρι ηλεκτρομαγνητών τοποθετείται στο πάνω μέρος, ένα ζευγάρι στο κάτω μέρος, ένα ζευγάρι αριστερά και ένα ζευγάρι δεξιά, όπως φαίνεται στην εικόνα 18.

Επίσης, διαθέτουν αισθητήρες, συνήθως έναν που ελέγχει τη Χ-διεύθυνση και έναν που ελέγχει την Υ-διεύθυνση, οι οποίοι στέλνουν σήμα και ενημερώνουν τον ελεγκτή για τη θέση του ρότορα κάθε στιγμή.

Ο ελεγκτής στη συνέχεια δίνει το κατάλληλο σήμα στον ενισχυτή σήματος, μέσω του οποίου τροφοδοτούνται τα πηνία με το κατάλληλο ρεύμα, ώστε να επιτυγχάνεται η αιώρηση του ρότορα που περιστρέφεται ή πρόκειται να περιστραφεί.

Ο ρότορας και ο στάτης κατασκευάζονται από φερρομαγνητικό υλικό, όπως είναι ο σίδηρος, με σκοπό να περνάνε οι μαγνητικές γραμμές μέσα από τα υλικά αυτά και να ασκούνται μεγάλες μαγνητικές δυνάμεις.

Το μαγνητικό διάκενο συνήθως κυμαίνεται από 200μm έως 1500μm, ανάλογα με τη συνολική γεωμετρία του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, ανάλογα με τις ανοχές και ανάλογα με το επιθυμητό φορτίο που θέλουμε να παραλαμβάνει το έδρανο αυτό.

Εικόνα 18. Ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, αποτελούμενο από τέσσερα ζεύγη ηλεκτρομαγνητών

Σε κάποιες περιπτώσεις, η γεωμετρία του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου είναι «περιστραμμένη» κατά 45° , όπως φαίνεται στην εικόνα 19. Δηλαδή, οι πόλοι οι οποίοι συνδυάζονται ανά δύο σχηματίζουν μία γωνία 45° με το οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ικανότητα παραλαβής φορτίου από το έδρανο, καθώς και τα δύο πάνω ζεύγη ηλεκτρομαγνητών

ενεργούν ταυτόχρονα για την παραλαβή του φορτίου του ρότορα. Έτσι, εάν στην προηγούμενη περίπτωση (εικόνα 18) το φορτίο που παραλαμβάνει το έδρανο είναι W_m , στην περίπτωση του «περιστραμμένου» εδράνου (εικόνα 19), το φορτίο είναι $2 \cdot W_m \cdot \eta_{\mu 45^\circ} = 1.414 \cdot W_m$.

Εικόνα 19. Ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο 45° , αποτελούμενο από τέσσερα ζεύγη ηλεκτρομαγνητών

Ισορροπία δυνάμεων

Στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, οι ηλεκτρομαγνήτες οδηγούν τη ροή των δυναμικών μαγνητικών γραμμών να διαπερνά τον κάθε ηλεκτρομαγνήτη κάνοντας έναν κύκλο, όπως φαίνεται στην εικόνα 20.

Εικόνα 20. Μαγνητική ροή σε έναν ηλεκτρομαγνήτη με δύο πόλους

Η μαγνητική ροή Φ περνά στο εσωτερικό του μαγνητικού κόρου και του μαγνητικού διακένου. Έστω ότι η επιφάνεια της τομής του κάθε πόλου είναι A και το μαγνητικό διάκενο g όπως φαίνονται στην εικόνα 20, τότε η μαγνητική ροή Φ που περνά στον μαγνητικό κόρο και στο μαγνητικό διάκενο είναι [82]:

$$\Phi = B \cdot A \quad (36)$$

όπου

$$B = \frac{\mu_0 2N_w I}{2 \cdot g} = \frac{\mu_0 N_w I}{g} \quad (37)$$

Επομένως:

$$\Phi = B \cdot A = \frac{\mu_0 N_w I}{g} A = \frac{\mu_0 N_w I A}{g} \quad (38)$$

Όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4\pi 10^{-7}$ N/A²), N_w είναι ο αριθμός περιελίξεων του ενός από τους δύο πόλους του κάθε ηλεκτρομαγνήτη, I είναι το ρεύμα που διαρρέει τον ηλεκτρομαγνήτη που αποτελείται από 2 πόλους, A είναι η επιφάνεια της τομής του ενός από τους δύο πόλους κάθε ηλεκτρομαγνήτη και g είναι το μαγνητικό διάκενο.

Η επαγωγή L_I ισούται με το γινόμενο της συνολικής μαγνητικής ροής Φ που δημιουργείται από $2N_w$ αριθμό περιελίξεων, διά το ρεύμα I . Δηλαδή, είναι:

$$L_I = \frac{2N_w \Phi}{I} = \frac{2\mu_0 N_w^2 A}{g} \quad (39)$$

Στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο (εικόνα 18), ο κάθε ηλεκτρομαγνήτης έχει τη δυνατότητα να έλκει τον ρότορα προς το μέρος του. Δηλαδή, οι δυνάμεις από τους ηλεκτρομαγνήτες προς τον ρότορα είναι μόνο ελκτικές και όχι απωθητικές. Επομένως, κάθε στιγμή ενεργοποιείται όποιος ηλεκτρομαγνήτης απαιτείται, με σκοπό η συνισταμένη δύναμη που δέχεται ο ρότορας να έχει τέτοια διεύθυνση, φορά και ένταση ώστε να τον οδηγεί προς το επιθυμητό σημείο.

Η δύναμη F_m ενός ηλεκτρομαγνήτη (αποτελούμενο από δύο πόλους) κατά την Υ-διεύθυνση όπως φαίνεται στην εικόνα 18, είναι [82]:

$$F_m = \frac{B^2 A}{\mu_0} \sin \alpha = \mu_0 N_w^2 A \frac{I^2}{g^2} \sin \alpha = k \frac{I^2}{g^2} \sin \alpha \quad (40)$$

όπου $k = \mu_0 N_w^2 A$ και α είναι η γωνία των πόλων (22.5°).

Συνήθως οι αντιδιαμετρικοί ηλεκτρομαγνήτες ενεργοποιούνται σε συνδυασμό μεταξύ τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει ένα σταθερό ρεύμα (I_b), και ένα ρεύμα ελέγχου (I_c), με τα οποία τροφοδοτούνται τα πηνία. Ο ένας ηλεκτρομαγνήτης τροφοδοτείται με το άθροισμα του σταθερού ρεύματος και του ρεύματος ελέγχου ($I_b + I_c$) και ο αντιδιαμετρικός με τη διαφορά του σταθερού ρεύματος μείον το ρεύμα ελέγχου ($I_b - I_c$). Για τη σωστή λειτουργία του εδράνου, το ρεύμα ελέγχου μπορεί να έχει και αρνητικές τιμές, οπότε σε αυτήν την περίπτωση είναι δυνατή η αντιστροφή της φοράς της συνισταμένης δύναμης των ηλεκτρομαγνητών. Σε κάθε περίπτωση όμως, υπάρχουν οι εξής περιορισμοί:

$$(I_b + I_c) \geq 0 \quad (41)$$

$$(I_b - I_c) \geq 0 \quad (42)$$

Δηλαδή, το συνολικό ρεύμα ($(I_b + I_c)$ ή $(I_b - I_c)$) που διαρρέει τον κάθε

ηλεκτρομαγνήτη δεν επιτρέπεται να έχει αρνητικές τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι οι ηλεκτρομαγνήτες ασκούν μόνο ελκτικές δυνάμεις, με αποτέλεσμα οι θετικές και οι αρνητικές τελικές τιμές του συνολικού ρεύματος να έχουν ως αποτέλεσμα την ίδια ηλεκτρομαγνητική δύναμη και επίσης, δεν επιτρέπονται αρνητικές τελικές τιμές του συνολικού ρεύματος του κάθε ηλεκτρομαγνήτη, διότι σε αυτήν την περίπτωση θα υπήρχε η πιθανότητα να ενωθούν οι μαγνητικές γραμμές δύο ή τριών ή και των τεσσάρων ζευγών ηλεκτρομαγνητών, ανάλογα με τις πολικότητές τους, και τότε οι δυνάμεις δεν θα ήταν ελκτικές με διεύθυνση προς το κάθε ζεύγος ηλεκτρομαγνητών, αλλά η διεύθυνση των μαγνητικών δυνάμεων θα μεταβαλλόταν με τυχαία γωνία ως προς τις X και Y-διευθύνσεις.

Για κάθε διεύθυνση που ορίζεται από δύο αντιδιαμετρικούς ηλεκτρομαγνήτες, η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στον ρότορα είναι η διαφορά των δυνάμεων αυτών των δύο ηλεκτρομαγνητών. Έτσι, στην X-διεύθυνση (εικόνα 18), η συνισταμένη μαγνητική δύναμη, αγνοώντας το μαγνητικό κορεσμό του υλικού του στάτη και του ρότορα [83] δίνεται από τη μη-γραμμική εξίσωση (44).

$$F_X = F_{1X} - F_{2X} \quad (43)$$

$$F_X = \mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bX} + I_{cX}}{g - x} \right)^2 - \left(\frac{I_{bX} - I_{cX}}{g + x} \right)^2 \right] \cdot \sigma \nu a \quad (44)$$

όπου x είναι η μετατόπιση του ρότορα από το κέντρο του εδράνου (0,0) κατά την X-διεύθυνση.

Κατά την Y-διεύθυνση, η συνισταμένη μαγνητική δύναμη, αγνοώντας το μαγνητικό κορεσμό του υλικού του στάτη και του ρότορα [83] δίνεται από τη μη-γραμμική εξίσωση (46).

$$F_Y = F_{1Y} - F_{2Y} - mg_a \quad (45)$$

$$F_Y = \mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bY} + I_{cY}}{g - y} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - I_{cY}}{g + y} \right)^2 \right] \cdot \sigma \nu a - mg_a \quad (46)$$

όπου y είναι η μετατόπιση του ρότορα από το κέντρο του εδράνου (0,0) κατά την Y-διεύθυνση, $g_a = 9.81 \text{ m/sec}^2$ είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και m είναι η μάζα του ρότορα.

Γραμμικοποίηση της εξίσωσης κίνησης του ρότορα στο EME, με την 1^η μέθοδο Lyapunov

Η εξίσωση (46) (δύναμη συναρτήσεως του ρεύματος), μπορεί να γραμμικοποιηθεί με την 1^η μέθοδο Lyapunov [83], θεωρώντας ότι ο ρότορας βρίσκεται στο κέντρο του εδράνου ($y=0$), ότι οι μετατοπίσεις που κάνει ο ρότορας κατά την περιστροφή του είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με το μαγνητικό διάκενο, δηλαδή: $y \ll g$ και ότι ο ρότορας είναι αβαρής ($mg_a=0$). Επομένως, η εξίσωση (46) γίνεται:

$$F_Y = \mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bY} + I_{cY}}{g - y} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - I_{cY}}{g + y} \right)^2 \right] \cdot \sigma \nu a \Rightarrow$$

$$m \ddot{y} = \mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bY} + I_{cY}}{g - y} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - I_{cY}}{g + y} \right)^2 \right] \cdot \sigma \nu a \Rightarrow$$

$$\ddot{y} = \frac{\mu_0 N_w^2 A}{m} \left[\left(\frac{I_{bY} + I_{cY}}{g - y} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - I_{cY}}{g + y} \right)^2 \right] \cdot \sigma \nu a$$

Ορίζουμε:

$$y_1 = y$$

$$y_2 = \dot{y}_1 = \dot{y} = H_1(y_1, u)$$

$$\dot{y}_2 = \ddot{y}_1 = \ddot{y} = H_2(y_1, u)$$

$$u = I_{cY}$$

οπότε, η εξίσωση (48) γίνεται:

$$H_2(y_1, u) = \dot{y}_2 = \frac{\mu_0 N_w^2 A}{m} \left[\left(\frac{I_{bY} + u}{g - y_1} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - u}{g + y_1} \right)^2 \right] \cdot \sigma \nu a$$

Γραμμικοποιώντας την εξίσωση (53) στο κέντρο του μαγνητικού εδράνου ($y=y_1=0$) και θέτοντας το ρεύμα ελέγχου ίσο με το μηδέν ($u=I_{cY}=0$), αγνοώντας άλλες εξωτερικές δυνάμεις, προκύπτει:

$$\dot{y} = Ay + Bu \Rightarrow$$

$$\dot{y} = Ay + BI_{cY}$$

Στη συνέχεια βρίσκουμε τις παραμέτρους A και B , προκειμένου να λύσουμε την εξίσωση (54). Επομένως, από τη μέθοδο Lyapunov προκύπτει:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1}{\partial y_1} & \frac{\partial H_1}{\partial y_2} \\ \frac{\partial H_2}{\partial y_1} & \frac{\partial H_2}{\partial y_2} \end{bmatrix}_{y_1=0, y_2=0, u=0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\partial H_2}{\partial y_1} & 0 \end{bmatrix}_{y_1=0, y_2=0, u=0}$$

Οι παράγωγοι της εξίσωσης (55), λόγω της εξίσωσης (53) μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{\partial H_2}{\partial y_1} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} &= \left(\frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left[\left(\frac{I_{bY} + u}{g - y_1} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - u}{g + y_1} \right)^2 \right] \cdot \sigma u n a \right)' \Rightarrow \\
 \left. \frac{\partial H_2}{\partial y_1} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} &= \frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left(\left[\left(\frac{I_{bY} + u}{g - y_1} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - u}{g + y_1} \right)^2 \right] \right)' \cdot \sigma u n a \Rightarrow \\
 \left. \frac{\partial H_2}{\partial y_1} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} &= \frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left[\frac{2(I_{bY} + u)^2}{(g - y_1)^3} + \frac{2(I_{bY} - u)^2}{(g + y_1)^3} \right] \cdot \sigma u n a
 \end{aligned} \tag{56}$$

και επειδή είναι $y_1 = 0$ και $u=0$, έχουμε:

$$\left. \frac{\partial H_2}{\partial y_1} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} = \frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left[\frac{2I_{bY}^2}{g^3} + \frac{2I_{bY}^2}{g^3} \right] \cdot \sigma u n a \Rightarrow \tag{57}$$

$$\left. \frac{\partial H_2}{\partial y_1} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} = \frac{4\mu_0 N_W^2 A I_{bY}^2}{m g^3} \cdot \sigma u n a \tag{58}$$

και για το B, έχουμε:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1}{\partial u} \\ \frac{\partial H_2}{\partial u} \end{bmatrix}_{y_1=0, y_2=0, u=0} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\partial H_2}{\partial u} \end{bmatrix} \tag{59}$$

Επομένως, από την εξίσωση (53), έχουμε:

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{\partial H_2}{\partial u} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} &= \left(\frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left[\left(\frac{I_{bY} + u}{g - y_1} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - u}{g + y_1} \right)^2 \right] \cdot \sigma u n a \right)' \Rightarrow \\
 \left. \frac{\partial H_2}{\partial u} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} &= \frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left(\left[\left(\frac{I_{bY} + u}{g - y_1} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - u}{g + y_1} \right)^2 \right] \right)' \cdot \sigma u n a \Rightarrow \\
 \left. \frac{\partial H_2}{\partial u} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} &= \frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left(\frac{1}{(g - y_1)^2} \cdot 2(I_{bY} + u)(I_{bY} + u)' - \right. \\
 &\quad \left. \frac{1}{(g + y_1)^2} \cdot 2(I_{bY} - u)(I_{bY} - u)' \right) \cdot \sigma u n a \Rightarrow \\
 \left. \frac{\partial H_2}{\partial u} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} &= \frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left[\frac{2(I_{bY} + u)}{(g - y_1)^2} + \frac{2(I_{bY} - u)}{(g + y_1)^2} \right] \cdot \sigma u n a
 \end{aligned} \tag{60}$$

και επειδή είναι $y_1 = 0$ και $u=0$, έχουμε:

$$\left. \frac{\partial H_2}{\partial u} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} = \frac{\mu_0 N_W^2 A}{m} \left[\frac{2I_{bY}}{g^2} + \frac{2I_{bY}}{g^2} \right] \cdot \sigma u n a \Rightarrow \tag{61}$$

$$\left. \frac{\partial H_2}{\partial u} \right|_{y_1=0, y_2=0, u=0} = \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}}{mg^2} \cdot \sigma \nu a \quad (62)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (55), (58), (59) και (62), η εξίσωση (54) γίνεται:

$$\dot{y} = Ay + BI_{cY} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}^2}{mg^3} \cdot \sigma \nu a & 0 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}}{mg^2} \cdot \sigma \nu a \end{bmatrix} I_{cY} \quad (63)$$

Τελικά, η γραμμική εξίσωση για την Y-διεύθυνση είναι:

$$\begin{aligned} \dot{y}_2 &= \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}^2}{mg^3} \cdot (\sigma \nu a) \cdot y + \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}}{mg^2} \cdot (\sigma \nu a) \cdot I_{cY} \Rightarrow \\ m\dot{y}_2 &= \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}^2}{g^3} \cdot (\sigma \nu a) \cdot y + \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}}{g^2} \cdot (\sigma \nu a) \cdot I_{cY} \Rightarrow \\ m\ddot{y} &= \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}^2}{g^3} \cdot (\sigma \nu a) \cdot y + \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}}{g^2} \cdot (\sigma \nu a) \cdot I_{cY} \Rightarrow \end{aligned} \quad (64)$$

$$m\ddot{y} = K_{YI}^{\text{EME}} I_{cY} - K_{Yy}^{\text{EME}} y \quad (65)$$

όπου ο γραμμικός συντελεστής ελαστικότητας θέσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου για την Y-διεύθυνση στο σημείο ισορροπίας ορίζεται:

$$K_{Yy}^{\text{EME}} = -\frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}^2}{g^3} \cdot \sigma \nu a \quad (66)$$

Ο συντελεστής ελαστικότητας θέσης (εξίσωση (66)) του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου έχει αρνητική τιμή ώστε να αντιστοιχεί στην πραγματικότητα, διότι το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο είναι ασταθές από μόνο του, χωρίς την παρουσία ελεγκτή που θα ρυθμίζει τη θέση του ρότορα.

Ο γραμμικός συντελεστής ελαστικότητας ρεύματος για την Y-διεύθυνση στο σημείο ισορροπίας ορίζεται:

$$K_{YI}^{\text{EME}} = \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}}{g^2} \cdot \sigma \nu a \quad (67)$$

Για την X-διεύθυνση, η γραμμική εξίσωση είναι:

$$m\ddot{x} = K_{XI}^{\text{EME}} I_{cX} - K_{Xx}^{\text{EME}} x \quad (68)$$

όπου ο γραμμικός συντελεστής ελαστικότητας θέσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου για την X-διεύθυνση στο σημείο ισορροπίας ορίζεται:

$$K_{Xx}^{\text{EME}} = -\frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bX}^2}{g^3} \cdot \sigma \nu a \quad (69)$$

Ο συντελεστής ελαστικότητας θέσης (εξίσωση (69)) του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου έχει αρνητική τιμή ώστε να αντιστοιχεί στην πραγματικότητα, διότι το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο είναι ασταθές από μόνο του, χωρίς την παρουσία ελεγκτή που θα ρυθμίζει τη θέση του ρότορα.

Ο γραμμικός συντελεστής ελαστικότητας ρεύματος για την X-διεύθυνση στο σημείο ισοροπίας ορίζεται:

$$K_{XI}^{EME} = \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bX}}{g^2} \cdot \sigma \nu a \quad (70)$$

Επομένως, συνδυάζοντας τις εξισώσεις (65), (66) και (67) με σκοπό να προκύψει η ολοκληρωμένη τελική μορφή της γραμμικής εξίσωσης μαγνητικής δύναμης συναρτήσει του ρεύματος ελέγχου για την Y-διεύθυνση, έχουμε:

$$F_{mY}(y, I_{cY}) = m\ddot{y} = \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}^2}{g^3} \cdot (\sigma \nu a) \cdot y + \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bY}}{g^2} \cdot (\sigma \nu a) \cdot I_{cY} \quad (71)$$

και η αντίστοιχη εξίσωση για τη X-διεύθυνση προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων (68), (69) και (70) και είναι:

$$F_{mX}(x, I_{cX}) = m\ddot{x} = \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bX}^2}{g^3} \cdot (\sigma \nu a) \cdot x + \frac{4\mu_0 N_w^2 A I_{bX}}{g^2} \cdot (\sigma \nu a) \cdot I_{cX} \quad (72)$$

Η γραμμική εξίσωση της δύναμης συναρτήσει του ρεύματος δεν ισχύει όταν το υλικό του ρότορα ή του εδράνου φθάνει σε κορεσμό λόγω του μαγνητικού πεδίου που τα διαρρέει ή όταν ο ρότορας δεν είναι ομόκεντρος σε σχέση με το έδρανο [84].

Συντελεστής ελαστικότητας, συντελεστής απόσβεσης

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία ενός ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, είναι ο ελεγκτής να είναι τέτοιος ώστε το έδρανο να έχει κατάλληλο συντελεστή ελαστικότητας και απόσβεσης κατά τη λειτουργία του. Όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, ο γραμμικός συντελεστής ελαστικότητας ενός ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου διακρίνεται σε δύο είδη. Το ένα είδος είναι ο γραμμικός συντελεστής ελαστικότητας θέσης K_s (εξισώσεις (66) και (69)) που οφείλεται στη γεωμετρία του εδράνου και το δεύτερο είδος είναι ο γραμμικός συντελεστής ελαστικότητας ρεύματος K_I (εξισώσεις (67) και (70)) που οφείλεται στον ελεγκτή. Οι γραμμικοί συντελεστές ελαστικότητας θέσης για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο έχουν αρνητικές τιμές, καθώς αυτό το είδος εδράνου δεν παρέχει ευστάθεια στον ρότορα χωρίς ελεγκτή. Αντίθετα, οι γραμμικοί συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος έχουν θετικές τιμές, διότι οφείλονται στον ελεγκτή, ο οποίος σταθεροποιεί τον ρότορα.

Ο γραμμικός συντελεστής απόσβεσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, για ένα βαθμό ελευθερίας, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση [82]:

$$C_{EME} = \frac{\sqrt{\frac{-mK_s}{2}}}{K_I} \quad (73)$$

Για να προκύψουν οι γραμμικοί συντελεστές ελαστικότητας θέσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, πραγματοποιούνται δύο μικρές μετατοπίσεις του ρότορα στην X-διεύθυνση, μία προς τη θετική φορά και μία προς την αρνητική φορά και έπειτα άλλες δύο μικρές μετατοπίσεις του ρότορα στην Y-διεύθυνση, μία προς τη

θετική φορά και μία προς την αρνητική φορά και υπολογίζονται οι νέες δυνάμεις που ασκεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον ρότορα σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Η διαφορά των δυνάμεων όταν η μετατόπιση είναι προς τη θετική φορά μείον τις δυνάμεις όταν η μετατόπιση είναι προς την αρνητική φορά, στην X και στην Y-διεύθυνση ξεχωριστά, διά τις συνολικές μετατοπίσεις σε κάθε διεύθυνση, δίνουν τους διάφορους συντελεστές ελαστικότητας θέσης των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Για να προκύψουν οι γραμμικοί συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, πραγματοποιούνται δύο μικρές μεταβολές του ρεύματος ελέγχου που απαιτείται για την ισορροπία του ρότορα στην X-διεύθυνση, μία αυξάνοντάς το και μία μειώνοντάς το και έπειτα άλλες δύο μικρές μεταβολές του ρεύματος ελέγχου που απαιτείται για την ισορροπία του ρότορα στην Y-διεύθυνση, μία αυξάνοντάς το και μία μειώνοντάς το και υπολογίζονται οι νέες δυνάμεις που ασκεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον ρότορα σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά, χωρίς να μεταβάλλουμε τη θέση ισορροπίας του ρότορα. Η διαφορά των δυνάμεων όταν γίνεται αύξηση του ρεύματος μείον τις δυνάμεις όταν γίνεται μείωση του ρεύματος, στην X και στην Y-διεύθυνση ξεχωριστά, δια τις συνολικές μεταβολές του ρεύματος σε κάθε διεύθυνση, δίνουν τους διάφορους συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Για να προκύψουν οι γραμμικοί συντελεστές απόσβεσης, αφού έχουμε βρει τους γραμμικούς συντελεστές ελαστικότητας θέσης και ρεύματος, και γνωρίζοντας τη μάζα του ρότορα, λύνουμε την εξίσωση (73) για την X και Y-διεύθυνση ξεχωριστά.

Μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, με προγραμματισμό στο Ansys

Η λειτουργία του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ANSYS MULTIPHYSICS. Προκειμένου να γίνει επίλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το πρόγραμμα ANSYS λύνει τις εξισώσεις Maxwell. Με αυτόν τον τρόπο, μέσω του Ansys γίνεται επίλυση του μαγνητικού πεδίου μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο με μη-γραμμικές εξισώσεις, ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας.

Θεωρώντας ότι το ρεύμα ελέγχου I_c είναι πολύ μικρότερο από το σταθερό ρεύμα I_b , το μαγνητικό πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερό, και τότε οι εξισώσεις Maxwell του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, είναι [57]:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times H &= -J_z \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ B &= \mu H \end{aligned} \right\} \quad (74)$$

και το διάνυσμα των δυναμικών μαγνητικών γραμμών A_m , είναι:

$$\nabla \cdot A_m = 0 \quad (75)$$

Από τις εξισώσεις (74) και (75), η μερική διαφορική εξίσωση του διανύσματος των δυναμικών μαγνητικών γραμμών, σε πεδίο δύο διαστάσεων, είναι:

$$\nabla^2 \cdot A_m = -\mu J_z \quad (76)$$

Στο μαγνητικό πεδίο δύο διαστάσεων, το διάνυσμα πυκνότητας ρεύματος J και το διάνυσμα δυναμικών μαγνητικών γραμμών A_m , έχουν μόνο ένα τμήμα, J_z και A_z , αντίστοιχα, που αναφέρονται στην Z -διεύθυνση.

Οι παραπάνω εξισώσεις επιλύονται μέσω του ANSYS, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, οι παραδοχές που θεωρούμε ότι ισχύουν κατά τη διάρκεια των λύσεων είναι ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν διέρχονται εξωτερικά του στάτη του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, αλλά περιορίζονται μόνο στο εσωτερικό του εδράνου αυτού και ότι το διάνυσμα των δυναμικών μαγνητικών γραμμών στις οριακές συνθήκες παραμένει σταθερό [84]. Επομένως, οι δύο οριακές συνθήκες είναι:

$$A_z=0 \quad (77)$$

και

$$\frac{\partial A_z}{\partial n} = 0 \quad (78)$$

όπου n είναι η κάθετη διεύθυνση ως προς την καμπύλη των οριακών συνθηκών.

Για την επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε η 2-διαστάσεων μαγνητοστατική ανάλυση του Multiphysics module του ANSYS. Στο μοντέλο που προσομοιώθηκε για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, δεν προσομοιώθηκε η παραμόρφωση του ρότορα. Έτσι, ο ρότορας θεωρείται ότι είναι απόλυτα κυκλικός κατά την περιφέρειά του.

Τα δεδομένα τα οποία εισάγουμε προκειμένου να γίνει η επίλυση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου είναι ο αριθμός περιελίξεων του κάθε πόλου N_w από τους οκτώ που αποτελείται το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, το σταθερό ρεύμα που διαρρέει το κάθε ζεύγος πόλων I_b από τα τέσσερα ζεύγη που έχει το έδρανο σε Ampere, οι συντεταγμένες x και y του κέντρου του ρότορα μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο σε μέτρα, θεωρώντας ως (0,0) το κέντρο του εδράνου, οι επιθυμητές δυνάμεις που θα πρέπει να ασκεί το έδρανο στον ρότορα κατά τις X και Y -διευθύνσεις, οι διαστάσεις του εδράνου και συγκεκριμένα η ακτίνα του ρότορα $R2$ σε μέτρα, η ακτίνα του εσωτερικού άξονα που διαπερνά τον ρότορα στο σημείο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου $R1$ σε μέτρα και χρειάζεται στην περίπτωση που η σύνδεση του άξονα και του ρότορα γίνεται με σφιχτή συναρμογή, η εσωτερική ακτίνα του στάτη $R3$ σε μέτρα και η εξωτερική ακτίνα του στάτη $R4$ σε μέτρα. Ακόμα, εισάγουμε τη γωνία α των πόλων από τον άξονα Y όπως φαίνεται στην εικόνα 18, το πλάτος του κάθε πόλου b από το ζεύγος των ηλεκτρομαγνητών σε μέτρα, το ύψος του χώρου που καταλαμβάνουν οι περιελίξεις των πηνίων hc σε μέτρα, το μαγνητικό διάκενο g σε μέτρα, το μήκος του εδράνου σε μέτρα, μία αρχική εκτίμηση για τα ρεύματα ελέγχου στην X και στην Y -διεύθυνση σε Ampere, τα οποία θα χρησιμοποιήσει σαν αρχικές τιμές η μέθοδος Newton-Raphson 2 μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκλιση των λύσεων. Επίσης, εισάγουμε τα δεδομένα για τη μαγνητική διαπερατότητα του κάθε υλικού από τα οποία αποτελείται το έδρανο.

Συγκεκριμένα, για τα υλικά του ρότορα και του στάτη, εισάγουμε τα δεδομένα από τις καμπύλες $B-H$ που δίνονται για καθαρό σίδηρο [85], καθώς τα υλικά αυτά έχουν μη-γραμμικές μαγνητικές ιδιότητες. Για τη μαγνητική διαπερατότητα όλων των άλλων υλικών του εδράνου επιλέγουμε μαγνητική διαπερατότητα ίση με 1, καθώς θεωρούμε ότι δεν μαγνητίζονται.

Προκειμένου να δημιουργηθεί η γεωμετρία του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys όπως φαίνεται στην εικόνα 18, είναι απαραίτητο να ορίσουμε τις συντεταγμένες των σημείων 1 έως και 10 της εικόνας 21, με βάση τα δεδομένα που αναφέραμε πιο πάνω ότι εισάγουμε.

Εικόνα 21. Γεωμετρία ενός πόλου του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, αποτελούμενο από οκτώ ηλεκτρομαγνήτες

Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών, σε πολικό σύστημα συντεταγμένων είναι:

Σημείο 1:

$$(R2 + \text{μαγνητικο διακενο}), \left(22.5^\circ - \eta\mu^{-1} \left(\frac{\frac{b}{2}}{R2 + \text{μαγνητικο διακενο}} \right) \right) \quad (79)$$

Σημείο 2:

$$(R2 + \text{μαγνητικο διακενο}), \left(22.5^\circ + \eta\mu^{-1} \left(\frac{\frac{b}{2}}{R2 + \text{μαγνητικο διακενο}} \right) \right) \quad (80)$$

Σημείο 3:

$$R3, \left(22.5^\circ - \eta \mu^{-1} \left(\frac{\frac{b}{2}}{R3} \right) \right) \quad (81)$$

Σημείο 4:

$$R3, \left(22.5^\circ + \eta \mu^{-1} \left(\frac{\frac{b}{2}}{R3} \right) \right) \quad (82)$$

Σημείο 5:

$$(R3 - hc), \left(22.5^\circ - \eta \mu^{-1} \left(\frac{\frac{b}{2}}{R3 - hc} \right) \right) \quad (83)$$

Σημείο 6:

$$(R3 - hc), \left(22.5^\circ + \eta \mu^{-1} \left(\frac{\frac{b}{2}}{R3 - hc} \right) \right) \quad (84)$$

$$\text{Σημείο 7:} \quad (R3 - hc), 0 \quad (85)$$

$$\text{Σημείο 8:} \quad (R3 - hc), 45 \quad (86)$$

Στη συνέχεια βρίσκουμε μέσω του Ansys την απόσταση των σημείων 5 έως 7, μέσω των ιδιοτήτων των points. Αφού βρούμε αυτή την απόσταση, την οποία ορίσουμε ως «απόσταση57», στη συνέχεια δίνουμε τις συντεταγμένες και για τα δύο τελευταία σημεία 9 και 10, οι οποίες είναι:

Σημείο 9:

$$R3, \left(22.5 - \eta \mu^{-1} \left(\frac{\frac{b}{2} + \text{αποσταση57}}{R3} \right) \right) \quad (87)$$

Σημείο 10:

$$R3, \left(22.5 + \eta \mu^{-1} \left(\frac{\frac{b}{2} + \text{αποσταση57}}{R3} \right) \right) \quad (88)$$

Αυτές τις συντεταγμένες εισάγουμε στο Ansys και δημιουργούνται τα σημεία που φαίνονται στην εικόνα 22.

Εικόνα 22. Σημεία ενός πόλου με αρίθμηση, για τη μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Στη συνέχεια, ενώνουμε τα σημεία 1 με 2, 3 με 4, 5 με 7, 6 με 8, 9 με 3, 4 με 10 σε πολικές συντεταγμένες, ώστε να προκύψουν τόξα κύκλων με κέντρο το κέντρο του εδράνου και τα σημεία 1 με 5, 5 με 3, 2 με 6, 6 με 4, 7 με 9, 8 με 10, σε καρτεσιανές συντεταγμένες ώστε να προκύψουν ευθείες γραμμές, όπως φαίνεται στην εικόνα 23.

Εικόνα 23. Γραμμές ενός πόλου, για τη μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Στη συνέχεια ενεργοποιούμε την εμφάνιση της αρίθμησης των γραμμών, η οποία φαίνεται στο Ansys όπως στην εικόνα 24.

Εικόνα 24. Γραμμές με αρίθμηση ενός πόλου, για τη μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Στη συνέχεια δημιουργούμε τρεις επιφάνειες, ενώνοντας τις γραμμές 1, 6, 7, 8, 9 και 10 για την πρώτη επιφάνεια, 3, 5, 10 και 12 για την δεύτερη επιφάνεια και 2, 4, 8 και 11 για την τρίτη επιφάνεια και δημιουργούνται οι επιφάνειες που φαίνονται στην εικόνα 25.

Εικόνα 25. Επιφάνειες ενός πόλου, για τη μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Στη συνέχεια ενεργοποιούμε την εμφάνιση της αρίθμησης των επιφανειών, η οποία φαίνεται στο Ansys όπως στην εικόνα 26.

Εικόνα 26. Επιφάνειες με αρίθμηση ενός πόλου, για τη μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Το επόμενο βήμα είναι η περιστροφή των επιφανειών 1, 2 και 3 γύρω από τον άξονα Z ο οποίος είναι το κέντρο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου. Μετά την περιστροφή αυτή, δημιουργούνται οι επιφάνειες όπως φαίνεται στην εικόνα 27.

Εικόνα 27. Επιφάνειες όλων των πόλων μετά από περιστροφή ενός, για τη μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Στη συνέχεια δημιουργούμε κύκλους με ακτίνες $R1$ (ακτίνα του εσωτερικού άξονα που διαπερνά τον ρότορα στο σημείο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και χρειάζεται στην περίπτωση που η σύνδεση του άξονα και του ρότορα γίνεται με σφιχτή συναρμογή), $R2$ (ακτίνα του ρότορα), $R3$ (εσωτερική ακτίνα του στάτη) και $R4$ (εξωτερική ακτίνα του στάτη) και δημιουργείται η γεωμετρία που φαίνεται στην εικόνα 28.

Εικόνα 28. Γεωμετρία με επικαλυπτόμενες επιφάνειες του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Σε αυτό το σημείο όμως, οι επιφάνειες είναι επικαλυπτόμενες. Γι' αυτό, διαχωρίζουμε όλες τις επικαλυπτόμενες επιφάνειες και δημιουργείται το μοντέλο που φαίνεται στην εικόνα 29.

Εικόνα 29. Γεωμετρία χωρίς επικαλυπτόμενες επιφάνειες του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Μετά το διαχωρισμό των επικαλυπτόμενων επιφανειών, το τελευταίο στάδιο της μοντελοποίησης της γεωμετρίας του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys είναι η ένωση των επιφανειών που ανήκουν στο ίδιο υλικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 30.

Εικόνα 30. Τελική γεωμετρία του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τμήματα από τα οποία αποτελείται το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, όπως αυτά έχουν μοντελοποιηθεί στο Ansys. Στην εικόνα 31, απεικονίζεται ο στάτης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, του οποίου το υλικό είναι καθαρός σίδηρος.

Εικόνα 31. Μοντελοποίηση του στάτη του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Κατά την προσομοίωση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στο Ansys, όταν ο ρότορας περιστρέφεται μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές δεν διέρχονται σε όλο το εσωτερικό του ρότορα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, τόσο μικρότερο είναι το βάθος στο οποίο εισέρχονται οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Στην εικόνα 32

απεικονίζεται ο εξωτερικός δακτύλιος του ρότορα του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, στο οποίο εισέρχονται οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Το τμήμα αυτό του ρότορα μοντελοποιείται ως καθαρός σίδηρος.

Εικόνα 32. Μοντελοποίηση του εξωτερικού δακτύλιου του ρότορα του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Το εσωτερικό του ρότορα στο οποίο δεν διέρχονται οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές μοντελοποιείται ως αέρας και απεικονίζεται στην εικόνα 33.

Εικόνα 33. Μοντελοποίηση του εσωτερικού του ρότορα του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Το τελευταίο τμήμα το οποίο μοντελοποιείται στο Ansys και αφορά το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, είναι τα σημεία εκείνα του εδράνου στα οποία δεν υπάρχει κάποιο υλικό, αλλά μόνο αέρας. Αυτά τα σημεία φαίνονται στην εικόνα 34.

Εικόνα 34. Μοντελοποίηση του αέρα που περιλαμβάνει το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Στη συνέχεια, κατά την προσομοίωση, όλα τα τμήματα του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου που ανήκουν στο ίδιο υλικό ενώνονται ώστε να αποτελούν ένα υλικό. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 35, στην οποία απεικονίζεται το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο συνολικά με χρωματικό διαχωρισμό για κάθε διαφορετικό υλικό. Οι εσωτερικές προεξοχές του στάτη προσομοιώνουν τους οκτώ πόλους του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου. Αριστερά και δεξιά από κάθε πόλο του στάτη φαίνονται τα πηνία. Τα πηνία που ενώνονται μεταξύ τους είναι τα δύο πάνω, τα δύο δεξιά, τα δύο κάτω και τα δύο αριστερά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 35, με διαφορετικά χρώματα.

Εικόνα 35. Μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, ανά υλικό.

Σχετικά με το πλέγμα του μοντέλου για την επίλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η αυτόματη επιλογή του μεγέθους του πλέγματος "automatic (smart) sizing" επιλέχθηκε και το μέγεθος των στοιχείων ορίστηκε στην επιλογή "fine". Το πλέγμα συνολικά φαίνεται στην εικόνα 40.

Το στοιχείο PLANE53 χρησιμοποιήθηκε (εικόνα 36), καθώς είναι κατάλληλο για 2-διαστάσεων μαγνητικά μοντέλα (επίπεδο και αξονοσυμμετρικό). Το στοιχείο αυτό έχει 8 κόμβους και έως 4 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: το Z-τιμήμα του διανύσματος των δυναμικών μαγνητικών γραμμών (A_z), την ολοκλήρωση ως προς το χρόνο του ηλεκτρικού βαθμωτού δυναμικού (VOLT), το ηλεκτρικό ρεύμα (CURR) και την ηλεκτρεγερτική δύναμη (EMF).

Εικόνα 36. Στοιχείο Plane53, για τη μοντελοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο Ansys

Μετά από τη δημιουργία του πλέγματος, προκειμένου να γίνει η επίλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο Ansys, για οριακές συνθήκες θεωρούμε ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές δε βγαίνουν έξω από την περιφέρεια του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, αλλά περιορίζονται μόνο στο εσωτερικό του, όπως φαίνεται στην περίμετρο του στάτη, στην εικόνα 37.

Εικόνα 37. Εφαρμογή οριακών συνθηκών στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Επίσης, ορίζουμε ότι κατά την επίλυση δεν επιτρέπονται αρνητικές τιμές για το ρεύμα που διαρρέει κάθε ζεύγος πόλων και επιλέγουμε να γίνει η επίλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και να δώσει ως αποτέλεσμα τις συνολικές δυνάμεις που δέχεται ο ρότορας από τους ηλεκτρομαγνήτες στις X και Y-διευθύνσεις.

Η μέθοδος Newton-Raphson 2 μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των τιμών των ρευμάτων ελέγχου για τις X και Y-διευθύνσεις, προκειμένου να ισορροπεί ο ρότορας στην επιθυμητή θέση που του ορίζουμε, καθώς η μεταβολή του ρεύματος ελέγχου στη μία διεύθυνση, επηρεάζει τα αποτελέσματα της συνισταμένης δύναμης που δέχεται ο άξονας από τους ηλεκτρομαγνήτες όχι μόνο στην ίδια διεύθυνση, αλλά και στην κάθετη, κυρίως όταν ο άξονας δεν είναι τοποθετημένος στο κέντρο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, αλλά πρέπει να ισορροπήσει σε έγκεντρο σημείο.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, μετά την εύρεση της πρώτης λύσης της δύναμης που απομένει στις δύο διευθύνσεις με επίλυση των εξισώσεων Maxwell, δηλαδή της δύναμης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στην X-διεύθυνση που ασκείται πάνω στον ρότορα μείον το φορτίο του ρότορα στην X-διεύθυνση και της δύναμης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που ασκείται πάνω στον ρότορα στην Y-διεύθυνση μείον το φορτίο του ρότορα στην Y-διεύθυνση, έστω $F_{Xαρχική}$ και $F_{Yαρχική}$, πραγματοποιούμε μία μικρή μεταβολή στην μία μεταβλητή που αναζητούμε την τιμή της, και συγκεκριμένα στο ρεύμα ελέγχου της X-διεύθυνσης, η οποία γίνεται (σε Ampere):

$$\text{Νεο ρευμα ελεγχου}_X = \text{ρευμα ελεγχου}_X + 0.1 \quad (89)$$

διατηρώντας τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αμετάβλητα.

Μετά τη μεταβολή αυτή, πραγματοποιείται επίλυση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και βρίσκουμε τους λόγους των διαφορών των δυνάμεων που προκύπτουν, προς τη μεταβολή του ρεύματος ελέγχου που πραγματοποιήθηκε, δηλαδή:

$$\Delta_{FX} \text{ λογω } \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου } X} = \frac{F_X - F_{Xαρχική}}{0.1} \quad (90)$$

και

$$\Delta_{FY} \text{ λογω } \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου } X} = \frac{F_Y - F_{Yαρχική}}{0.1} \quad (91)$$

Στη συνέχεια, επαναφέρουμε το ρεύμα ελέγχου της X-διεύθυνσης στην αρχική του τιμή, και πραγματοποιούμε μικρή μεταβολή στην άλλη μεταβλητή, και συγκεκριμένα στο ρεύμα ελέγχου της Y-διεύθυνσης, η οποία γίνεται (σε Ampere):

$$\text{Νεο ρευμα ελεγχου}_Y = \text{ρευμα ελεγχου}_Y + 0.1 \quad (92)$$

διατηρώντας τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αμετάβλητα.

Μετά τη μεταβολή αυτή, πραγματοποιείται επίλυση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και βρίσκουμε τους λόγους των διαφορών των δυνάμεων, προς τη μεταβολή του ρεύματος ελέγχου που πραγματοποιήθηκε, δηλαδή:

$$\Delta_{FX} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου Y}} = \frac{F_X - F_{\text{Χαρχικη}}}{0.1} \quad (93)$$

και

$$\Delta_{FY} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου Y}} = \frac{F_Y - F_{\text{Υαρχικη}}}{0.1} \quad (94)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε:

$$\Delta = (\Delta_{FX} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου X}} \cdot \Delta_{FY} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου Y}}) - (\Delta_{FY} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου X}} \cdot \Delta_{FX} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου Y}}) \quad (95)$$

Επαναφέρουμε το ρεύμα ελέγχου της Y-διεύθυνσης στην αρχική του τιμή, και υπολογίζουμε:

$$\text{Βημα ρευματος ελεγχου X} = (-F_{\text{Χαρχικη}} \cdot \Delta_{FY} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου Y}} + F_{\text{Υαρχικη}} \cdot \Delta_{FX} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου Y}}) / \Delta \quad (96)$$

$$\text{Βημα ρευματος ελεγχου Y} = (-F_{\text{Υαρχικη}} \cdot \Delta_{FX} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου X}} + F_{\text{Χαρχικη}} \cdot \Delta_{FY} \lambda \omega \Delta_{\text{ρευμα ελεγχου X}}) / \Delta \quad (97)$$

και οι νέες τιμές των δύο μεταβλητών είναι:

$$\text{Νεο ρευμα ελεγχου X} = \text{ρευμα ελεγχου X} + \text{Βημα ρευματος ελεγχου X} \quad (98)$$

$$\text{Νεο ρευμα ελεγχου Y} = \text{ρευμα ελεγχου Y} + \text{Βημα ρευματος ελεγχου Y} \quad (99)$$

Με τις παραπάνω μεταβολές στα ρεύματα ελέγχου στις X και Y-διευθύνσεις, γίνεται επίλυση και υπολογίζουμε τις νέες δυνάμεις $F_{\text{X2αρχικη}}$ και $F_{\text{Y2αρχικη}}$.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς, μέχρι να ισχύουν και οι δύο παρακάτω συνθήκες τερματισμού της μεθόδου Newton-Raphson 2 μεταβλητών:

$$|\text{Νεο ρευμα ελεγχου X} - \text{ρευμα ελεγχου X}| < 10^{-3} \quad (100)$$

$$|\text{Νεο ρευμα ελεγχου Y} - \text{ρευμα ελεγχου Y}| < 10^{-3} \quad (101)$$

Ορίζουμε ως μέγιστο αριθμό επαναλήψεων για τη μέθοδο Newton-Raphson 2 μεταβλητών τις 20 φορές.

Στην εικόνα 38, απεικονίζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, με χρήση της μεθόδου Newton-Raphson 2 μεταβλητών. Ο άξονας Y συμβολίζει τη συνισταμένη δύναμη των δύο διευθύνσεων X και Y:

$$\sqrt{(F_{\text{XΝαρχικη}} - \text{Φορτίο X})^2 + (F_{\text{YΝαρχικη}} - \text{Φορτίο Y})^2} \quad (102)$$

δηλαδή, το σφάλμα που απομένει. Ο άξονας X συμβολίζει τον αριθμό των επαναλήψεων. Παρατηρούμε ότι μετά από μόνο τρεις επαναλήψεις, η επίλυση έχει ολοκληρωθεί με συνισταμένη δύναμη 0.000679 Newton, παρόλο που στην πρώτη επανάληψη η συνισταμένη δύναμη ήταν 9.128 Newton.

Εικόνα 38. Αποτελέσματα επίλυσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη μέθοδο Newton-Raphson 2 μεταβλητών

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν μέσω του ANSYS, με αποτελέσματα προηγούμενων εργασιών.

Τα αποτελέσματα του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου της εργασίας αυτής επιβεβαιώθηκαν με τα αποτελέσματα των Antila M., Lantto E. και Arkkio A. [84].

Αρχικά, δημιουργήθηκε η γεωμετρία του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, σύμφωνα με τα δεδομένα των Antila M., Lantto E. και Arkkio A. [84], όπως φαίνεται στην εικόνα 39. Η διάμετρος του στάτη είναι 164 mm, το μήκος του εδράνου είναι 45 mm, η διάμετρος του ρότορα είναι 93 mm, το μαγνητικό διάκενο είναι 0.44 mm, ο αριθμός των περιελίξεων ανά πόλο είναι 100, το πλάτος του κάθε πόλου είναι 18 mm, η εσωτερική διάμετρος του εδράνου είναι 127 mm και το πάχος του εξωτερικού δακτυλίου του ρότορα 14.35 mm. Τέλος, το βάρος του ρότορα είναι 300 N.

Εικόνα 39. Μοντελοποίηση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο PLANE53. Δημιουργήθηκαν 5280 στοιχεία και 15895 κόμβοι (εικόνα 40).

Εικόνα 40. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές απεικονίζονται στην εικόνα 41.

Εικόνα 41. Μαγνητικές δυναμικές γραμμές ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου

Επίσης, ως αποτέλεσμα εξάγουμε και το διάγραμμα που δείχνει τη φορά της μαγνητικής ροής, η οποία εξαρτάται από την πολικότητα τροφοδοσίας των πηνίων, όπως φαίνεται στην εικόνα 42.

Εικόνα 42. Φορά μαγνητικής ροής στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Τέλος, εξάγουμε και το διάγραμμα που δείχνει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Εικόνα 43. Πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Στην εικόνα 44 απεικονίζεται το διάγραμμα της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης που ασκεί το έδρανο στον ρότορα, συναρτήσει του ρεύματος ελέγχου. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης που έγινε στην εργασία αυτή, φαίνεται ότι προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα αποτελέσματα των Antila M., Lantto E. και Arkkio A. [84]. Οι διαφοροποιήσεις είναι λόγω των μη-γραμμικών μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών και λόγω της επιφάνειας των πηνίων, τα οποία δεν προσδιορίζονται από τον Antila M. και τους υπόλοιπους [84] με ακρίβεια. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της εργασίας αυτής, η επιφάνεια των πηνίων είναι $159.93 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.

Εικόνα 44. Δύναμη που ασκείται στον ρότορα του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου συναρτήσει του ρεύματος ελέγχου

Για τον υπολογισμό των συντελεστών ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C) χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα Ansys.

Συγκεκριμένα, μετά την επίλυση και την εύρεση των απαιτούμενων ρευμάτων ελέγχου για τις X και Y-διευθύνσεις ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία του ρότορα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο και ενώ έχουμε αποθηκεύσει τα αποτελέσματα της ισορροπίας, πραγματοποιούμε μία μετατόπιση του ρότορα κατά την X-διεύθυνση η οποία ισούται με $+10\mu\text{m}$, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει αυτή τη μετατόπιση, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε. Στη συνέχεια, επαναφέρουμε τον ρότορα στην αρχική του X-θέση και πραγματοποιούμε μία μετατόπιση του ρότορα κατά τη X-διεύθυνση η οποία ισούται με $-10\mu\text{m}$, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει και αυτή τη μετατόπιση, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε.

Στη συνέχεια, επαναφέρουμε τον ρότορα στην αρχική του X-θέση και τον μετατοπίζουμε κατά την Y-διεύθυνση απόσταση ίση με $+10\mu\text{m}$, διατηρώντας όλα τα

υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει αυτή τη μετατόπιση, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε. Στη συνέχεια, επαναφέρουμε τον ρότορα στην αρχική του Y-θέση και πραγματοποιούμε μία μετατόπιση του ρότορα κατά τη Y-διεύθυνση η οποία ισούται με -10μm, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει και αυτή τη μετατόπιση, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε.

Οι συντελεστές ελαστικότητας θέσης (K_s), πρακτικά υπολογίζονται ως εξής:

$$K_{Xx}^{EME} = \frac{F_{X\log\omega\Delta x+} - F_{X\log\omega\Delta x-}}{2 \cdot \Delta x} = \frac{F_{X\log\omega\Delta x+} - F_{X\log\omega\Delta x-}}{100 \cdot 10^{-6}} \quad (103)$$

$$K_{Yx}^{EME} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta x+} - F_{Y\log\omega\Delta x-}}{2 \cdot \Delta x} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta x+} - F_{Y\log\omega\Delta x-}}{100 \cdot 10^{-6}} \quad (104)$$

$$K_{Xy}^{EME} = \frac{F_{X\log\omega\Delta y+} - F_{X\log\omega\Delta y-}}{2 \cdot \Delta y} = \frac{F_{X\log\omega\Delta y+} - F_{X\log\omega\Delta y-}}{100 \cdot 10^{-6}} \quad (105)$$

$$K_{Yy}^{EME} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta y+} - F_{Y\log\omega\Delta y-}}{2 \cdot \Delta y} = \frac{F_{Y\log\omega\Delta y+} - F_{Y\log\omega\Delta y-}}{100 \cdot 10^{-6}} \quad (106)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών ελαστικότητας ρεύματος, επαναφέρουμε όλες τις αποθηκευμένες τιμές που είχαμε από την ισορροπία του ρότορα μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο και πραγματοποιούμε μία μεταβολή του ρεύματος ελέγχου της X-διεύθυνσης κατά +0.1Ampere, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει αυτή τη μεταβολή, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε. Στη συνέχεια, επαναφέρουμε την τιμή του ρεύματος ελέγχου της X-διεύθυνσης στην αρχική της τιμή και πραγματοποιούμε μία μεταβολή του ρεύματος ελέγχου της X-διεύθυνσης κατά -0.1Ampere, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει και αυτή τη μεταβολή, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε.

Στη συνέχεια, επαναφέρουμε την τιμή του ρεύματος ελέγχου της X-διεύθυνσης στην αρχική της τιμή και πραγματοποιούμε μία μεταβολή του ρεύματος ελέγχου της Y-διεύθυνσης κατά +0.1Ampere, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει αυτή τη μεταβολή, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε. Στη συνέχεια, επαναφέρουμε την τιμή του ρεύματος ελέγχου της Y-διεύθυνσης στην αρχική της τιμή και πραγματοποιούμε μία μεταβολή του ρεύματος ελέγχου της Y-διεύθυνσης κατά -0.1Ampere, διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σταθερά. Έχοντας κάνει και αυτή τη μεταβολή, υπολογίζουμε τις καινούριες δυνάμεις που ασκεί στον ρότορα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τις αποθηκεύουμε.

Οι συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος (K_I), πρακτικά υπολογίζονται ως εξής:

$$K_{XI}^{EME} = \frac{F_{X\log\omega\Delta Ix+} - F_{X\log\omega\Delta Ix-}}{2 \cdot \Delta Ix} = \frac{F_{X\log\omega\Delta Ix+} - F_{X\log\omega\Delta Ix-}}{2 \cdot 0.1} \quad (107)$$

$$K_{YIx}^{EME} = \frac{F_{Y\lambda o\gamma\omega\Delta Ix+} - F_{Y\lambda o\gamma\omega\Delta Ix-}}{2 \cdot \Delta Ix} = \frac{F_{Y\lambda o\gamma\omega\Delta Ix+} - F_{Y\lambda o\gamma\omega\Delta Ix-}}{2 \cdot 0.1} \quad (108)$$

$$K_{XIy}^{EME} = \frac{F_{X\lambda o\gamma\omega\Delta Iy+} - F_{X\lambda o\gamma\omega\Delta Iy-}}{2 \cdot \Delta Iy} = \frac{F_{X\lambda o\gamma\omega\Delta Iy+} - F_{X\lambda o\gamma\omega\Delta Iy-}}{2 \cdot 0.1} \quad (109)$$

$$K_{YIy}^{EME} = \frac{F_{Y\lambda o\gamma\omega\Delta Iy+} - F_{Y\lambda o\gamma\omega\Delta Iy-}}{2 \cdot \Delta Iy} = \frac{F_{Y\lambda o\gamma\omega\Delta Iy+} - F_{Y\lambda o\gamma\omega\Delta Iy-}}{2 \cdot 0.1} \quad (110)$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών απόσβεσης (C) του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, χρησιμοποιούμε την εξίσωση (73).

Οι συντελεστές απόσβεσης (C), πρακτικά υπολογίζονται ως εξής:

$$C_{Xx}^{EME} = \sqrt{\frac{-mK_{Xx}^{EME}}{2K_{XIx}^{EME}}} \quad (111)$$

$$C_{Yy}^{EME} = \sqrt{\frac{-mK_{Yy}^{EME}}{2K_{YIy}^{EME}}} \quad (112)$$

Οι συντελεστές ελαστικότητας (K) του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου που υπολογίστηκαν μέσω του ANSYS, επαληθεύθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των Antila M., Lantto E. και Arkkio A. [84]. Στην εικόνα 45 και στην εικόνα 46, φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα του συντελεστή ελαστικότητας θέσης K_s και του συντελεστή ελαστικότητας ρεύματος K_I του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, αντίστοιχα.

Εικόνα 45. Συντελεστής ελαστικότητας θέσης συνάρτησε του ρεύματος ελέγχου, για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο

Εικόνα 46. Συντελεστής ελαστικότητας ρεύματος συναρτήσεως του ρεύματος ελέγχου, για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο

Τα αποτελέσματα έχουν καλή προσέγγιση. Παρατηρείται αύξηση της απόκλισης των λύσεων των πεπερασμένων στοιχείων σε σχέση με τη γραμμική θεωρία καθώς αυξάνει το ρεύμα ελέγχου, λόγω του κορεσμού των υλικών. Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο λύσεων των πεπερασμένων στοιχείων είναι λόγω των μικρών διαφορών των διαγραμμάτων $B-H$ που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των μη-γραμμικών μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών και λόγω των διαφορών στις τιμές της επιφάνειας των πηνίων.

Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της γεωμετρίας των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων, ανάλυση των εξισώσεων που τα αφορούν, ανάλυση των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης του ρότορα μέσα σε αυτά τα έδρανα και η μοντελοποίηση και προσομοίωση με παραμετρικό τρόπο της λειτουργίας τους στο πρόγραμμα Ansys, το οποίο επιλύει τις εξισώσεις Maxwell και δίνει τα αποτελέσματα για τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα.

Τα αποτελέσματα που δίνει το Ansys όπως προγραμματίστηκε στη συγκεκριμένη εργασία, είναι το κατάλληλο ρεύμα ελέγχου για τις διευθύνσεις X και Y, ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία των δυνάμεων για το συγκεκριμένο επιθυμητό σημείο ισορροπίας του ρότορα κάθε φορά και για το επιθυμητό φορτίο που δέχεται ο ρότορας, οι συντελεστές ελαστικότητας θέσης και οι συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος.

Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η προσομοίωση δίνει ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελέσματα σε σύγκριση με άλλες εργασίες.

Αυτά τα αποτελέσματα το Ansys αποθηκεύει σε αρχεία txt, τα οποία θα χρειαστούν στη συνέχεια.

Η προσομοίωση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο πρόγραμμα Ansys αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο δεν έγινε αναφορά στον έλεγχο των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων. Ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων πραγματοποιείται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3

Σχεδιασμός Συστήματος Ελέγχου Ενεργών Ηλεκτρομαγνητικών Εδράνων

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναφερθούμε στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων. Τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα είναι ασταθή χωρίς την παρουσία του κατάλληλου ελεγκτή. Ο ρότορας δεν μπορεί να αιωρηθεί και να διατηρηθεί σε συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας με μόνο σταθερό ρεύμα στα πηνία. Χρειάζεται και το ρεύμα ελέγχου που ο ελεγκτής δίνει στα πηνία, το οποίο μεταβάλλεται συνεχώς και με τέτοιο τρόπο ώστε να ασκούνται οι κατάλληλες δυνάμεις στον ρότορα και να παραμένει σταθερός στο επιθυμητό σημείο.

Οι συντελεστές ελαστικότητας θέσης των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων έχουν αρνητικές τιμές. Οι συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος όμως, που εξαρτώνται από το σύστημα ελέγχου καθώς και οι συντελεστές απόσβεσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου έχουν θετικές τιμές και έτσι, με το κατάλληλο ρεύμα ελέγχου σταθεροποιούν τον ρότορα στην επιθυμητή θέση που ορίζουμε, μέσω του συστήματος ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Ο κατάλληλος σχεδιασμός του ελεγκτή, μπορεί να δώσει τις ακόλουθες δυνατότητες παρακολούθησης και διάγνωσης:

- Παρακολούθηση της μετατόπισης του ρότορα σε πραγματικό χρόνο.
- Μέτρηση και παρακολούθηση των εφαρμοζόμενων δυνάμεων σε πραγματικό χρόνο.
- Μέτρηση και παρακολούθηση της αζυγοσταθμίας του ρότορα σε πραγματικό χρόνο.
- Αναγνώριση και παρακολούθηση εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται στον ρότορα.
- Αναγνώριση των κρίσιμων ταχυτήτων, των ιδιοτιμών και των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος ρότορα-εδράνων.
- Εύρεση της ικανότητας απόκρισης λόγω της αρμονικής διέγερσης, ή λόγω στιγμιαίας φόρτισης.

Ο ελεγκτής που θα παρουσιαστεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι ελεγκτής PID, ο οποίος μοντελοποιείται στο Matlab και στο Simulink module του Matlab. Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει ανάλυση του τρόπου μοντελοποίησης και προσομοίωσης του ελεγκτή PID στο Matlab και στο Simulink module του Matlab, ανάλυση του τρόπου σύνδεσης του Matlab με το πρόγραμμα Ansys προκειμένου να εισάγονται και να εξάγονται δεδομένα από το ένα πρόγραμμα στο άλλο, ανάλυση του τρόπου εύρεσης των κερδών P, I και D και ανάλυση των αποτελεσμάτων που αφορούν την τροχιά του ρότορα και τα ρεύματα ελέγχου για τις X και Y-διευθύνσεις.

Η μοντελοποίηση της προσομοίωσης του ελεγκτή των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων γίνεται χρησιμοποιώντας τις μη-γραμμικές μαγνητικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, με σκοπό να μπορούμε να δούμε την πραγματική κίνησή του και όχι τη

γραμμικοποιημένη. Αυτό θα μας χρειαστεί, διότι θα πρέπει να μπορούμε να μετακινούμε τον ρότορα σε ένα σύνολο διαφορετικών σημείων ισορροπίας εντός του εδράνου και όχι να παραμένει ο ρότορας μόνο σε ένα σημείο ισορροπίας και συγκεκριμένα στο κέντρο του εδράνου και να κινείται γύρω και πολύ κοντά σε αυτό το σημείο ισορροπίας, όπως συμβαίνει στην πλειονότητα των άλλων εργασιών που αναφέρονται σε έλεγχο ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων. Επίσης, η μοντελοποίηση του ελεγκτή στο Matlab και στο Simulink module του Matlab γίνεται με παραμετρικό τρόπο, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα τροποποίησης των χαρακτηριστικών του ελεγκτή και των χαρακτηριστικών των εδράνων, με σκοπό την καλύτερη επιλογή των κερδών του ελεγκτή για κάθε περίπτωση.

Το σύστημα ελέγχου που θα περιγράψουμε στη συνέχεια, αναφέρεται στη χρήση γραμμικοποιημένου PID ελεγκτή σε μη-γραμμικό μοντέλο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, όπως αυτές περιγράφονται από τις εξισώσεις των δυνάμεων στις X και Y-διευθύνσεις, εξισώσεις (44) και (46).

Προκειμένου να βρούμε τα κέρδη του ελεγκτή PID, χρησιμοποιούμε τις γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, οι οποίες περιγράφονται από τις εξισώσεις των δυνάμεων στις X και Y-διευθύνσεις (71) και (72). Οι γραμμικές αυτές εξισώσεις αναφέρονται στο κέντρο του εδράνου αυτού. Επομένως, τα κέρδη PID που θα βρούμε μέσω των γραμμικών αυτών εξισώσεων θα είναι βέλτιστα για το κέντρο του εδράνου. Όμως, εφόσον θα χρησιμοποιήσουμε κατά την προσομοίωση τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα, θα έχουμε τη δυνατότητα να δούμε την πραγματική συμπεριφορά της κίνησης του ρότορα, όταν αυτός θα κινείται σε οποιαδήποτε περιοχή επιθυμούμε, εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, με τη χρήση των συγκεκριμένων κερδών του PID ελεγκτή.

Επομένως, θα μετασχηματίσουμε τις γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Laplace και στη συνέχεια θα αναπτύξουμε το μοντέλο ελέγχου στο Matlab και στο Simulink module του Matlab. Τα κέρδη PID προκύπτουν μέσω της robust μεθόδου ελέγχου, στο Single-Input-Single-Output (SISO) εργαλείο του Matlab. Επίσης, στη μοντελοποίηση αυτή λαμβάνουμε υπόψη την αζυγοσταθμία του ρότορα, το γυροσκοπικό φαινόμενο καθώς και το μέγιστο όριο έντασης ρεύματος με το οποίο επιτρέπεται να τροφοδοτούνται τα πηνία.

Ως αποτελέσματα έχουμε την απόκριση του ρότορα, την υπερακόντισή του, την τροχιά του, την ταχύτητά του και τα ρεύματα ελέγχου για τις X και Y-διευθύνσεις.

Ο σχεδιασμός του ελεγκτή των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο πρόγραμμα Matlab και στο Simulink module του Matlab αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει έλεγχο ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και του ρότορα, φαίνονται στην εικόνα 47. Ο τρόπος σύνδεσης των πηνίων είναι τέτοιος ώστε να δημιουργούνται ζεύγη πόλων στις X και Y-διευθύνσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 18.

Εικόνα 47. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και του ρότορα

Οι διαστάσεις του ρότορα που θα προσομοιώσουμε, φαίνονται στην εικόνα 48.

Εικόνα 48. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρότορα

Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου

Το σχηματικό διάγραμμα του ελέγχου του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου φαίνεται στην εικόνα 49.

Εικόνα 49. Σχηματικό διάγραμμα ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου.

Ένα απλό σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου για ένα βαθμό ελευθερίας, για την X και Y-διεύθυνση, φαίνεται στις εικόνες 50 και 51.

Εικόνα 50. Σχηματικό διάγραμμα ενός βαθμού ελευθερίας ενεργού ηλεκτρομαγνητικού
εδράνου για την Χ-διεύθυνση

Εικόνα 51. Σχηματικό διάγραμμα ενός βαθμού ελευθερίας ενεργού ηλεκτρομαγνητικού
εδράνου για την Υ-διεύθυνση

Εξισώσεις κίνησης του ρότορα μέσα στο ΕΜΕ, με αζυγοσταθμία του ρότορα

Ο ρότορας που όπως αναφέρθηκε, έχει τις διαστάσεις που φαίνονται στην εικόνα 48, στο αριστερό άκρο του είναι στερεωμένος στο τσοκ του ηλεκτροκινητήρα που τον περιστρέφει. Αυτό το τσοκ περιορίζει τις μετατοπίσεις του άξονα σε όλες τις διευθύνσεις και αφήνει ελεύθερη την περιστροφή του γύρω από τους άξονες X, Y και Z, όπως φαίνεται στην εικόνα 52.

Εικόνα 52. Συστήματα συντεταγμένων – κινήσεις και περιστροφές του ρότορα

Το κυλινδρικό τμήμα του ρότορα (εικόνα 52, τμήμα R), στο οποίο ενεργούν οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις από το έδρανο, βρίσκεται σε απόσταση L από το αριστερό άκρο του ρότορα. Υπό κανονικές συνθήκες, χωρίς αζυγοσταθμία του ρότορα, οι Z και K-άξονες είναι ευθυγραμμισμένοι. Στην πραγματικότητα όμως, υπάρχει μία απόκλιση. Στην εικόνα 52 β, φαίνεται ότι ο K-άξονας είναι περιστραμμένος κατά μία γωνία θ_Y σε σχέση με τον Z-άξονα, γύρω από τον Y-άξονα και μία ροπή M_Y εφαρμόζεται γύρω από τον Y-άξονα. Γύρω από τον X-άξονα, η γωνία περιστροφής του ρότορα από τον Z-άξονα μέχρι τον K-άξονα είναι θ_X και η ροπή γύρω από τον X-άξονα είναι M_X , όπως φαίνεται στην εικόνα 52 γ.

Οι δυνάμεις της αζυγοσταθμίας του ρότορα είναι:

$$\begin{Bmatrix} F_{aζυγX} \\ F_{aζυγY} \end{Bmatrix} = m_{aζυγ} \Omega^2 d_{aζυγ} \begin{Bmatrix} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) \\ \eta\mu(\Omega t) \end{Bmatrix} \quad (113)$$

όπου $m_{aζυγ}$ είναι η μάζα της αζυγοσταθμίας, Ω είναι η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα και $d_{aζυγ}$ είναι η απόσταση του κέντρου βάρους της μάζας της αζυγοσταθμίας από τον άξονα περιστροφής του ρότορα.

Εάν υποθέσουμε ότι η μάζα της αζυγοσταθμίας βρίσκεται σε απόσταση $L_{aζυγ}$ από το αριστερό άκρο του ρότορα (εικόνα 52 α), τότε οι δυνάμεις λόγω της αζυγοσταθμίας, στο σημείο όπου βρίσκεται το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο (εικόνα 52 α, τμήμα R), είναι:

$$\begin{Bmatrix} F_{aζυγX} \\ F_{aζυγY} \end{Bmatrix} = m_{aζυγ} \Omega^2 d_{aζυγ} \begin{Bmatrix} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) \\ \eta\mu(\Omega t) \end{Bmatrix} \cdot \frac{L_{aζυγ}}{L} \quad (114)$$

Ο μετασχηματισμός Laplace της εξίσωσης (114), στον Y-άξονα είναι:

$$\begin{aligned} F_{aζυγY} &= m_{aζυγ} \Omega^2 d_{aζυγ} \eta\mu(\Omega t) \cdot \frac{L_{aζυγ}}{L} \Rightarrow \\ F_{aζυγY}(s) &= m_{aζυγ} \Omega^2 d_{aζυγ} \frac{L_{aζυγ}}{L} \cdot \frac{\Omega}{s^2 + \Omega^2} \end{aligned} \quad (115)$$

Επομένως, για την Y-διεύθυνση, η συνάρτηση μεταφοράς (εξίσωση (159)), στην περίπτωση όπου έχουμε και αζυγοσταθμία, λόγω της εξίσωσης (115), γίνεται:

$$\begin{aligned} \frac{y(s)}{F_{aζυγY}(s)} &= \frac{s}{ms^3 + K_{sn} K_D s^2 + (K_{sn} K_P + K_{Yy})s + K_{sn} K_I} \Rightarrow \\ \frac{y(s)}{m_{aζυγ} \Omega^2 d_{aζυγ} \frac{L_{aζυγ}}{L} \cdot \frac{\Omega}{s^2 + \Omega^2}} &= \frac{s}{ms^3 + K_{sn} K_D s^2 + (K_{sn} K_P + K_{Yy})s + K_{sn} K_I} \end{aligned} \quad (116)$$

Εξισώσεις κίνησης του ρότορα μέσα στο ΕΜΕ, με αζυγοσταθμία και γυροσκοπικό φαινόμενο του ρότορα

Στη συνέχεια, θα εισάγουμε τις εξισώσεις του γυροσκοπικού φαινομένου του ρότορα και θα τις συνδυάσουμε με τις εξισώσεις της αζυγοσταθμίας του ρότορα (εξίσωση (114)) και τις εξισώσεις των δυνάμεων που ασκεί το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο (εξισώσεις (44) και (46)) για τις X και Y-διευθύνσεις, με σκοπό να βρούμε τις τελικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Όσον αφορά το γυροσκοπικό φαινόμενο, στην εικόνα 52, φαίνονται το σταθερό σύστημα συντεταγμένων XYZ και το περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων IJK. Οι διευθύνσεις και φορές για τους άξονες και τις γωνίες ορίζονται σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Ο ρότορας περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα Ω γύρω από τον K-άξονα. Το αριστερό άκρο του ρότορα θεωρούμε ότι είναι σταθερό, στην αρχή των συστημάτων συντεταγμένων, ενώ το δεξί άκρο βρίσκεται μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Θεωρούμε I_I και I_K τις ροπές αδράνειας γύρω από τον I και K-άξονα αντίστοιχα. Ισχύει ότι $I_I = I_K$, λόγω συμμετρίας [86].

Οι ροπές που ασκούνται στον ρότορα, συμπεριλαμβάνοντας και το γυροσκοπικό φαινόμενο είναι:

$$\begin{aligned} I_I \ddot{\theta}_X &= -\Omega I_K \dot{\theta}_Y + M_X \\ I_I \ddot{\theta}_Y &= \Omega I_K \dot{\theta}_X + M_Y \end{aligned} \quad (117)$$

Παρατηρούμε ότι οι γυροσκοπικοί όροι εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής Ω στον Z-άξονα, από τη ροπή αδράνειας I_K στον K-άξονα και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα γύρω από τον κάθετο άξονα σε σχέση με τον άξονα που υπολογίζουμε την επιτάχυνση.

Το γυροσκοπικό φαινόμενο είναι πιο έντονο σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής του ρότορα Ω ή στις περιπτώσεις όπου έχουμε μεγάλες τιμές ροπών αδράνειας γύρω από τον άξονα περιστροφής του ρότορα.

Από την εικόνα 52 βλέπουμε ότι ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} x &= L \sin \theta_Y \cong L \theta_Y \\ y &= -L \sin \theta_X \cong -L \theta_X \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (118)$$

$$\begin{aligned} \theta_Y &= \frac{x}{L} & \dot{\theta}_Y &= \frac{\dot{x}}{L} & \ddot{\theta}_Y &= \frac{\ddot{x}}{L} \\ \theta_X &= -\frac{y}{L} & \dot{\theta}_X &= -\frac{\dot{y}}{L} & \ddot{\theta}_X &= -\frac{\ddot{y}}{L} \end{aligned} \quad (119)$$

$$\begin{aligned} L \sin \theta_X &\cong L \\ \text{και} \quad L_a \sin \theta_X &\cong L_a \\ L_{ub} \sin \theta_X &\cong L_{ub} \end{aligned} \quad (120)$$

Λόγω της εξίσωσης (118), η εξίσωση (117) γίνεται:

$$\left. \begin{aligned} I_I \ddot{\theta}_X &= -\Omega I_K \dot{\theta}_Y + M_X \\ I_I \ddot{\theta}_Y &= \Omega I_K \dot{\theta}_X + M_Y \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} -I_I \frac{\ddot{y}}{L} &= -\Omega I_K \frac{\dot{x}}{L} + M_X \\ I_I \frac{\ddot{x}}{L} &= -\Omega I_K \frac{\dot{y}}{L} + M_Y \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (121)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \frac{\Omega I_K}{I_I} \dot{x} - \frac{L}{I_I} M_X \\ \ddot{x} &= -\frac{\Omega I_K}{I_I} \dot{y} + \frac{L}{I_I} M_Y \end{aligned} \quad (122)$$

Εάν υποθέσουμε ότι το κέντρο βάρους του ρότορα βρίσκεται σε απόσταση L_a από το αριστερό άκρο του ρότορα, τότε το βάρος του ρότορα πρέπει να συνυπολογιστεί στις ροπές που περιλαμβάνει η εξίσωση (122). Γύρω από τον X-άξονα, η ροπή λόγω του βάρους του ρότορα (M_{gx}) είναι:

$$M_{gx} = mg_a L_a \sin \theta_X \cong mg_a L_a \quad (123)$$

Άλλες εξωτερικές δυνάμεις που προκαλούν ροπές στον ρότορα, είναι οι δυνάμεις που ασκούνται μέσω του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στην X και στην Y-διεύθυνση. Οι δυνάμεις αυτές είναι οι F_{1Y} και F_{2Y} , F_{1X} και F_{2X} , όπως φαίνονται στις εικόνες 50 και 51. Εάν ορίσουμε M_{bX} τη ροπή γύρω από τον X-άξονα, λόγω των μαγνητικών δυνάμεων στην Y-διεύθυνση, τότε έχουμε:

$$M_{bX} = -(F_{1Y} - F_{2Y})L \quad (124)$$

και εάν ορίσουμε M_{bY} τη ροπή γύρω από τον Y-άξονα, λόγω των μαγνητικών δυνάμεων στην X-διεύθυνση, τότε έχουμε:

$$M_{bY} = (F_{1X} - F_{2X})L \quad (125)$$

Επίσης, δυνάμεις που προκαλούν ροπές στον ρότορα είναι και οι εξωτερικές δυνάμεις που μπορούμε να ασκήσουμε. Εάν είναι $F_{e\zeta Y}$ οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στον ρότορα στην Y-διεύθυνση και ενεργούν σε απόσταση $L_{Fe\zeta Y}$ από το αριστερό άκρο του ρότορα, όπως φαίνεται στην εικόνα 52, τότε οι ροπές των δυνάμεων αυτών είναι:

$$M_{Fe\zeta X} = F_{e\zeta Y} \cdot L_{Fe\zeta Y} \quad (126)$$

Τέλος, δυνάμεις που προκαλούν ροπές στον ρότορα, είναι οι δυνάμεις λόγω της αζυγοσταθμίας του, όπως αυτές περιγράφηκαν στην εξίσωση (113). Η ροπή των δυνάμεων της αζυγοσταθμίας είναι:

$$\left. \begin{aligned} M_{a\zeta\gamma X} &= -F_{a\zeta\gamma Y} L_{a\zeta\gamma} \\ M_{a\zeta\gamma Y} &= F_{a\zeta\gamma X} L_{a\zeta\gamma} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} M_{a\zeta\gamma X} &= -m_{a\zeta\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma} \\ M_{a\zeta\gamma Y} &= m_{a\zeta\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma} \end{aligned} \quad (127)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (123), (124), (125), (126) και (127), οι ροπές M_X και M_Y της εξίσωσης (122) είναι:

$$\left. \begin{aligned} M_X &= M_{gX} + M_{bX} + M_{a\zeta\gamma X} + M_{Fe\zeta X} \\ M_Y &= M_{bY} + M_{a\zeta\gamma Y} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} M_X &= mg_a L_a - (F_{1Y} - F_{2Y})L - m_{a\zeta\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma} + F_{e\zeta Y} \cdot L_{Fe\zeta Y} \\ M_Y &= (F_{1X} - F_{2X})L + m_{a\zeta\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma} \end{aligned} \quad (128)$$

Επομένως, η εξίσωση (122) γράφεται λόγω της εξίσωσης (128) ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y} &= \frac{\Omega I_K}{I_I} \dot{x} - \frac{L}{I_I} \left(mg_a L_a - (F_{1Y} - F_{2Y})L - m_{a\zeta\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma} + F_{e\zeta Y} \cdot L_{Fe\zeta Y} \right) \\ \ddot{x} &= -\frac{\Omega I_K}{I_I} \dot{y} + \frac{L}{I_I} \left((F_{1X} - F_{2X})L + m_{a\zeta\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma} \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (129)$$

$$\ddot{y} = \frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{x} - \frac{mg_a L_a L}{I_1} + \frac{L^2}{I_1} (F_{1Y} - F_{2Y}) + \frac{m_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} - \frac{F_{\varepsilon\zeta Y} \cdot L_{F\varepsilon\zeta Y} L}{I_1} \quad (130)$$

$$\ddot{x} = -\frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{y} + \frac{L^2}{I_1} (F_{1X} - F_{2X}) + \frac{m_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma\gamma} L}{I_1}$$

Άρα, οι τελικές μη-γραμμικές εξισώσεις της κίνησης του ρότορα μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα του ρότορα, την αζυγοσταθμία, το γυροσκοπικό φαινόμενο και τις εξωτερικές δυνάμεις που δέχεται ο ρότορας, είναι:

$$\begin{aligned} \ddot{y} = & \frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{x} - \frac{mg_a L_a L}{I_1} + \frac{L^2}{I_1} \left(\mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bY} + I_{cY}}{g - y} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - I_{cY}}{g + y} \right)^2 \right] \right) + \\ & \frac{m_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} - \frac{F_{\varepsilon\zeta Y} \cdot L_{F\varepsilon\zeta Y} L}{I_1} \\ \ddot{x} = & -\frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{y} + \frac{L^2}{I_1} \left(\mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bX} + I_{cX}}{g - x} \right)^2 - \left(\frac{I_{bX} - I_{cX}}{g + x} \right)^2 \right] \right) + \\ & \frac{m_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} \end{aligned} \quad (131)$$

ή οι τελικές γραμμικές εξισώσεις, σύμφωνα και με τις εξισώσεις (65) και (68), της κίνησης του ρότορα μέσα στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα του ρότορα, την αζυγοσταθμία, το γυροσκοπικό φαινόμενο και τις εξωτερικές δυνάμεις που δέχεται ο ρότορας, είναι:

$$\begin{aligned} \ddot{y} = & \frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{x} - \frac{mg_a L_a L}{I_1} + \frac{L^2}{I_1} (K_{yI} I_{cY} - K_{Yy} y) + \frac{m_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} - \\ & \frac{F_{\varepsilon\zeta Y} \cdot L_{F\varepsilon\zeta Y} L}{I_1} \\ \ddot{x} = & -\frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{y} + \frac{L^2}{I_1} (K_{xI} I_{cX} - K_{Xx} x) + \frac{m_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} \end{aligned} \quad (132)$$

Στις προσομοιώσεις μας στο Matlab, η εξίσωση (132) χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση του ρότορα στις X και Y-διευθύνσεις. Προκειμένου να επιλύεται η εξίσωση (132) από το Matlab, ορίζουμε $X_1=y$, $X_2=\dot{y}$, $X_3=x$, $X_4=\dot{x}$ και οι είσοδοι για το σύστημα ορίζονται: $u_1=I_{cY}$, $u_2=I_{cX}$. Επομένως, έχουμε στο Matlab:

$$\begin{aligned}
 \dot{X}_1 &= X_2 \\
 \dot{X}_2 &= \ddot{\theta} = \frac{\Omega I_K}{I_1} X_4 - \frac{mg_a L_a L}{I_1} + \frac{L^2}{I_1} \left(\mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bY} + u_1}{g - X_1} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - u_1}{g + X_1} \right)^2 \right] \right) \\
 &\quad + \frac{m_{αζυγ} \Omega^2 d_{αζυγ} \eta \mu(\Omega t) L_{αζυγ} L}{I_1} - \frac{F_{εξY} \cdot L_{FeξY} \cdot L}{I_1} \\
 \dot{X}_3 &= X_4 \\
 \dot{X}_4 &= \ddot{x} = -\frac{\Omega I_K}{I_1} X_2 + \frac{L^2}{I_1} \left(\mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bX} + u_2}{g - X_2} \right)^2 - \left(\frac{I_{bX} - u_2}{g + X_2} \right)^2 \right] \right) \\
 &\quad + \frac{m_{αζυγ} \Omega^2 d_{αζυγ} \sigma \nu(\Omega t) L_{αζυγ} L}{I_1}
 \end{aligned} \tag{133}$$

Προσομοίωση του συστήματος ελέγχου του ρότορα μέσα στο EME, με προγραμματισμό στο Matlab και στο Simulink module του Matlab

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου καθώς και ο υπολογισμός των κερδών του PID ελεγκτή προσομοιώθηκαν στο Matlab.

Αρχικά, εισάγουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του γραμμικοποιημένου συστήματος στο Matlab και μέσω του Single-Input-Single-Output (SISO) tool module του Matlab βρίσκουμε τα κατάλληλα κέρδη του ελεγκτή PID.

Το SISO tool module του Matlab, εμφανίζει τα αποτελέσματα για τα κέρδη του PID ελεγκτή, στη μορφή της εξίσωσης (134).

$$C = A \cdot \frac{(1 + B \cdot s) \cdot (1 + \Gamma \cdot s)}{s} \tag{134}$$

Επειδή όμως η συνάρτηση μεταφοράς του PID είναι όπως φαίνεται στην εξίσωση (153), για να προκύψουν τα κέρδη του PID ελεγκτή, έχουμε:

$$\begin{aligned}
 C &= A \cdot \frac{(1 + B \cdot s) \cdot (1 + \Gamma \cdot s)}{s} = \frac{(A + A \cdot B \cdot s) \cdot (1 + \Gamma \cdot s)}{s} = \\
 &\quad \frac{A + A \cdot \Gamma \cdot s + A \cdot B \cdot s + A \cdot B \cdot \Gamma \cdot s^2}{s} = \\
 &\quad \frac{A \cdot (B + \Gamma) \cdot s + A + (A \cdot B \cdot \Gamma) \cdot s^2}{s}
 \end{aligned} \tag{135}$$

Επομένως, από την αντιστοιχία των εξισώσεων (153) και (135), για τα κέρδη του PID, έχουμε:

$$\begin{aligned}
 K_p &= A \cdot (B + \Gamma) \\
 K_I &= A \\
 K_D &= A \cdot B \cdot \Gamma
 \end{aligned} \tag{136}$$

Αυτά τα κέρδη αναφέρονται σε συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας και συγκεκριμένα στο κέντρο του εδράνου και χωρίς καμία μετακίνηση του ρότορα από

το σημείο αυτό, επειδή προκύπτουν από τη γραμμική εξίσωση της κίνησης του ρότορα, η οποία για να προκύψει έχουμε κάνει τις παραπάνω παραδοχές.

Στην πραγματικότητα όμως, το αρχικό σημείο ισορροπίας του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου δεν είναι το κέντρο του, αλλά το κατώτερο σημείο, στο οποίο ακουμπά ο ρότορας πριν αρχίσει η λειτουργία του εδράνου.

Επομένως, ο ρότορας πρέπει να μετακινηθεί από το αρχικό του σημείο, στο σημείο όπου θα πρέπει να λειτουργεί. Οι εξισώσεις κίνησης του ρότορα για αυτή την μετακίνηση είναι μη-γραμμικές.

Επίσης, όταν ο ρότορας θα φτάσει στο επιθυμητό σημείο ισορροπίας στο οποίο θα πρέπει να λειτουργεί, για παράδειγμα το κέντρο του εδράνου, κατά τη διάρκεια που θα περιστρέφεται δεν θα είναι απόλυτα σταθερός λόγω των αζυγοσταθμιών που θα έχει ή λόγω εξωτερικών δυνάμεων που θα εφαρμόζονται πάνω στον ρότορα.

Για αυτούς τους λόγους, κατά την προσομοίωση της κίνησης του ρότορα και της λειτουργίας του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, θα χρησιμοποιήσουμε τις μη-γραμμικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του ρότορα, χρησιμοποιώντας όμως ελεγκτή PID του οποίου τα κέρδη έχουν προκύψει από τη γραμμική εξίσωση κίνησης του ρότορα, στο κέντρο του εδράνου. Με αυτόν τον τρόπο, τελικά θα μπορούμε να δούμε την πραγματική συμπεριφορά του ρότορα εντός του εδράνου αυτού, γεγονός που δεν παρατηρείται στη σχετική βιβλιογραφία γενικότερα.

Εισαγωγή δεδομένων για την προσομοίωση του EME

Τα δεδομένα τα οποία εισάγουμε για την προσομοίωση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου είναι:

- μήκος εδράνου $L=25$ mm,
- λόγος μήκους προς διάμετρο εδράνου $L / D=0.625$,
- ακτίνα ρότορα $R_j=20$ mm,
- μαγνητική διαπερατότητα κενού $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ N/A²,
- αριθμός πόλων=8, ενωμένοι ανά δύο όπως στην εικόνα 18,
- σταθερό ρεύμα που διαρρέει τα πηνία=0.2 Ampere και στις δύο διευθύνσεις X και Y,
- μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα για τα πηνία=1 Ampere. Επομένως το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα ελέγχου και για την X και για την Y-διεύθυνση είναι $1-0.2=0.8$ Ampere και το ελάχιστο $0.2-1=-0.8$,
- το μαγνητικό διάκενο είναι $g=0.5$ mm,
- ο αριθμός περιελίξεων σε κάθε έναν από τους οκτώ πόλους είναι 500,
- το πλάτος του κάθε πόλου από τους οκτώ=8 mm,
- επομένως, το εμβαδόν της επιφάνειας της τομής του κάθε πόλου είναι πλάτος πόλου x μήκος εδράνου= $8 \times 25=200$ mm²,
- το βάρος του ρότορα είναι 1.40 kg,
- το μήκος του ρότορα είναι $L=285.5$ mm (εικόνα 52),
- το κέντρο βάρους βρίσκεται σε απόσταση $L_a=180.53$ mm από το αριστερό άκρο του ρότορα (εικόνα 52),

Ροπές αδράνειας του ρότορα

Η ροπή αδράνειας ενός κυλίνδρου με ακτίνα r γύρω από τον Κ-άξονα ο οποίος είναι κατά το μήκος του, είναι:

$$I_K = \frac{mr^2}{2} \quad (137)$$

και οι ροπές αδράνειάς του γύρω από τους I και J-άξονες είναι:

$$I_I = I_J = \frac{1}{12}m(3r^2 + L^2) \quad (138)$$

Η ροπή αδράνειας ενός κυλίνδρου με τρύπα στο εσωτερικό του και κατά το μήκος του, με ανοικτά άκρα, όπως είναι το τμήμα R της εικόνας 48, με εσωτερική ακτίνα r_1 , εξωτερική ακτίνα r_2 , μήκος L και μάζα m γύρω από τον Κ-άξονα, είναι:

$$I_K = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2) \quad (139)$$

και οι ροπές αδράνειάς του γύρω από τους I και J-άξονες είναι:

$$I_I = I_J = \frac{1}{12}m[3(r_1^2 + r_2^2) + L^2] \quad (140)$$

Εάν το κέντρο μάζας του κυλίνδρου βρίσκεται σε απόσταση L_c από τον άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφεται, και θέλουμε να βρούμε τις ροπές αδράνειας γύρω από αυτόν τον άξονα, τότε, με βάση και τον κανόνα του Steiner, οι ροπές αδράνειας είναι:

$$I_{Ivea} = I_{Jvea} = I_I + mL_c^2 = I_J + mL_c^2 \quad (141)$$

όπου το πρώτο μέρος είναι η ροπή αδράνειας γύρω από παράλληλο άξονα σε σχέση με τον I ή J-άξονα, ο οποίος περνά από το κέντρο μάζας του κυλίνδρου και το δεύτερο μέρος είναι η μάζα του κυλίνδρου επί την απόσταση ανάμεσα στον I ή τον J-άξονα και το κέντρο μάζας, εις το τετράγωνο. Η ροπή αδράνειας γύρω από τον Κ-άξονα δεν αλλάζει σε αυτήν την περίπτωση.

Επομένως, θα ξεχωρίσουμε τον ρότορα τον οποίο χρησιμοποιούμε (εικόνα 48), σε κυλίνδρους και κυλίνδρους με τρύπα στο εσωτερικό τους και κατά το μήκος τους, και θα βρούμε τις ροπές αδράνειας του συνολικού ρότορα, γύρω από τους Κ, I και J-άξονες, χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Steiner όπου χρειάζεται.

Η ροπή αδράνειας του ρότορα γύρω από τον Κ-άξονα, ισούται με το άθροισμα των ροπών αδράνειας γύρω από τον Κ-άξονα, των τμημάτων D, E, F, G, H και R, όπως φαίνονται στην εικόνα 48. Το υλικό των τμημάτων D, E και F είναι Inox 316, με πυκνότητα 8000 kg/m^3 . Το υλικό των τμημάτων για τα τμήματα G και H είναι 1060 κράμα Αλουμινίου, με πυκνότητα 2700 kg/m^3 και τέλος, για το τμήμα R, το υλικό είναι σίδηρος, με πυκνότητα 7100 kg/m^3 .

Επομένως, έχουμε:

$$I_K = I_{KD} + I_{KE} + I_{KF} + I_{KG} + I_{KH} + I_{KR} \Rightarrow \quad (142)$$

$$\begin{aligned}
 I_K &= \left(\frac{m_D r_D^2}{2} \right) + \left(\frac{m_E r_E^2}{2} \right) + \left(\frac{m_F r_F^2}{2} \right) + \\
 &\left(\frac{m_G (30^2 + 12.5^2)}{2} \right) + \left(\frac{m_H (17.5^2 + 12.5^2)}{2} \right) + \left(\frac{m_R (20^2 + 5^2)}{2} \right) = \\
 &\left(\frac{m_D 5^2}{2} \right) + \left(\frac{m_E 12.5^2}{2} \right) + \left(\frac{m_F 5^2}{2} \right) + \\
 &\left(\frac{m_G (30^2 + 12.5^2)}{2} \right) + \left(\frac{m_H (17.5^2 + 12.5^2)}{2} \right) + \left(\frac{m_R (20^2 + 5^2)}{2} \right) \Rightarrow
 \end{aligned} \tag{143}$$

$$\begin{aligned}
 I_K &= \left(\frac{12.57 \cdot 5^2}{2} \right) + \left(\frac{993.53 \cdot 12.5^2}{2} \right) + \left(\frac{15.71 \cdot 5^2}{2} \right) + \\
 &\left(\frac{94.63 \cdot (30^2 + 12.5^2)}{2} \right) + \left(\frac{35.63 \cdot (17.5^2 + 12.5^2)}{2} \right) + \left(\frac{209.11 \cdot (20^2 + 5^2)}{2} \right) \Rightarrow
 \end{aligned} \tag{144}$$

$$\begin{aligned}
 I_K &= 157.125 + 77619.53125 + 196.375 + 49976.46875 + 8239.4375 + \\
 &44435.875 = \\
 &180624.8125 \text{ gr} \times \text{mm}^2 = \\
 &1.806248125 \cdot 10^{-4} \text{ Kg} \times \text{m}^2
 \end{aligned} \tag{145}$$

και οι ροπές αδράνειας γύρω από τους I και J-άξονες, είναι ίσες με το άθροισμα των ροπών αδράνειας γύρω από τους I και J-άξονες, των τμημάτων D, E, F, G, H και R (εικόνα 48).

Επομένως, έχουμε:

$$I_I = I_J = I_{ID} + I_{IE} + I_{IF} + I_{IG} + I_{IH} + I_{IR} \Rightarrow \tag{146}$$

$$\begin{aligned}
 I_I &= \left(\frac{1}{12} m_D (3r_D^2 + 20^2) + m_D 10^2 \right) + \\
 &\left(\frac{1}{12} m_E (3r_E^2 + (210 + 15 + 28)^2) + m_E \left(20 + \frac{210 + 15 + 28}{2} \right)^2 \right) + \\
 &\left(\frac{1}{12} m_F (3r_F^2 + 25^2) + m_F \left(20 + 210 + 15 + 28 + \frac{25}{2} \right)^2 \right) + \\
 &\left(\frac{1}{12} m_G [3(30^2 + 12.5^2) + 15^2] + m_G \left(20 + 210 + \frac{15}{2} \right)^2 \right) + \\
 &\left(\frac{1}{12} m_H [3(17.5^2 + 12.5^2) + 28^2] + m_H \left(20 + 210 + 15 + \frac{28}{2} \right)^2 \right) + \\
 &\left(\frac{1}{12} m_R [3(20^2 + 5^2) + 25^2] + m_R \left(20 + 210 + 15 + 28 + \frac{25}{2} \right)^2 \right) \Rightarrow
 \end{aligned} \tag{147}$$

$$\begin{aligned}
I_1 = & \left(\frac{1}{12} 12.57 \cdot (3 \cdot 5^2 + 20^2) + 12.57 \cdot 10^2 \right) + \\
& \left(\frac{1}{12} 993.53 \cdot (3 \cdot 12.5^2 + (210 + 15 + 28)^2) + 993.53 \cdot \left(20 + \frac{210 + 15 + 28}{2} \right)^2 \right) + \\
& \left(\frac{1}{12} 15.71 \cdot (3 \cdot 5^2 + 25^2) + 15.71 \cdot \left(20 + 210 + 15 + 28 + \frac{25}{2} \right)^2 \right) + \\
& \left(\frac{1}{12} 94.63 \cdot [3(30^2 + 12.5^2) + 15^2] + 94.63 \cdot \left(20 + 210 + \frac{15}{2} \right)^2 \right) + \\
& \left(\frac{1}{12} 35.63 \cdot [3(17.5^2 + 12.5^2) + 28^2] + 35.63 \cdot \left(20 + 210 + 15 + \frac{28}{2} \right)^2 \right) + \\
& \left(\frac{1}{12} 209.11 \cdot [3(20^2 + 5^2) + 25^2] + 209.11 \cdot \left(20 + 210 + 15 + 28 + \frac{25}{2} \right)^2 \right) \Rightarrow
\end{aligned} \tag{148}$$

$$I_1 = 1754.5625 + 26661770.8225 + 1281442.4442 + 5364485.98425 + 2396543.57541667 + 17077717.46083 \text{ gr} \times \text{mm}^2 = 52783714.84969667 \text{ gr} \times \text{mm}^2 = 0.05278371484969667 \text{ Kg} \times \text{m}^2 \quad (149)$$

Αποσυζευγμένος Έλεγχος

Το είδος ελέγχου που θα χρησιμοποιήσουμε για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, είναι αποσυνζευγμένος έλεγχος, δηλαδή ο ρότορας ελέγχεται από δύο ανεξάρτητους PID ελεγκτές, έναν για τον X-άξονα και έναν για τον Y-άξονα.

Στην εικόνα 53 φαίνεται το διάγραμμα ελέγχου που χρησιμοποιούμε για τον έλεγχο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, το οποίο σχεδιάσαμε στο Simulink module του Matlab.

Εικόνα 53. Σύστημα ελέγχου του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, στο Simulink module του Matlab

Στο παραπάνω διάγραμμα του ελέγχου του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, δίνουμε ένα βήμα (Step) για τη θέση του ρότορα για τη X και Y-διεύθυνση, σε μέτρα. Στη συνέχεια, αυτά τα βήματα προστίθενται με τα σήματα που έρχονται από τους αισθητήρες τα οποία αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα θέση του ρότορα, σε μέτρα, για κάθε διεύθυνση ξεχωριστά. Αυτά τα σήματα εισάγονται στον PID ελεγκτή για τη X και την Y-διεύθυνση ξεχωριστά. Στην εικόνα 54, φαίνεται ο τρόπος μοντελοποίησης του PID ελεγκτή, στο Simulink module του Matlab.

Εικόνα 54. Μοντελοποίηση PID ελεγκτή, στο Simulink module του Matlab

Αμέσως μετά τους δύο PID ελεγκτές, τα σήματα αντιπροσωπεύουν τα ρεύματα ελέγχου τα οποία πρέπει να εφαρμοστούν στα πηνία, για τις X και Y- διευθύνσεις.

Στη συνέχεια, έχουμε βάλει δύο κέρδη, ένα για κάθε διεύθυνση, τα οποία ονομάζονται «Sample time», με σκοπό να προσομοιώσουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας με την οποία οι PID ελεγκτές λειτουργούν. Η δειγματοληψία είναι 1/10000 δευτερόλεπτα, διότι επιλέγουμε η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι 10 KHz.

Αμέσως μετά, τα σήματα εισάγονται στο «Saturation dynamic». Εισάγουμε αυτά τα blocks με σκοπό να προσομοιώσουμε τα ανώτερα και κατώτερα όρια, εντός των οποίων επιτρέπουμε να κείται το ρεύμα ελέγχου, λόγω κορεσμού και υπερθέρμανσης των πηνίων. Το ανώτερο όριο των ρευμάτων ελέγχου για την X και την Y-διεύθυνση στο «Saturation dynamic», είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος με το οποίο επιτρέπεται να τροφοδοτήσουμε τα πηνία μείον το σταθερό ρεύμα, διότι στο «Saturation dynamic» εισάγουμε τις τιμές για τα ρεύματα ελέγχου και όχι για τις τελικές τιμές των ρευμάτων, δηλαδή ρεύματα ελέγχου και σταθερά ρεύματα. Το κατώτερο όριο των ρευμάτων ελέγχου στο «Saturation dynamic» είναι το σταθερό ρεύμα μείον τη μέγιστη τιμή του ρεύματος με το οποίο επιτρέπεται να τροφοδοτήσουμε τα πηνία. Επομένως, παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή του ρεύματος ελέγχου ισούται με την αρνητική τιμή του ανώτερου ορίου του ρεύματος ελέγχου.

Μετά το «Saturation dynamic», τα σήματα αντιπροσωπεύουν τις τελικές τιμές των ρευμάτων ελέγχου που πρέπει να εφαρμοστούν στο έδρανο για την X και Y-διεύθυνση. Αυτά τα δύο σήματα, ένα για κάθε διεύθυνση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, εισάγονται στο «magnetic_bearing_model», στο οποίο block υπάρχουν οι μη-γραμμικές μαγνητικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα οι οποίες επιλύονται (εξίσωση (133)).

Στο S-Function «magnetic_bearing_model» χρησιμοποιούμε:

- ως αρχικές τιμές για την επίλυση, τις θέσεις και τις ταχύτητες για τις X και Y -διευθύνσεις,
- ως μεταβλητές που ανανεώνονται: το χρόνο t , τις μεταβλητές X_1 , X_2 , X_3 και X_4 που αντιπροσωπεύουν τις εξόδους και τις μεταβλητές u_1 και u_2 που αντιπροσωπεύουν τις εισόδους,
- ως μεταβλητές για την έξοδο: το χρόνο t , τις μεταβλητές X_1 , X_2 , X_3 και X_4 που αντιπροσωπεύουν τις εξόδους και τις μεταβλητές u_1 και u_2 που αντιπροσωπεύουν τις εισόδους,
- ο αριθμός των σταθερών είναι 4,
- ο αριθμός των εξόδων είναι 4,
- ο αριθμός των εισόδων είναι 2,
- και για τα ρεύματα τροφοδοσία των πηνίων, ισχύουν οι περιορισμοί που ορίζονται από τις εξισώσεις (41) και (42).

Ο επιλυτής που επιλέγουμε για το Simulink είναι ο ode23 (stiff/Mod. Roden), διότι είναι ο καταλληλότερος για το μοντέλο που επιλύουμε και δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Οι εξοδοί από το S-Function «magnetic_bearing_model» είναι οι θέσεις και οι ταχύτητες του ρότορα, σε κάθε διεύθυνση.

Μετά την επίλυση, οι θέσεις του ρότορα για κάθε διεύθυνση επιστρέφουν στο σύστημα ελέγχου, διότι αντιπροσωπεύουν τα σήματα των αισθητήρων και έτσι ολοκληρώνεται το κλειστό κύκλωμα του ελέγχου.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα διαγράμματα Bode για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο. Αυτά τα διαγράμματα είναι ένας συνδυασμός του κέρδους (dB), με τη συχνότητα (Hz), όπως φαίνεται στην εικόνα 55, και της φάσης (μοίρες) με τη συχνότητα (Hz), όπως φαίνεται στην εικόνα 56.

Εικόνα 55. Bode διάγραμμα κέρδους

Εικόνα 56. Bode διάγραμμα φάσης

Η συχνότητα δειγματοληψίας, όπως αναφέραμε λίγο πριν, επιλέξαμε να είναι 10 KHz, επομένως, από το Nyquist-Shannon θεώρημα σχετικά με τη συχνότητα δειγματοληψίας, τα διαγράμματα Bode σταματάνε στο μισό της συχνότητας αυτής, δηλαδή στα 5 KHz. Να σημειωθεί ότι αυτά τα διαγράμματα αναφέρονται στο ψηφιακό σύστημα, και όχι στο αναλογικό.

Από τα παραπάνω διαγράμματα Bode, έχουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Το αδιάστατο κέρδος DC ισούται με 1, διότι από το διάγραμμα 55, στη χαμηλότερη τιμή της συχνότητας, δηλαδή σχεδόν 0 Hz, το κέρδος είναι σχεδόν ίσο με 0 dB.
- Το bandwidth του κλειστού συστήματος είναι 360 Hz, επειδή στο σημείο όπου το κέρδος είναι 3 dB μικρότερο από την πρώτη τιμή, δηλαδή 0-3=-3dB, η συχνότητα είναι 360 Hz.

Επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο

Ο ρότορας ασκεί δυνάμεις στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο λόγω των αζυγοσταθμιών του και λόγω του γυροσκοπικού φαινομένου. Γι' αυτό επιθυμούμε ο ελεγκτής να πετυχαίνει μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης ή στις περιπτώσεις που εμφανίζεται, να το μειώνει. Επίσης, επιθυμούμε το σύστημα να έχει όσο το δυνατόν πιο γρήγορη απόκριση, διότι σε τυχόν ξαφνικά εξωτερικά φορτία, ο ρότορας θα πρέπει να επανέρχεται στην επιθυμητή θέση άμεσα.

Προκειμένου να γίνει η επιλογή του καταλληλότερου ελεγκτή, έγιναν έλεγχοι για την απόκριση του συστήματος με αναλογικό ελεγκτή (P), με ολοκληρωτικό ελεγκτή (I), με αναλογικό και ολοκληρωτικό (PI), με αναλογικό και διαφορικό (PD) και με αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό ελεγκτή (PID). Αυτοί οι έλεγχοι έγιναν με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους.

Μέσω του SISO tool module του Matlab, όταν επιλέξαμε ο ελεγκτής να είναι αναλογικός (P), το αποτέλεσμα για το κέρδος ήταν $K_P=854.74$, αλλά σε αυτήν την περίπτωση, εάν το σύστημα προσομοιωθεί με τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης οι οποίες και αντιστοιχούν στην πραγματικότητα, τότε ο ρότορας δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί, διότι το αναλογικό κέρδος που υπολογίσαμε προκύπτει από τη γραμμικοποιημένη εξίσωση κίνησης του ρότορα.

Όταν επιλέξαμε ο ελεγκτής να είναι ολοκληρωτικός (I) ή αναλογικός και ολοκληρωτικός (PI), τότε δεν ήταν δυνατόν να προκύψει ένας σταθερός βρόχος ανατροφοδότησης, διότι ο διαφορικός όρος του ελεγκτή (PID), είναι απαραίτητος για τη σταθεροποίηση του συστήματος.

Όταν επιλέξαμε ο ελεγκτής να είναι αναλογικός και διαφορικός (PD), τότε η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$G_i = K_P + sK_D \quad (150)$$

Από το SISO tool module του Matlab, τα κέρδη για τον PD ελεγκτή είναι $K_P=9251.8$ και $K_D=10.17698$.

Όταν το σύστημα προσομοιώνεται με τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης και ελεγκτή PD, παρατηρείται ότι ο ρότορας δεν φτάνει στο επιθυμητό σημείο με μεγάλη ακρίβεια, με αποτέλεσμα να έχουμε σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

Όταν επιλέξουμε PID ελεγκτή, τότε από το SISO tool module του Matlab, για τα παραπάνω δεδομένα, τα κέρδη που προκύπτουν είναι: $K_P=9266.148$, $K_I=256680$ και $K_D=9.88218$. Τα ίδια κέρδη PID χρησιμοποιούνται για την X και για την Y-διεύθυνση.

Μετά την προσομοίωση, παρατηρούμε ότι όταν ο ελεγκτής είναι PD, η θέση y του ρότορα όπως φαίνεται και στην εικόνα 57, δεν είναι ακριβώς η επιθυμητή ($y=0$), ενώ όταν ο ελεγκτής είναι PID, η θέση y του ρότορα φτάνει στην επιθυμητή τιμή με ακρίβεια.

Εικόνα 57. Θέση y του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου συναρτήσει του χρόνου, με PD και με PID ελεγκτή

Επομένως, τελικά επιλέγουμε PID ως καταλληλότερο ελεγκτή για τον έλεγχο του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, χρησιμοποιώντας τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης κατά την προσομοίωση.

Ελεγκτής PID

Ο ελεγκτής PID έχει την ακόλουθη εξίσωση που συνδέει την είσοδο $e(t)$ με την έξοδο $u(t)$.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (151)$$

όπου K_P , K_I , K_D είναι τα κέρδη PID (αναλογικό, ολοκληρωτικό, διαφορικό αντίστοιχα).

Τα κέρδη πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσφέρουν την καλύτερη δυνατή απόδοση στο σύστημα. Ένα διάγραμμα ελέγχου PID ενός ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου φαίνεται στην εικόνα 58.

Εικόνα 58. Διάγραμμα PID ελέγχου

Με τον όρο Plant εννοούμε το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, το οποίο έχει τη συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης (152).

$$G = \frac{y(s)}{I_{cY}(s)} = \frac{K_{YI}^{EME}}{ms^2 + K_{Yy}^{EME}} \quad (152)$$

Ένας απλός PID ελεγκτής μπορεί να εκφραστεί με τη συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης (153) [82].

$$G_i = K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad (153)$$

Επομένως, η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται:

$$\begin{aligned} \frac{y(s)}{y^*(s)} &= \frac{G_i \cdot G}{1 + K_{sn} \cdot G_i \cdot G} = \frac{\frac{K_D K_{YI}^{EME} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} s + K_I K_{YI}^{EME}}{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME})}}{1 + \frac{K_D K_{YI}^{EME} K_{sn} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} K_{sn} s + K_I K_{YI}^{EME} K_{sn}}{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME})}} = \\ &= \frac{K_D K_{YI}^{EME} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} s + K_I K_{YI}^{EME}}{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME}) + K_D K_{YI}^{EME} K_{sn} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} K_{sn} s + K_I K_{YI}^{EME} K_{sn}} = \end{aligned} \quad (154)$$

$$\frac{K_D K_{YI}^{EME} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} s + K_I K_{YI}^{EME}}{ms^3 + K_D K_{YI}^{EME} K_{sn} s^2 + (K_P K_{YI}^{EME} K_{sn} + K_{Yy}^{EME})s + K_I K_{YI}^{EME} K_{sn}}$$

και η χαρακτηριστική εξίσωση είναι:

$$ms^3 + K_D K_{YI}^{EME} K_{sn} s^2 + (K_P K_{YI}^{EME} K_{sn} + K_{Yy}^{EME})s + K_I K_{YI}^{EME} K_{sn} \quad (155)$$

όπου το K_{sn} είναι το κέρδος του αισθητήρα.

Στην περίπτωση που υπάρχει και εξωτερικό φορτίο, όπως είναι για παράδειγμα η αζυγοσταθμία του ρότορα ($F_{αζυγ}$), η εξίσωση (65) γίνεται:

$$m\ddot{y} = K_{YI}^{EME} I_{cY} - K_{Yy}^{EME} y + F_{αζυγ} \quad (156)$$

Η εξίσωση (156) μπορεί να μετασχηματιστεί στο πεδίο Laplace, θέτοντας $I_{cY}=0$ και θεωρώντας ότι η είσοδος είναι η $F_{αζυγ}$. Έτσι, έχουμε:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= K_{YI}^{EME} I_{cY} - K_{Yy}^{EME} y + F_{αζυγ} \\ ms^2 y(s) &= -K_{Yy}^{EME} y(s) + F_{αζυγ}(s) \Rightarrow \\ (ms^2 + K_{Yy}^{EME})y(s) &= F_{αζυγ}(s) \Rightarrow \end{aligned} \quad (157)$$

$$\frac{y(s)}{F_{αζυγ}(s)} = \frac{1}{ms^2 + K_{Yy}^{EME}} \quad (158)$$

ή

Εικόνα 59. Διάγραμμα PID ελέγχου με εξωτερική δύναμη αζυγοσταθμίας προστιθέμενη στο Plant

Η συνάρτηση μεταφοράς της εικόνας 59, είναι:

$$\begin{aligned}
 \frac{y(s)}{F_{αζυγ}(s)} &= \frac{G_2}{1 - G_2 \cdot K_{sn} \cdot (-1) \cdot G_i} = \\
 &= \frac{1}{ms^2 + K_{Yy}^{EME}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{ms^2 + K_{Yy}^{EME}} \cdot K_{sn} \cdot (-1) \cdot \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}} = \\
 &= \frac{1}{ms^2 + K_{Yy}^{EME}} \cdot \frac{s}{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME}) + K_{sn} K_D s^2 + K_{sn} K_P s + K_{sn} K_I} = \\
 &= \frac{s}{ms^3 + K_{sn} K_D s^2 + (K_{sn} K_P + K_{Yy}^{EME})s + K_{sn} K_I}
 \end{aligned} \tag{159}$$

όπου το plant (G_2) έχει τη συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης (158) και η χαρακτηριστική εξίσωση είναι:

$$ms^3 + K_{sn} K_D s^2 + (K_{sn} K_P + K_{Yy}^{EME})s + K_{sn} K_I = 0 \tag{160}$$

Ο ελεγκτής PID μπορεί να συντονιστεί, μέσω των εξισώσεων (151) έως (160), χρησιμοποιώντας τους παρακάτω κανόνες:

- Αυξάνοντας το αναλογικό κέρδος (K_P), είναι δυνατόν να επιτευχθεί πιο γρήγορη απόκριση.
- Αυξάνοντας το ολοκληρωτικό κέρδος (K_I), είναι δυνατόν να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια της επιθυμητής θέσης.
- Αυξάνοντας το διαφορικό κέρδος (K_D), είναι δυνατόν να επιτευχθεί μικρότερο εύρος ταλάντωσης.

Οι βέλτιστες τιμές για τα κέρδη του PID ελεγκτή προκύπτουν μετά από δοκιμές ακόμα και στα πραγματικά συστήματα, διότι δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν όλα τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος και με την απαραίτητη ακρίβεια. Μερικά συστήματα συμπεριφέρονται καλύτερα με P ελεγκτή, άλλα με PI ελεγκτή, άλλα με PD ελεγκτή και άλλα με PID ελεγκτή. Στην εργασία αυτή, θα χρησιμοποιήσουμε PID ελεγκτή, διότι στο συγκεκριμένο είδος συστήματος που έχουμε, δηλαδή το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο, ο PID ελεγκτής είναι ο πιο κατάλληλος, συγκριτικά με τους προαναφερθέντες.

Επιβεβαίωση αποτελεσμάτων του ελεγκτή

Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα του ελέγχου του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου καθώς και τις εξισώσεις που χρησιμοποιούμε, προσομοιώνουμε τον ρότορα ο οποίος κινείται εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, με μηδενική αρχική ταχύτητα και χωρίς εξωτερικές δυνάμεις. Η μόνη δύναμη που ασκείται στον ρότορα είναι το βάρος του. Ο ρότορας έχει επιτάχυνση μόνο λόγω της επιτάχυνσης βαρύτητας που ασκείται πάνω του, λόγω του βάρους του. Επομένως,

μετά από 0.1 sec, θα διανύσει μία συγκεκριμένη απόσταση. Η επιτάχυνση βαρύτητας ασκείται στο κέντρο βάρους του ρότορα. Στο σημείο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, η επιτάχυνση θα είναι:

$$\Sigma M_x = I_1 \cdot \ddot{\theta}_x \Rightarrow mg_a L_a = I_1 \left(-\frac{\ddot{y}}{L} \right) \Rightarrow \ddot{y} = -\frac{mg_a L_a L}{I_1} \Rightarrow$$

$$\ddot{y} = -\frac{1.36117 \cdot 9.81 \cdot 180.53 \cdot 10^{-3} \cdot 285.5 \cdot 10^{-3}}{0.05278} = -13.039 \text{ m/sec}^2 \quad (161)$$

οπότε, μετά από 0.1 sec, ο ρότορας στο σημείο του εδράνου, θα διανύσει απόσταση:

$$y = \frac{1}{2} \ddot{y} \cdot t^2 = \frac{1}{2} (-13.039) \cdot 0.1^2 = -0.065195 \text{ m} \quad (162)$$

Από την προσομοίωση στο Matlab και στο Simulink module του Matlab, παρατηρούμε ότι μετά από 0.1 sec, ο ρότορας, στο σημείο του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, ακολουθεί πορεία προς την αρνητική φορά της Y-διεύθυνσης και διανύει απόσταση φθάνοντας ακριβώς στη θέση $y = -0.065195 \text{ m}$, όπως φαίνεται και στην εικόνα 60.

Εικόνα 60. Θέση y του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου συναρτήσει του χρόνου, χωρίς εξωτερικές δυνάμεις

Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων, σχηματικό διάγραμμα του ελέγχου, ανάλυση των εξισώσεων του PID ελεγκτή, ανάλυση των συναρτήσεων μεταφοράς, ανάλυση των μη-γραμμικών εξισώσεων κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου συμπεριλαμβάνοντας την αζυγοσταθμία του ρότορα και το γυροσκοπικό φαινόμενο και προσομοίωση του ελέγχου στο Matlab και στο

Simulink module του Matlab.

Τα αποτελέσματα που δίνει το Matlab όπως προγραμματίστηκε στη συγκεκριμένη εργασία, είναι τα διαγράμματα Bode, οι x και y -θέσεις του ρότορα, οι ταχύτητες του ρότορα και τα ρεύματα ελέγχου για την X και Y -διεύθυνση. Αυτά τα αποτελέσματα το Matlab αποθηκεύει σε αρχεία στον υπολογιστή, σε μορφή εικόνων και σε αρχεία Excel, ώστε να μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε για την εξαγωγή διαγραμμάτων και συμπερασμάτων.

Ακόμα, τα κέρδη PID τα οποία προκύπτουν από το SISO tool module του Matlab μέσω των γραμμικών εξισώσεων κίνησης του ρότορα, προκύπτει ότι μπορούν να ελέγξουν τον ρότορα και σε μεγαλύτερη ακτίνα γύρω από το κέντρο του εδράνου, και όχι μόνο στο κέντρο του. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει διότι κατά την προσομοίωση χρησιμοποιούμε τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα, οι οποίες αντιστοιχούν στην πραγματικότητα, και παρατηρούμε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τον έλεγχο του ρότορα.

Η προσομοίωση του PID ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων στο Matlab αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να προσομοιώνει ολοκληρωμένο PID έλεγχο ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων.

Περισσότερα και πιο αναλυτικά αποτελέσματα σχετικά με τον PID έλεγχο των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων, όπως για παράδειγμα η τροχιά του ρότορα, οι ταχύτητές του στην X και Y -διεύθυνση, τα ρεύματα ελέγχου για την X και Y -διεύθυνση, προσομοιώνοντας και την αζυγοσταθμία του ρότορα, θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 5 το οποίο αναφέρεται στο σχεδιασμό συστήματος ελέγχου υβριδικών εδράνων ολίσθησης και περιλαμβάνει αποτελέσματα και για τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα.

Κεφάλαιο 4

Σχεδιασμός και Ανάλυση Υβριδικού Εδράνου Ολίσθησης (Υδροδυναμικού – Ηλεκτρομαγνητικού)

Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ο σχεδιασμός του πρωτότυπου υβριδικού εδράνου ολίσθησης (υδροδυναμικού - ηλεκτρομαγνητικού). Όλος ο σχεδιασμός και η ανάλυση αυτού του υβριδικού εδράνου ολίσθησης αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν προϋπήρχε υβριδικό έδρανο ολίσθησης το οποίο να συνδυάζει το υδροδυναμικό και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ο σχεδιασμός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου παρουσιάζεται αναλυτικά σε αυτό το κεφάλαιο της εργασίας.

Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ανάλυση της γεωμετρίας των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων, ανάλυση των υλικών από τα οποία πρέπει να κατασκευάζονται, ανάλυση των εξισώσεων που πρέπει να ικανοποιούνται για το σωστό σχεδιασμό των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων, ανάλυση των εξισώσεων που δείχνουν την ισορροπία του ρότορα μέσα στο ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο, ανάλυση των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης του ρότορα μέσα στο έδρανο αυτό και ανάλυση του τρόπου μοντελοποίησης και προσομοίωσης της λειτουργίας των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων στο πρόγραμμα Ansys καθώς και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αυτής. Ο σχεδιασμός των εδράνων αυτών γίνεται με παραμετρικό τρόπο, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα τροποποίησης των χαρακτηριστικών τους. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού, παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, από τα αποτελέσματα των οποίων φαίνεται και η χρησιμότητα του εδράνου αυτού. Ο σχεδιασμός των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων καθώς και η ανάλυσή τους στο πρόγραμμα Ansys αποτελεί καινοτομία, διότι δεν προϋπήρχαν ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα, ούτε υπήρχε κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα.

Γεωμετρικοί περιορισμοί και περιορισμοί ως προς τα υλικά ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου

Σε ένα υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης η απόσταση e ανάμεσα στο κέντρο του ρότορα O_r και στο κέντρο του εδράνου O_b ονομάζεται εκκεντρότητα. Για να λειτουργήσει το υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης, χρειάζεται πάντα εκκεντρότητα. Έτσι το φιλμ του λιπαντικού, καθώς λειτουργεί στην υδροδυναμική περιοχή, λαμβάνει τιμές πάχους h ανάμεσα στο $h_{\min}$ (ελάχιστο πάχος λιπαντικού) και $h_{\max}$ (μέγιστο πάχος λιπαντικού) (εικόνα 61).

Εικόνα 61. Γεωμετρικοί περιορισμοί ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, με πόλους ηλεκτρομαγνητών σε ακτίνα R_m

Η ακτινική χάρη $c = R_b - R_j$ λαμβάνει τιμές εντός της περιοχής που ορίζεται από την εξίσωση (4):

$$500 \leq R_b / c \leq 1000 \quad (163)$$

Όπου c , $h_{\min}$ και $h_{\max}$ συνδέονται με τη σχέση:

$$h_{\min} + h_{\max} = 2c \Rightarrow h_{\max} = 2c - h_{\min} \quad (164)$$

Για τα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα, το σημείο ισορροπίας είναι συνήθως το κέντρο του εδράνου και δεν συνηθίζεται να λειτουργούν έκκεντρα. Στο προτεινόμενο υβριδικό έδρανο ολίσθησης όμως, το σημείο ισορροπίας θεωρείται έκκεντρο, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθεί και υδροδυναμική λίπανση.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το μαγνητικό διάκενο (g) ανάμεσα στους ηλεκτρομαγνήτες και τον περιστρεφόμενο ρότορα, προκειμένου να ασκείται ικανοποιητική ηλεκτρομαγνητική δύναμη από τους ηλεκτρομαγνήτες στον ρότορα, πρέπει να κείται στην περιοχή:

$$g_1 \leq g \leq g_2 \quad (165)$$

όπου

$$g_1 = 300 \mu\text{m} \text{ και } g_2 = 500 \mu\text{m} \quad (166)$$

Λόγω της υπάρχουσας εκκεντρότητας, το $g_{\min}$ και το $g_{\max}$ πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες ανισότητες:

$$g_1 \leq g_{\min} \text{ και } g_{\max} \leq g_2 \quad (167)$$

Για να μπορεί το υβριδικό έδρανο ολίσθησης να λειτουργεί και με τα δύο πεδία (υδροδυναμικό και ηλεκτρομαγνητικό), οι πόλοι των ηλεκτρομαγνητών τοποθετούνται όχι στην ακτίνα του εδράνου (R_b) που αντιστοιχεί στο υδροδυναμικό τμήμα του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, αλλά σε μια μεγαλύτερη ακτίνα R_m .

$$R_m = R_b + g_m \quad (168)$$

όπου g_m είναι η επιπλέον απόσταση, έξω από το υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου. Έτσι, οι ηλεκτρομαγνήτες τοποθετούνται σε απόσταση g_m από την εσωτερική επιφάνεια του υβριδικού εδράνου ολίσθησης (που αντιστοιχεί στην εσωτερική επιφάνεια του υδροδυναμικού τμήματος του υβριδικού εδράνου ολίσθησης). Αν προσθέσουμε το ελάχιστο πάχος του λιπαντικού $h_{\min}$ με το g_m και το μέγιστο πάχος του λιπαντικού $h_{\max}$ με το g_m , τότε υπολογίζεται η ολική απόσταση των πόλων των ηλεκτρομαγνητών από τον ρότορα (εικόνα 61):

$$g_{\min} = g_m + h_{\min} \quad (169)$$

$$g_{\max} = g_m + h_{\max} \quad (170)$$

και η εξίσωση (167) γίνεται:

$$\begin{aligned} g_1 \leq g_{\min} &\Rightarrow g_1 \leq g_m + h_{\min} \Rightarrow g_1 - h_{\min} \leq g_m \\ \frac{g_1}{c} - \left(\frac{h_{\min}}{c} \right) &\leq \frac{g_m}{c} \end{aligned} \quad (171)$$

$$\begin{aligned} g_{\max} \leq g_2 &\Rightarrow g_m + h_{\max} \leq g_2 \Rightarrow g_m + 2c - h_{\min} \leq g_2 \\ \frac{g_m}{c} + 2 - \left(\frac{h_{\min}}{c} \right) &\leq \frac{g_2}{c} \Rightarrow \frac{g_m}{c} \leq \frac{g_2}{c} - 2 + \left(\frac{h_{\min}}{c} \right) \end{aligned} \quad (172)$$

Επομένως, η τελική εξίσωση που συνδέει την απόσταση g_m με την ακτινική χάρη c , είναι:

$$\frac{g_1}{c} - \left(\frac{h_{\min}}{c} \right) \leq \frac{g_m}{c} \leq \frac{g_2}{c} - 2 + \left(\frac{h_{\min}}{c} \right) \quad (173)$$

όπου τα g_1 και g_2 δίνονται από την εξίσωση (166), το c είναι επιλογή κατά το σχεδιασμό του υβριδικού εδράνου ολίσθησης και το αδιάστατο ελάχιστο πάχος λιπαντικού $h_{\min}/c$ της εξίσωσης (173) μπορεί να βρεθεί από το διάγραμμα των Raymondi και Boyd συναρτήσεως του αριθμού Sommerfeld για διάφορους λόγους μήκους εδράνου προς διάμετρο (L/D) [79].

Στην εικόνα 62 φαίνονται τα αποτελέσματα του λόγου g_m/c , συναρτήσεως του

αριθμού Sommerfeld για διάφορες τιμές της ακτινικής χάρης c , για την περίπτωση που ο λόγος μήκους εδράνου προς διάμετρο (L/D) είναι ίσος με 1. Συγκεκριμένα, φαίνεται το κατώτερο και το ανώτερο όριο στα οποία μπορεί να βρίσκεται ο λόγος g_m/c . Επομένως, κατά το σχεδιασμό του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, θα πρέπει να επιλέγουμε κάποια τιμή ανάμεσα σε αυτά τα όρια.

Οι μεγάλες τιμές g_m/c αντιστοιχούν σε μικρούς αριθμούς Sommerfeld, ενώ οι μικρότερες τιμές g_m/c σε μεγαλύτερους σχετικά αριθμούς Sommerfeld.

Έτσι, αφού επιλεγεί η ακτινική χάρη c , και για κάθε αριθμό Sommerfeld, μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη απόσταση g_m , για κάθε λόγο μήκους εδράνου προς διάμετρο (L/D) μέσω της εξίσωσης (173), ή για $L/D=1$ μέσω της εικόνας 62.

Εικόνα 62. Απόσταση ηλεκτρομαγνητών από το εσωτερικό του υβριδικού εδράνου ολίσθησης g_m προς ακτινική χάρη c , συνάρτησε του αριθμού Sommerfeld, για διάφορες τιμές της ακτινικής χάρης και για $L/D=1$

Για παράδειγμα, εάν η ακτινική χάρη είναι $c = 100 \mu\text{m}$, $S = 0.1$ και $L/D=1$, τότε από την εικόνα 62 ή από την εξίσωση (173), λαμβάνεται η ακόλουθη ανισότητα:

$$2.66 \leq g_m/c \leq 3.34 \quad (174)$$

και επειδή $c = 100 \mu\text{m}$, είναι:

$$266 \mu\text{m} \leq g_m \leq 334 \mu\text{m} \quad (175)$$

Οι τιμές της εξίσωσης (175) ισχύουν διότι ο στροφέας κατά την λειτουργία του υβριδικού εδράνου ολίσθησης με υδροδυναμικό πεδίο, θα μπορεί να μετακινηθεί μέχρι μία συγκεκριμένη εκκεντρότητα e , δημιουργώντας ένα ελάχιστο πάχος λιπαντικού $h_{\min}$ και ένα μέγιστο πάχος λιπαντικού $h_{\max}$. Όταν έχουμε αυτό το σημείο λειτουργίας, θα πρέπει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο να μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά και σωστά.

Σε αυτό το σημείο λειτουργίας και για τα παραπάνω δεδομένα, βρίσκουμε μέσω των διαγραμμάτων Raymondi και Boyd ότι το $h_{\min}/c$ ισούται με 0.34. Επομένως, το ελάχιστο πάχος λιπαντικού είναι:

$$\frac{h_{\min}}{c} = 0.34 \Rightarrow h_{\min} = 0.34 \cdot 100 = 34 \mu\text{m} \quad (176)$$

Άρα, το μαγνητικό διάκενο g , έχει ελάχιστη τιμή σε αυτό το σημείο λειτουργίας του στροφέα:

$$g_{\min} = g_m + h_{\min} = 266 + 34 = 300 \mu\text{m} \quad (177)$$

και μέγιστη τιμή:

$$g_{\max} = g_m + h_{\max} = g_m + 2c - h_{\min} = 334 + 2 \cdot 100 - 34 = 500 \mu\text{m} \quad (178)$$

Οι τιμές αυτές ικανοποιούν την εξίσωση (166) που ορίσαμε στην αρχή και αναφέρονται στην ακραία περίπτωση όπου έχουμε τη μέγιστη τιμή εκκεντρότητας e του στροφέα, διότι υπολογίσαμε το ελάχιστο πάχος λιπαντικού μέσω των διαγραμμάτων Raymondi και Boyd. Για όλες τις μικρότερες τιμές εκκεντρότητας e του στροφέα, ικανοποιούνται οι ανισότητες της εξίσωσης (167), επομένως το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο μπορεί να λειτουργήσει σωστά σε κάθε περίπτωση και ως υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης και ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο και ως υβριδικό έδρανο, όταν χρησιμοποιήσουμε τις παραπάνω τιμές κατά το σχεδιασμό της γεωμετρίας του.

Γεωμετρία - σχεδιασμός υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο αποτελείται από τον στάτη, τα πηνία, το εσωτερικό δακτυλίδι, τον σωλήνα του λιπαντικού και τα καπάκια, όπως αυτά φαίνονται στις εικόνες 63 και 64.

Εικόνα 63. Ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο κλειστό

Εικόνα 64. Ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο ανοικτό

Ο στάτης διακρίνεται με τον αριθμό 3, τα πηνία διακρίνονται με τον αριθμό 4, το εσωτερικό δακτυλίδι διακρίνεται με τον αριθμό 7, ο σωλήνας του λιπαντικού διακρίνεται με τον αριθμό 1 και τα καπάκια διακρίνονται με τον αριθμό 2.

Εντός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, περιστρέφεται ο ρότορας, οποίος διακρίνεται με τον αριθμό 5, στην εικόνα 65. Επίσης, τοποθετούνται αισθητήρες που διακρίνονται με τον αριθμό 6. Οι αισθητήρες, είναι τοποθετημένοι στην X-διεύθυνση και στην Y-διεύθυνση, είναι αισθητήρες απόστασης και «διαβάζουν» τη θέση του ρότορα κάθε στιγμή και δίνουν το σήμα τους στο σύστημα ελέγχου, προκειμένου να γίνεται ο έλεγχος της τροφοδοσίας του λιπαντικού και ο έλεγχος του ρεύματος ελέγχου των πηνίων.

Εικόνα 65. Ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο με τον ρότορα και τους αισθητήρες στις X και Y-διευθύνσεις

Εικόνα 66. Ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο με τον ρότορα και τους αισθητήρες στις X και Y-διευθύνσεις, με διαφανή καπάκια

Εικόνα 67. Ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο με τον ρότορα και τους αισθητήρες στις X και Y-διευθύνσεις, χωρίς καπάκια, πλάγια όψη

Το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο αποτελείται από οκτώ πόλους, οι οποίοι συνδέονται ανά δύο όπως και στα ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα τα πηνία συνδέονται ανά δύο, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη δύναμη μαγνήτισης, επειδή οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές ακολουθούν τη γεωμετρία του στάτη και δεν ακολουθούν ροή στον αέρα. Για μεγαλύτερες διαμέτρους του ρότορα και του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, θα ήταν δυνατό να αποτελείται από περισσότερους

πόλους. Μετά από το συνδυασμό των οκτώ πόλων, προκύπτουν τελικά τέσσερις πόλοι, αντιδιαμετρικά, δύο στην X-διεύθυνση και δύο στην Y-διεύθυνση. Οι οκτώ πόλοι του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου φαίνονται στην εικόνα 68 και οι τέσσερις πόλοι που προκύπτουν μετά το συνδυασμό τους διακρίνονται στην εικόνα 71.

Ο στάτης έχει εξωτερική διάμετρο $2 \cdot R_4$, όπως φαίνεται στην εικόνα 68. Επίσης, ο κάθε πόλος έχει πλάτος b και η γωνία α ισούται με 22.5° , για την περίπτωση που έχουμε οκτώ πόλους ηλεκτρομαγνητών. Το πλάτος του εξωτερικού δακτυλιδιού του στάτη είναι $R_4 - R_3$.

Το ύψος της φαινόμενης επιφάνειας των πηνίων κάθε πόλου είναι hc , το πλάτος wc και η επιφάνεια $hc \cdot wc$, όπως φαίνεται στην εικόνα 68.

Εικόνα 68. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου με τον ρότορα

Ο στάτης μπορεί να έχει και τη διαμόρφωση που φαίνεται στην εικόνα 69. Δηλαδή, να αποτελείται από πολλά φύλλα ενωμένα μεταξύ τους, για την αποφυγή των δινορευμάτων, στην περίπτωση χρήσης εναλλασσόμενου ρεύματος για την τροφοδοσία των πηνίων.

Εικόνα 69. Στάτης ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου αποτελούμενος από πολλά φύλλα υλικού

Το μήκος του στάτη είναι $L\sigma$, όπως φαίνεται στην εικόνα 70. Το υλικό του στάτη είναι διαμαγνητικό, ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη δύναμη μαγνήτισης του ρότορα. Το μήκος του στάτη μαζί με τα πηνία των ηλεκτρομαγνητών είναι $L\eta$, το μήκος που έχει κάθε καπάκι είναι $L\kappa$ και το ολικό μήκος του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου είναι $L\omicron\lambda$.

Εικόνα 70. Τομή ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου

Σε κάθε έναν από τους οκτώ πόλους του στάτη, τοποθετούνται περιελίξεις από πηνίο. Ο αριθμός των περιελίξεων κάθε πόλου είναι N_w και η διάμετρος του σύρματος του πηνίου των περιελίξεων είναι d_w . Οι οκτώ πόλοι ενώνονται ανά δύο, μέσω συγκεκριμένης διεύθυνσης των περιελίξεων των πηνίων, όπως φαίνεται στην εικόνα 71, ώστε τελικά να προκύπτουν τέσσερις πόλοι, δύο στην Χ-διεύθυνση και δύο στην Υ-διεύθυνση. Ο κάθε πόλος, ενώνεται με έναν ενισχυτή σήματος και με το σύστημα ελέγχου που φαίνονται στην εικόνα 71. Το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει την τροφοδοσία ρεύματος στην αντλία του λιπαντικού και την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τα πηνία κάθε ηλεκτρομαγνητικού πόλου, με σκοπό το έδρανο να λειτουργεί με το επιθυμητό πεδίο, δηλαδή υδροδυναμικό, ηλεκτρομαγνητικό ή υβριδικό, και τη διατήρηση του ρότορα στην επιθυμητή θέση.

Εικόνα 71. Ολοκληρωμένο διάγραμμα συστήματος ελέγχου του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου

Ο εσωτερικός δακτύλιος (αντικείμενο 7 εικόνας 64) χρησιμοποιείται προκειμένου να διατηρούνται οι κατάλληλες αποστάσεις του ρότορα, από τους ηλεκτρομαγνήτες (ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο) και από την εσωτερική επιφάνεια του υβριδικού εδράνου ολίσθησης (υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης, για το οποίο ισχύει: $500 \leq R_b/c \leq 1000$) που διακρίνονται ως g και c στην εικόνα 68. Το εσωτερικό δακτυλίδι έχει μεταβλητό πάχος κατά την περιφέρειά του. Το μέγιστο πάχος του εσωτερικού δακτυλιδιού (7) είναι d και το ελάχιστο είναι ίσο με το διάκενο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (g) μείον την ακτινική χάρη του υδροδυναμικού πεδίου (c). Ο εσωτερικός δακτύλιος είναι κατασκευασμένος από μη μαγνητικό υλικό, π.χ. αλουμίνιο, ορείχαλκος, γραφίτης και μεταλλικό κράμα (graphite / metal alloy or Graphalloy) με θερμοκρασία λειτουργίας έως περίπου 540°C ή ανοξείδωτο σειράς 400, ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία του μαγνητικού πεδίου. Το εσωτερικό δακτυλίδι έχει μήκος L_σ , όπως φαίνεται στην εικόνα 70, αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής, για την περίπτωση που ο

ρότορας, ενώ περιστρέφεται, ακουμπήσει πάνω στο εσωτερικό δακτυλίδι λόγω κάποιου σφάλματος ή κάποιας αστοχίας ή στην περίπτωση ολικής απώλειας ισχύος όπου ο ρότορας εξαναγκασμένα έρχεται σε επαφή με το δακτυλίδι. Αυτό επιτρέπει την μειωμένη φθορά του εδράνου και του ρότορα σε απρόβλεπτες ή ασυνήθιστες συνθήκες λειτουργίας.

Ο σωλήνας του λιπαντικού είναι κατά προτίμηση πλαστικός με θερμική μόνωση και χρησιμοποιείται για την εισαγωγή του λιπαντικού στο εσωτερικό του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Ο σωλήνας του λιπαντικού, μπορεί να είναι και από άλλα υλικά, όπως π.χ. από αλουμίνιο με θερμική μόνωση. Το λιπαντικό εισέρχεται ανάμεσα στον ρότορα και στην εσωτερική επιφάνεια του υβριδικού εδράνου ολίσθησης όπου λειτουργεί το υδροδυναμικό τμήμα. Ο σωλήνας του λιπαντικού έχει μήκος όσο είναι απαραίτητο, ώστε να διαπεράσει τον στάτη και το εσωτερικό δακτυλίδι, όπως φαίνεται στην εικόνα 68. Η διάμετρος του σωλήνα του λιπαντικού είναι d_s (εικόνα 70). Το λιπαντικό εξέρχεται από το υβριδικό έδρανο ολίσθησης από τα πλάγια. Στην περίπτωση όπου όλο το λιπαντικό εξέλθει από το υβριδικό έδρανο ολίσθησης, ο χώρος ανάμεσα στο ρότορα και στο εσωτερικό δακτυλίδι παραμένει κενός και το υβριδικό έδρανο ολίσθησης μπορεί να λειτουργήσει ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό μόνο. Το λιπαντικό, χρησιμοποιείται επίσης για την ψύξη του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Τα καπάκια του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, χρησιμοποιούνται για τη συγκράτηση του λιπαντικού στο χώρο ανάμεσα στο εσωτερικό δακτυλίδι και στον ρότορα, ώστε να λειτουργεί το υδροδυναμικό πεδίο του εδράνου, και επίσης για την προστασία των ηλεκτρομαγνητών από εξωτερικούς παράγοντες, όπως σκόνη κλπ, που μπορεί να προκαλέσουν φθορά. Έχουν εσωτερική διάμετρο, ελάχιστα μεγαλύτερη από τη διάμετρο του ρότορα, ώστε να μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα και να μετακινείται ο ρότορας εντός του εδράνου. Το πλάτος των καπακιών L_k είναι λίγο μεγαλύτερο από το πλάτος των πηνίων, ώστε να καλύπτουν το σύνολο των εξαρτημάτων του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, όπως διακρίνεται στην εικόνα 70. Τα καπάκια είναι δυνατόν να είναι κατασκευασμένα από πλαστικό με μόνωση, ή από άλλο υλικό το οποίο δεν μαγνητίζεται, όπως αλουμίνιο, χρώμιο ή ανοξείδωτα της σειράς 400. Το συνολικό πλάτος του υβριδικού εδράνου ολίσθησης είναι $L_{ολ}$, όπως φαίνεται στην εικόνα 70.

Ο ρότορας έχει διάμετρο $2 \cdot R_2 = 2 \cdot R_j$, όπως φαίνεται στην εικόνα 68 και το υλικό του έχει την ιδιότητα να μαγνητίζεται, όπως είναι για παράδειγμα ο σίδηρος και κράματά του, χάλυβας και κράματά του ή ανοξείδωτο της σειράς 300. Προτιμότερο υλικό είναι ο σίδηρος, καθώς μαγνητίζεται περισσότερο από τα υπόλοιπα υλικά, και έτσι μπορεί το έδρανο να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο κατά την ενεργή ηλεκτρομαγνητική του λειτουργία.

Συντελεστής ελαστικότητας, συντελεστής απόσβεσης

Στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης, οι αντίστοιχοι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης του υδροδυναμικού και του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου προστίθενται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ρότορας να έχει καλύτερη ευστάθεια και να αντέχει σε κρουστικά φορτία.

Συγκεκριμένα, οι συντελεστές ελαστικότητας του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης, προστίθενται με τους συντελεστές ελαστικότητας θέσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου. Οι συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου προστίθενται ως ανεξάρτητοι συντελεστές, στην εξίσωση της δύναμης που ασκεί το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο στον ρότορα.

Οι συντελεστές απόσβεσης του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης, προστίθενται με τους συντελεστές απόσβεσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, μόνο στις διευθύνσεις των ηλεκτρομαγνητών. Εάν για παράδειγμα οι ηλεκτρομαγνήτες έχουν τη διάταξη που φαίνεται στην εικόνα 71, τότε οι συντελεστές απόσβεσης προστίθενται για την X-διεύθυνση και για την Y-διεύθυνση, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{\varepsilon X} \\ F_{\varepsilon Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{Xx}^{Y\Delta PO} + K_{Xx}^{EME} & K_{Xy}^{Y\Delta PO} + K_{Xy}^{EME} \\ K_{Yx}^{Y\Delta PO} + K_{Yx}^{EME} & K_{Yy}^{Y\Delta PO} + K_{Yy}^{EME} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{XxI}^{EME} & K_{XyI}^{EME} \\ K_{YxI}^{EME} & K_{YyI}^{EME} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{cX} \\ I_{cY} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{Xx}^{Y\Delta PO} + C_{Xx}^{EME} & C_{Xy}^{Y\Delta PO} \\ C_{Yx}^{Y\Delta PO} & C_{Yy}^{Y\Delta PO} + C_{Yy}^{EME} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} \quad (179)$$

Μοντελοποίηση του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, με προγραμματισμό στο Ansys

Η λειτουργία του υβριδικού εδράνου ολίσθησης προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ANSYS MULTIPHYSICS. Προκειμένου να προσομοιωθεί το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο και να έχουμε ως αποτελέσματα τα διάφορα σημεία ισορροπίας, τους συντελεστές ελαστικότητας και τους συντελεστές απόσβεσης του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία.

Τα δεδομένα τα οποία εισάγουμε προκειμένου να γίνει η επίλυση του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, είναι το συνολικό φορτίο που θα πρέπει να παραλαμβάνει το υβριδικό έδρανο ολίσθησης, το ποσοστό αυτού του φορτίου που θα παραλαμβάνει το υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, το οποίο μπορεί να είναι μεταβλητό και να αλλάζει σε κάθε επανάληψη της επίλυσης, όλα τα υπόλοιπα δεδομένα για το υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης και όλα τα υπόλοιπα δεδομένα για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Σε κάθε περίπτωση που το έδρανο λειτουργεί υβριδικά, έχουμε επιλέξει τα διάφορα σημεία ισορροπίας του ρότορα να είναι τα σημεία ισορροπίας του υδροδυναμικού τμήματος, με σκοπό να μην είναι απαραίτητο το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα να παραλαμβάνει δυνάμεις φορτίου κατά την X-διεύθυνση και να μην παραλαμβάνει φορτίο κατά την Y-διεύθυνση το οποίο θα μπορούσε να παραλαμβάνει το υδροδυναμικό τμήμα. Με αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, η τροχιά που ακολουθεί ο ρότορας είναι η τροχιά που θα έκανε αυτός μέσα στο υδροδυναμικό πεδίο, όταν θα μεταβαλλόταν το φορτίο του ρότορα από την τιμή μηδέν έως τη μέγιστη τιμή που έχει την ικανότητα να παραλάβει το υδροδυναμικό τμήμα. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε αύξηση παραλαβής φορτίου, διότι υπάρχει η δυνατότητα να παραλαμβάνει το υδροδυναμικό τμήμα το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα να παραλαμβάνει και αυτό το μέγιστο επιτρεπτό του φορτίο και έτσι το υβριδικό έδρανο ολίσθησης παραλαμβάνει συνολικά μεγαλύτερο φορτίο

από κάθε είδος εδράνου ξεχωριστά.

Επομένως, αρχικά το ANSYS επιλύει το υδροδυναμικό πεδίο προκειμένου να βρεθεί το σημείο ισορροπίας του ρότορα (ε, φ). Αυτό το σημείο ισορροπίας εισάγεται στα δεδομένα για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης και μέσω του ANSYS υπολογίζονται τα απαραίτητα ρεύματα ελέγχου για τις X και Y διευθύνσεις, ώστε να παραμένει ο ρότορας σε αυτό το σημείο σταθερός. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε πετύχει να είναι το σημείο ισορροπίας του ρότορα το σημείο ισορροπίας του υδροδυναμικού τμήματος και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα ενεργεί υποστηρικτικά, εφαρμόζοντας τα κατάλληλα ρεύματα ελέγχου ώστε να διατηρείται ο ρότορας σε αυτό το σημείο σταθερός.

Η παραπάνω διαδικασία προσομοίωσης επαναλαμβάνεται για όσες διαφορετικές τιμές του εξωτερικού φορτίου επιθυμούμε και για όσα διαφορετικά ποσοστά του φορτίου αυτού επιλέγουμε να παραλαμβάνει το υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Επίσης, μέσω του Ansys, υπολογίζονται ξεχωριστά οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης και των δύο τμημάτων του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, και προσθέτονται όπως περιγράφηκε στην εξίσωση (179), ώστε να υπολογιστούν οι υβριδικοί συντελεστές.

Προκειμένου να προσομοιωθεί το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο στο Ansys, στη γεωμετρία του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου ολίσθησης προσθέτουμε και τον εσωτερικό δακτύλιο, όπως φαίνεται στην εικόνα 72 το μπλε τμήμα, ο οποίος είναι απαραίτητος για να μετατραπεί το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο σε ενεργό υδρομαγνητικό.

α)

Εικόνα 72. Ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο, εσωτερικός δακτύλιος, α) σε πλήρη έδρανο, β) μεγέθυνση

Τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Ας υποθέσουμε ότι το συνολικό φορτίο που πρέπει να παραλάβει το υβριδικό έδρανο ολίσθησης στην Υ-διεύθυνση είναι W . Συμβολίζουμε με F_Y^{EME} το τμήμα του φορτίου αυτού, που παραλαμβάνεται από το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα μέσω των ηλεκτρομαγνητών του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, ενώ με F_Y^{YAPO} το τμήμα του φορτίου αυτού, που παραλαμβάνεται από το υδροδυναμικό τμήμα μέσω της πίεσης του λιπαντικού.

Εάν ορίσουμε $a = [0,1]$, $a \in \mathbb{R}$ το τμήμα του συνολικού φορτίου που παραλαμβάνεται από το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, τότε διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

$$\begin{aligned}
 1. \quad & F_Y^{EME} = 0, \quad F_Y^{YAPO} = W, \quad a = 0 \\
 2. \quad & F_Y^{EME} = W, \quad F_Y^{YAPO} = 0, \quad a = 1 \\
 3. \quad & F_Y^{EME} = aW, \quad F_Y^{YAPO} = (1-a)W, \quad 0 < a < 1
 \end{aligned} \tag{180}$$

Στην πρώτη και στη δεύτερη περίπτωση, το σύνολο του φορτίου παραλαμβάνεται από το υδροδυναμικό ή το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα αντίστοιχα.

Στην τρίτη περίπτωση, το συνολικό φορτίο διαχωρίζεται σε δύο μέρη τα οποία παραλαμβάνονται από τα δύο τμήματα του εδράνου ταυτόχρονα. Το πρώτο μέρος είναι aW το οποίο παραλαμβάνεται από το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα και το δεύτερο $(1-a)W$ το οποίο παραλαμβάνεται από το υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Σε κάθε περίπτωση ισχύει ότι: $F_Y^{EME} + F_Y^{YAPO} = W$.

Έστω ότι το υβριδικό έδρανο ολίσθησης έχει λόγο μήκους προς διάμετρο $L/D = 0.5$, ιξώδες λιπαντικού $\mu = 0.012$ Pa.s, πυκνότητα λιπαντικού $\rho = 960$ kg/m³, ακτίνα του ρότορα $R_2 = R_j = 46.5$ mm (εικόνα 68), ακτινική χάρη $c = 70$ μm. Ο ρότορας

περιστρέφεται με 50 rps. Το υβριδικό έδρανο ολίσθησης έχει 8 πόλους, ανά δύο ενωμένους με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται ηλεκτρομαγνήτες στις X και Y-διευθύνσεις και όχι σε 45° περιστροφή σε σχέση με το κατακόρυφο επίπεδο, με 129 mm^2 επιφάνεια πηνίων και σταθερό ρεύμα που διαρρέει τα πηνία 2A. Το πάχος του ρότορα στο οποίο περνάνε οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι 14.35 mm (εσωτερικά του πάχους αυτού, ο ρότορας μοντελοποιείται ως αέρας, με σκοπό να αποφευχθεί η διείσδυση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του ρότορα, γεγονός που ισχύει όταν ο ρότορας περιστρέφεται), το μαγνητικό διάκενο είναι $g = 0.44 \text{ mm}$, ο αριθμός των περιελίξεων ανά πόλο είναι 100, το πλάτος κάθε πόλου είναι 18 mm, η εσωτερική διάμετρος του στάτη είναι 127 mm, η εξωτερική διάμετρος του εδράνου είναι 164 mm και το πάχος του εσωτερικού δακτυλίου είναι 5 mm. Το συνολικό φορτίο που πρέπει να παραλαμβάνει το έδρανο θεωρούμε ότι είναι $W = 1500 \text{ N}$.

Με τα παραπάνω δεδομένα, θα παρουσιαστούν στη συνέχεια τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Περίπτωση λειτουργίας 1. Σταθερό φορτίο

Σύμφωνα με την περίπτωση λειτουργίας του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, όπου έχουμε σταθερό συνολικό φορτίο που παραλαμβάνει το υβριδικό έδρανο ολίσθησης, αρχικά το σύνολο αυτού του φορτίου παραλαμβάνεται από το υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Ο αριθμός Sommerfeld

μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση: $S = \frac{\mu_v N_s}{P} \left(\frac{R_j}{c} \right)^2$. Ένα σημείο

ισορροπίας $(\varepsilon, \varphi) = (e_x, e_y)$ αντιστοιχεί σε αυτόν τον αριθμό Sommerfeld. Στη συνέχεια, το φορτίο που παραλαμβάνεται από το υδροδυναμικό πεδίο μειώνεται σταδιακά και το φορτίο που παραλαμβάνεται από το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αυξάνεται, με τέτοιο τρόπο που το άθροισμα του φορτίου που παραλαμβάνει το υδροδυναμικό και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης να παραμένει σταθερό και ίσο με W (εικόνα 73).

Εικόνα 73. Συνολικό, υδροδυναμικό και ενεργό ηλεκτρομαγνητικό φορτίο

Αυτή η σταδιακή μεταβολή στην παραλαβή του φορτίου από το υδροδυναμικό πεδίο στο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, οδηγεί στη μεταβολή του σημείου ισορροπίας του ρότορα, διότι το φορτίο που παραλαμβάνει το υδροδυναμικό πεδίο μειώνεται και έχουμε επιλέξει τα διάφορα σημεία ισορροπίας του ρότορα μέσα στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης να είναι σημεία ισορροπίας του υδροδυναμικού του πεδίου κάθε στιγμή. Τα διάφορα σημεία ισορροπίας, άρα και η τροχιά του ρότορα φαίνονται στην εικόνα 74. Στην εικόνα 74, ο αριθμός 1 στην τροχιά του ρότορα αντιστοιχεί σε $\alpha=0$ δηλαδή μόνο το υδροδυναμικό πεδίο να είναι ενεργό, ο αριθμός 2 αντιστοιχεί σε $\alpha=0.1$, ο αριθμός 3 αντιστοιχεί σε $\alpha=0.2$ κλπ και τέλος ο αριθμός 11 αντιστοιχεί σε $\alpha=1$ που σημαίνει ότι μόνο το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι ενεργό, γι' αυτό και το σημείο ισορροπίας είναι το κέντρο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης (0,0).

Εικόνα 74. Τροχιά του ρότορα μέσα στο υβριδικό έδρανο ολίσθησης

Με αυτόν τον τρόπο, η λειτουργία του εδράνου μπορεί να περάσει από την υδροδυναμική λειτουργία στην ενεργή ηλεκτρομαγνητική λειτουργία, και σταδιακά τα κέντρα του ρότορα και του εδράνου να ταυτιστούν.

Η λειτουργία αυτή, περιγράφεται από την εξίσωση (180).

Οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης του υδροδυναμικού πεδίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης συναρτήσει του αριθμού α , φαίνονται στις εικόνες 75 και 76.

Εικόνα 75. Υδροδυναμικοί συντελεστές ελαστικότητας

Εικόνα 76. Υδροδυναμικοί συντελεστές απόσβεσης

Οι αδιάστατοι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης του υδροδυναμικού πεδίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης συναρτήσει του αριθμού α φαίνονται στις εικόνες 77 και 78.

Εικόνα 77. Αδιάστατοι υδροδυναμικοί συντελεστές ελαστικότητας

Εικόνα 78. Αδιάστατοι υδροδυναμικοί συντελεστές απόσβεσης

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού τμήματος του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, στις εικόνες 79 και 80 φαίνονται τα ρεύματα ελέγχου για την X και Y-διεύθυνση συναρτήσει του αριθμού α , αντίστοιχα.

Εικόνα 79. Ρεύμα ελέγχου στην X-διεύθυνση

Εικόνα 80. Ρεύμα ελέγχου στην Y-διεύθυνση

Οι μαγνητικοί συντελεστές απόσβεσης για τις X και Y-διευθύνσεις, συναρτήσει του αριθμού α φαίνονται στην εικόνα 81.

Εικόνα 81. Μαγνητικοί συντελεστές απόσβεσης για τις X και Y-διευθύνσεις

Οι συντελεστές ελαστικότητας θέσης του υδροδυναμικού και του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού τμήματος προστίθενται και προκύπτουν οι υβριδικοί συντελεστές, οι οποίοι φαίνονται στην εικόνα 82.

Εικόνα 82. Υβριδικοί συντελεστές ελαστικότητας θέσης

Όταν και τα δύο πεδία (υδροδυναμικό και ενεργό ηλεκτρομαγνητικό) του υβριδικού εδράνου ολίσθησης είναι ενεργά, τότε οι υβριδικοί συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος φαίνονται στην εικόνα 83 και στην εικόνα 84 και είναι οι συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού τμήματος, καθώς το υδροδυναμικό πεδίο δεν έχει τέτοιου είδους συντελεστές.

Εικόνα 83. Υβριδικοί συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος (K_{Xxl} , K_{Yyl})

Εικόνα 84. Υβριδικοί συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος (K_{Xyl} , K_{Yxl})

Όταν και τα δύο πεδία του υβριδικού εδράνου ολίσθησης είναι ενεργά, τότε οι υβριδικοί συντελεστές απόσβεσης για τις X και Y-διευθύνσεις, φαίνονται στην εικόνα 85.

Εικόνα 85. Υβριδικοί συντελεστές απόσβεσης για τις X και Y-διευθύνσεις

Η μεταβολή του αριθμού Sommerfeld συναρτήσει του αριθμού α φαίνεται στην εικόνα 86.

Εικόνα 86. Αριθμός Sommerfeld συναρτήσει του αριθμού α

Περίπτωση λειτουργίας 2. Σταθερό σημείο ισορροπίας

Σύμφωνα με την περίπτωση του σταθερού σημείου ισορροπίας, όταν το υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης παραλαμβάνει φορτίο $F_Y^{YΔΡΟ}$, για συγκεκριμένο αριθμό Sommerfeld S , υπάρχει ένα συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας (ε, φ) .

Στη συνέχεια, το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενεργοποιείται σταδιακά, αυξάνοντας το ρεύμα ελέγχου των ηλεκτρομαγνητών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ικανότητα παραλαβής φορτίου, διατηρώντας όμως σταθερό το σημείο ισορροπίας. Με αυτόν τον τρόπο, το υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης παραλαμβάνει κάποιο συγκεκριμένο φορτίο, και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα ενεργοποιείται και παραλαμβάνει επιπλέον φορτίο, με αποτέλεσμα την αύξηση της ικανότητας παραλαβής φορτίου, σε σταθερό σημείο ισορροπίας.

Για παράδειγμα, με τα δεδομένα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης που έχουμε περιγράψει προηγουμένως, εάν το υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης παραλαμβάνει φορτίο 1500 N, τότε, ο αριθμός Sommerfeld είναι $S = 0.7$ και το σημείο ισορροπίας είναι $(\varepsilon, \varphi) = (0.4, 64.7^\circ)$. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, με σταθερό ρεύμα που διαρρέει τα πηνία και στην X και στην Y-διεύθυνση $I_b = 2$ A, ρεύμα ελέγχου στην X-διεύθυνση $I_{cX} = -0.134$ A, και στην Y-διεύθυνση $I_{cY} = 4.071$ A, παραλαμβάνει επιπλέον φορτίο 1500 N, με αποτέλεσμα το συνολικό φορτίο που παραλαμβάνει το υβριδικό έδρανο ολίσθησης να είναι 3000 N, διατηρώντας το σημείο ισορροπίας του ρότορα σταθερό.

Εάν το έδρανο ήταν μόνο υδροδυναμικό, τότε το σημείο ισορροπίας του ρότορα θα μεταβαλλόταν προκειμένου να παραλάβει 3000 N, αυξάνοντας την πίεση που δέχεται το λιπαντικό, τη θερμοκρασία του και τη φθορά του.

Εάν το έδρανο ήταν μόνο ενεργό ηλεκτρομαγνητικό, τότε θα χρειαζόταν πολύ μεγαλύτερη ένταση ρεύματος να διαρρέει τα πηνία, προκειμένου να παραλάβει 3000 N, αυξάνοντας την κατανάλωση σε ηλεκτρικό ρεύμα και αυξάνοντας τη θερμοκρασία των πηνίων και του εδράνου συνολικά.

Επιπλέον, κατά την υβριδική λειτουργία, οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης προστίθενται, με αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας του ρότορα κατά την περιστροφή του, άρα και την αύξηση της ασφάλειας που παρέχει το έδρανο στην κατασκευή που τοποθετείται.

Περίπτωση λειτουργίας 3. Αύξηση σταθερότητας του ρότορα

Σύμφωνα με αυτή την περίπτωση λειτουργίας, ενώ λειτουργεί το υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, διατηρώντας το συνολικό φορτίο σταθερό ($W = 1500$ N) καθώς και το σημείο ισορροπίας του ρότορα, το ρεύμα που διαρρέει τους ηλεκτρομαγνήτες αυξάνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το σημείο ισορροπίας να παραμένει σταθερό, με σκοπό την αύξηση των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης του εδράνου.

Αυτό συμβαίνει επειδή το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης θα παραλαμβάνει τυχόν αζυγοσταθμίες του ρότορα κατά την περιστροφή του ή απότομες μεταβολές του εξωτερικού φορτίου.

Έτσι, οι συντελεστές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και οι συντελεστές του

υδροδυναμικού πεδίου προστίθενται, με αποτέλεσμα κατά την υβριδική λειτουργία του εδράνου να ξεπερνάμε πιθανές αστάθειες του ρότορα που θα είχαμε εάν λειτουργούσε μόνο ως υδροδυναμικό ή μόνο ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο.

Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της γεωμετρίας των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων, ανάλυση των εξισώσεων που τα αφορούν, ανάλυση των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης του ρότορα μέσα στα ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα και η μοντελοποίηση και προσομοίωση της λειτουργίας τους στο πρόγραμμα Ansys, το οποίο επιλύει το υδροδυναμικό τμήμα και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης και δίνει τα αποτελέσματα για τα ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα.

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων στο Ansys όπως προγραμματίστηκε, είναι το σημείο ισορροπίας του ρότορα στην X και Y-διεύθυνση, θεωρώντας ως (0,0) το κέντρο του εδράνου, ο λόγος της εκκεντρότητας ε , η εκκεντρότητα e και η γωνία συμπεριφοράς φ , η κατανομή της πίεσης του λιπαντικού κατά μήκος της περιφέρειάς του, οι υβριδικοί συντελεστές ελαστικότητας (K) και απόσβεσης (C), οι συντελεστές τριβής του εδράνου και του ρότορα. Επίσης, αποτελέσματα παίρνουμε και για το κατάλληλο ρεύμα ελέγχου για τις διευθύνσεις X και Y, ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία των δυνάμεων για το συγκεκριμένο επιθυμητό σημείο ισορροπίας του ρότορα κάθε φορά και για το επιθυμητό φορτίο που δέχεται ο ρότορας.

Αυτά τα αποτελέσματα το Ansys αποθηκεύει σε αρχεία txt, τα οποία θα χρειαστούν στη συνέχεια.

Η προσομοίωση των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων στο πρόγραμμα Ansys αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο δεν έγινε αναφορά στον έλεγχο των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων. Ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων πραγματοποιείται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5

Σχεδιασμός Συστήματος Ελέγχου Υβριδικών Εδράνων Ολίσθησης

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναφερθούμε στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων. Το κεφάλαιο αυτό είναι μία συνέχεια του 3^{ου} κεφαλαίου, το οποίο αναφερόταν στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων. Τα ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα στις περιπτώσεις που λειτουργούν ως υδροδυναμικά είναι ευσταθή, κατά τις περιπτώσεις που αυτό δηλώνουν οι νόμοι που δείχνουν την ευστάθεια των εδράνων αυτών, όταν λειτουργούν ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά είναι ασταθή χωρίς την παρουσία του κατάλληλου ελεγκτή και όταν λειτουργούν ως ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα, όταν η επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού τμήματος είναι μηδαμινή σε σχέση με τις υδροδυναμικές δυνάμεις, στην περίπτωση ευστάθειας του υδροδυναμικού τμήματος, το έδρανο είναι ευσταθές χωρίς την παρουσία ελεγκτή. Όταν όμως οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις είναι συγκρίσιμες με τις υδροδυναμικές, τότε η παρουσία ενός κατάλληλου ελεγκτή για το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο είναι απαραίτητη. Ο ελεγκτής ρυθμίζει το ρεύμα ελέγχου που θα διαρρέει το κάθε πηνίο, με τέτοιο τρόπο ώστε να αιωρείται ο ρότορας και να βρίσκεται στο επιθυμητό σημείο εντός του εδράνου.

Ο ελεγκτής που θα παρουσιαστεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι ελεγκτής PID, ο οποίος μοντελοποιείται στο Matlab και στο Simulink module του Matlab. Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει ανάλυση του τρόπου μοντελοποίησης και προσομοίωσης του ελεγκτή PID στο Matlab και στο Simulink module του Matlab, ανάλυση του τρόπου σύνδεσης του Matlab με το πρόγραμμα Ansys προκειμένου να εισάγονται και να εξάγονται δεδομένα από το ένα πρόγραμμα στο άλλο, ανάλυση του τρόπου εύρεσης των κερδών P, I και D και ανάλυση των αποτελεσμάτων που αφορούν την τροχιά του ρότορα, τα ρεύματα ελέγχου και τις υδροδυναμικές δυνάμεις, για τις X και Y-διευθύνσεις.

Η μοντελοποίηση της προσομοίωσης του ελεγκτή των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων γίνεται χρησιμοποιώντας τις μη-γραμμικές μαγνητικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του εδράνου και επιλύοντας τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα εντός του υδροδυναμικού πεδίου του εδράνου μέσω του προγράμματος Ansys, με σκοπό να έχουμε ως αποτέλεσμα την πραγματική κίνησή του και όχι τη γραμμικοποιημένη. Επιθυμούμε να έχουμε την πραγματική κίνηση του ρότορα ως αποτέλεσμα, διότι θα πρέπει να έχουμε τη δυνατότητα να μετακινούμε τον ρότορα σε ένα σύνολο διαφορετικών σημείων ισορροπίας εντός του εδράνου αυτού και συγκεκριμένα στα σημεία ισορροπίας του υδροδυναμικού εδράνου ολίσθησης. Επίσης, η μοντελοποίηση του ελεγκτή στο Matlab και στο Simulink module του Matlab γίνεται με παραμετρικό τρόπο, ώστε να έχουμε τη δυνατότητα τροποποίησης των χαρακτηριστικών του ελεγκτή και των χαρακτηριστικών των εδράνων, με σκοπό την καλύτερη επιλογή των κερδών του ελεγκτή για κάθε περίπτωση.

Το σύστημα ελέγχου που θα περιγράψουμε στη συνέχεια, αναφέρεται στη χρήση PID ελεγκτή, του οποίου τα κέρδη προκύπτουν μετά από γραμμικοποίηση των εξισώσεων της κίνησης του ρότορα, και εφαρμογή του ελεγκτή αυτού σε μη-γραμμικό μοντέλο του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του εδράνου, όπως αυτές περιγράφονται από τις εξισώσεις των δυνάμεων για τις X και Y -διευθύνσεις (εξισώσεις (44) και (46)) και τις εξισώσεις διατήρησης της μάζας (10) και της διατήρησης της ορμής (11) που αναφέρονται στο υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Προκειμένου να βρούμε τα κέρδη του ελεγκτή PID, χρησιμοποιούμε τις γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού τμήματος του εδράνου, οι οποίες περιγράφονται από τις εξισώσεις των δυνάμεων στις X και Y -διευθύνσεις (71) και (72), στους συντελεστές των οποίων προσθέτουμε και τους αντίστοιχους συντελεστές των υδροδυναμικών εδράνων ολίσθησης. Αυτές οι γραμμικές εξισώσεις αναφέρονται σε μικρές μετατοπίσεις του ρότορα γύρω από το κέντρο του εδράνου. Επομένως, τα κέρδη PID που θα βρούμε μέσω των γραμμικών αυτών εξισώσεων θα είναι βέλτιστα για το κέντρο του εδράνου. Όμως, εφόσον θα χρησιμοποιήσουμε κατά την προσομοίωση τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα, θα έχουμε τη δυνατότητα να δούμε την πραγματική συμπεριφορά της κίνησης του ρότορα, όταν αυτός θα κινείται σε οποιαδήποτε περιοχή επιθυμούμε εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, με τη χρήση των συγκεκριμένων κερδών του PID ελεγκτή.

Επομένως, θα μετασχηματίσουμε τις γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Laplace και στη συνέχεια θα αναπτύξουμε το μοντέλο ελέγχου στο Matlab και στο Simulink module του Matlab. Τα κέρδη PID προκύπτουν μέσω της robust μεθόδου ελέγχου, στο Single-Input-Single-Output (SISO) εργαλείο του Matlab. Επίσης, στη μοντελοποίηση αυτή λαμβάνουμε υπόψη την αζυγοσταθμία του ρότορα, το γυροσκοπικό φαινόμενο καθώς και τη μέγιστη τιμή της έντασης ρεύματος με την οποία επιτρέπεται να τροφοδοτούνται τα πηνία.

Ως αποτελέσματα έχουμε την απόκριση του ρότορα, την υπερακόντισή του, την τροχιά του, την ταχύτητά του, τα ρεύματα ελέγχου για τις X και Y -διευθύνσεις και τις δυνάμεις του υδροδυναμικού πεδίου του εδράνου.

Ο σχεδιασμός του ελεγκτή των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων στο πρόγραμμα Matlab και στο Simulink module του Matlab με συνδυασμό με το Ansys, αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει έλεγχο ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων.

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρότορα και του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, φαίνονται στις εικόνες 48 και 68 αντίστοιχα. Ο τρόπος σύνδεσης των πηνίων είναι τέτοιος ώστε να δημιουργούνται ζεύγη πόλων στις X και Y -διευθύνσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 18.

Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου

Το σχηματικό διάγραμμα του ελέγχου του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου φαίνεται στην εικόνα 87.

Εικόνα 87. Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου

Ένα απλό σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου για ένα βαθμό ελευθερίας, για την X και Y-διεύθυνση, φαίνεται στις εικόνες 50 και 51.

Εξισώσεις κίνησης του ρότορα μέσα στο ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο, με αζυγοσταθμία και γυροσκοπικό φαινόμενο του ρότορα

Ο ρότορας, που όπως αναφέρθηκε έχει τις διαστάσεις που φαίνονται στην εικόνα 48, στο αριστερό άκρο του είναι στερεωμένος στο τσοκ του ηλεκτροκινητήρα που τον περιστρέφει. Αυτό το τσοκ περιορίζει τις μετατοπίσεις του άξονα σε όλες τις διευθύνσεις και αφήνει ελεύθερη την περιστροφή του γύρω από τους άξονες X, Y και Z, όπως φαίνεται στην εικόνα 52.

Το κυλινδρικό τμήμα του ρότορα (εικόνα 52, τμήμα R), στο οποίο ενεργούν οι ηλεκτρομαγνητικές και υδροδυναμικές δυνάμεις από το έδρανο, βρίσκεται σε απόσταση L από το αριστερό άκρο του ρότορα.

Προκειμένου να προκύψουν οι εξισώσεις κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, στις εξισώσεις του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου του κεφαλαίου 3, θα προσθέσουμε τις δυνάμεις που ενεργούν στον ρότορα, λόγω του υδροδυναμικού πεδίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Συγκεκριμένα, οι όροι M_X και M_Y της εξίσωσης (122) έχουν ακόμα έναν όρο ο οποίος προκαλεί ροπή γύρω από τον X και Y-άξονα. Έστω $F_{υδροX}$ και $F_{υδροY}$ οι δυνάμεις λόγω του υδροδυναμικού πεδίου που ενεργούν στον ρότορα στο σημείο που βρίσκεται το

υβριδικό έδρανο ολίσθησης. Τότε, οι ροπές των δυνάμεων αυτών είναι:

$$\begin{aligned} M_{\text{υδροX}} &= -F_{\text{υδροY}} L \\ M_{\text{υδροY}} &= F_{\text{υδροX}} L \end{aligned} \quad (181)$$

Οι ροπές αυτές προστίθενται στις ροπές της εξίσωσης (128), επομένως, οι ροπές συνολικά είναι:

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} M_X &= M_{gX} + M_{bX} + M_{\alpha\zeta\gamma X} + M_{F_{\epsilon\zeta X}} + M_{\text{υδροX}} \\ M_Y &= M_{bY} + M_{\alpha\zeta\gamma Y} + M_{\text{υδροY}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\ M_X &= mg_a L_a - (F_{1Y} - F_{2Y}) L - m_{\alpha\zeta\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma} + F_{\epsilon\zeta Y} \cdot L_{F_{\epsilon\zeta Y}} - F_{\text{υδροY}} L \\ M_Y &= (F_{1X} - F_{2X}) L + m_{\alpha\zeta\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma} + F_{\text{υδροX}} L \end{aligned} \quad (182)$$

Έτσι, η εξίσωση (122) γράφεται λόγω της εξίσωσης (182) ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y} &= \frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{x} - \frac{L}{I_1} \left(mg_a L_a - (F_{1Y} - F_{2Y}) L - m_{\alpha\zeta\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma} + \right. \\ &\quad \left. F_{\epsilon\zeta Y} \cdot L_{F_{\epsilon\zeta Y}} - F_{\text{υδροY}} L \right) \\ \ddot{x} &= -\frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{y} + \frac{L}{I_1} \left((F_{1X} - F_{2X}) L + m_{\alpha\zeta\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma} + F_{\text{υδροX}} L \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (183)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{x} - \frac{mg_a L_a L}{I_1} + \frac{L^2}{I_1} (F_{1Y} - F_{2Y}) + \frac{m_{\alpha\zeta\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma} L}{I_1} - \\ &\quad \frac{F_{\epsilon\zeta Y} \cdot L_{F_{\epsilon\zeta Y}} L}{I_1} + \frac{F_{\text{υδροY}} L^2}{I_1} \end{aligned} \quad (184)$$

$$\ddot{x} = -\frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{y} + \frac{L^2}{I_1} (F_{1X} - F_{2X}) + \frac{m_{\alpha\zeta\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma} L}{I_1} + \frac{F_{\text{υδροX}} L^2}{I_1}$$

Άρα, οι τελικές μη-γραμμικές εξισώσεις της κίνησης του ρότορα μέσα στο ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο, λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα του ρότορα, την αζυγοσταθμία, το γυροσκοπικό φαινόμενο, τις εξωτερικές δυνάμεις και τις υδροδυναμικές δυνάμεις που δέχεται ο ρότορας, είναι:

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{x} - \frac{mg_a L_a L}{I_1} + \frac{L^2}{I_1} \left(\mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bY} + I_{cY}}{g - y} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - I_{cY}}{g + y} \right)^2 \right] \right) + \\ &\quad \frac{m_{\alpha\zeta\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma} \eta\mu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma} L}{I_1} - \frac{F_{\epsilon\zeta Y} \cdot L_{F_{\epsilon\zeta Y}} \cdot L}{I_1} + \frac{F_{\text{υδροY}} L^2}{I_1} \\ \ddot{x} &= -\frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{y} + \frac{L^2}{I_1} \left(\mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bX} + I_{cX}}{g - x} \right)^2 - \left(\frac{I_{bX} - I_{cX}}{g + x} \right)^2 \right] \right) + \\ &\quad \frac{m_{\alpha\zeta\gamma} \Omega^2 d_{\alpha\zeta\gamma} \sigma\upsilon\nu(\Omega t) L_{\alpha\zeta\gamma} L}{I_1} + \frac{F_{\text{υδροX}} L^2}{I_1} \end{aligned} \quad (185)$$

ή οι τελικές γραμμικές εξισώσεις, σύμφωνα και με τις εξισώσεις (65) και (68) της κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα του ρότορα, την αζυγοσταθμία, το γυροσκοπικό φαινόμενο τις εξωτερικές δυνάμεις και τις υδροδυναμικές δυνάμεις που δέχεται ο ρότορας, είναι:

$$\ddot{y} = \frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{x} - \frac{mg_a L_a L}{I_1} + \frac{L^2}{I_1} (K_{YI} I_{cY} - K_{Yy} y) + \frac{m_{a\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma\gamma} \eta \mu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} - \frac{F_{e\zeta Y} \cdot L_{Fe\zeta Y} L}{I_1} + \frac{F_{υδρoY} L^2}{I_1} \quad (186)$$

$$\ddot{x} = -\frac{\Omega I_K}{I_1} \dot{y} + \frac{L^2}{I_1} (K_{XI} I_{cX} - K_{Xx} x) + \frac{m_{a\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma\gamma} \sigma \nu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} + \frac{F_{υδρoX} L^2}{I_1}$$

Στις προσομοιώσεις μας στο Matlab, η εξίσωση (186) χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση του ρότορα στις X και Y-διευθύνσεις. Προκειμένου να επιλύεται η εξίσωση (186) από το Matlab, ορίζουμε $X_1=y$, $X_2=\dot{y}$, $X_3=x$, $X_4=\dot{x}$ και οι είσοδοι για το σύστημα ορίζονται: $u_1=I_{cY}$, $u_2=I_{cX}$, $u_3=F_{υδρoY}$, $u_4=F_{υδρoX}$. Επομένως, έχουμε στο Matlab:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= \ddot{y} = \frac{\Omega I_K}{I_1} X_4 - \frac{mg_a L_a L}{I_1} + \frac{L^2}{I_1} \left(\mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bY} + u_1}{g - X_1} \right)^2 - \left(\frac{I_{bY} - u_1}{g + X_1} \right)^2 \right] \right) \\ &\quad + \frac{m_{a\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma\gamma} \eta \mu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} - \frac{F_{e\zeta Y} \cdot L_{Fe\zeta Y} \cdot L}{I_1} + \frac{u_3 L^2}{I_1} \\ \dot{X}_3 &= X_4 \end{aligned} \quad (187)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_4 &= \ddot{x} = -\frac{\Omega I_K}{I_1} X_2 + \frac{L^2}{I_1} \left(\mu_0 N_w^2 A \left[\left(\frac{I_{bX} + u_2}{g - X_2} \right)^2 - \left(\frac{I_{bX} - u_2}{g + X_2} \right)^2 \right] \right) \\ &\quad + \frac{m_{a\zeta\gamma\gamma} \Omega^2 d_{a\zeta\gamma\gamma} \sigma \nu(\Omega t) L_{a\zeta\gamma\gamma} L}{I_1} + \frac{u_4 L^2}{I_1} \end{aligned}$$

Προσομοίωση του συστήματος ελέγχου του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, με προγραμματισμό στο Matlab και στο Simulink module του Matlab

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου καθώς και ο υπολογισμός των κερδών του PID ελεγκτή, προσομοιώθηκαν στο Matlab.

Αρχικά, εισάγουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του γραμμικοποιημένου συστήματος στο Matlab και μέσω του Single-Input-Single-Output (SISO) tool module του Matlab βρίσκουμε τα κατάλληλα κέρδη του ελεγκτή PID, με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, στις εξισώσεις (134) έως (136).

Εισαγωγή δεδομένων για την προσομοίωση του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου

Τα δεδομένα τα οποία εισάγουμε για την προσομοίωση του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου είναι:

- μήκος εδράνου $L=25$ mm,
- λόγος μήκους προς διάμετρο εδράνου $L / D=0.625$,
- ιξώδες λιπαντικού $\mu=0.012$ Pa×sec,
- πυκνότητα λιπαντικού $\rho=960$ kg/m³,
- ακτίνα ρότορα $R_j=20$ mm,
- μαγνητική διαπερατότητα κενού $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ N/A²,
- αριθμός πόλων=8, ενωμένοι ανά δύο όπως στην εικόνα 18,
- σταθερό ρεύμα που διαρρέει τα πηνία=0.2 Ampere και στις δύο διευθύνσεις X και Y,
- μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα για τα πηνία=1 Ampere. Επομένως το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα ελέγχου και για την X και για την Y-διεύθυνση είναι $1-0.2=0.8$ Ampere και το ελάχιστο $0.2-1=-0.8$,
- το μαγνητικό διάκενο είναι $g=0.5$ mm,
- η ακτινική χάρη είναι $c=100$ μm,
- ο αριθμός περιελίξεων σε κάθε έναν από τους οκτώ πόλους είναι 500,
- το πλάτος του κάθε πόλου από τους οκτώ=8 mm,
- επομένως, το εμβαδόν της επιφάνειας της τομής του κάθε πόλου είναι πλάτος πόλου x μήκος εδράνου=8x25=200 mm²,
- το βάρος του ρότορα είναι 1.40 kg,
- το μήκος του ρότορα είναι $L=285.5$ mm (εικόνα 52),
- το κέντρο βάρους βρίσκεται σε απόσταση $L_a=180.53$ mm από το αριστερό άκρο του ρότορα (εικόνα 52),
- η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι 16 rps,
- η μάζα της αζυγοσταθμίας είναι 0.9 kg και βρίσκεται σε απόσταση 50 μm από τον K-άξονα του ρότορα και σε απόσταση $L_{αζυγ}=146.5$ mm από το αριστερό άκρο του ρότορα.

Ροπές αδράνειας του ρότορα

Για τον υπολογισμό των ροπών αδράνειας του ρότορα, ακολουθούμε ακριβώς την ίδια διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, καθώς ο ρότορας έχει την ίδια γεωμετρία και αποτελείται από τα ίδια υλικά με αυτόν που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.

Επομένως, η ροπή αδράνειας γύρω από τον K-άξονα, είναι:

$$I_K = 1.806248125 \cdot 10^{-4} \text{ Kg} \times \text{m}^2 \quad (188)$$

και οι ροπές αδράνειας γύρω από τους I και J-άξονες είναι:

$$I_I = 0.05278371484969667 \text{ Kg} \times \text{m}^2 \quad (189)$$

Αποσυζευγμένος έλεγχος

Το είδος ελέγχου που θα χρησιμοποιήσουμε για το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο, είναι αποσυζευγμένος έλεγχος, που σημαίνει ότι ο ρότορας ελέγχεται από δύο ανεξάρτητους PID ελεγκτές, έναν για τον X-άξονα και έναν για τον Y-άξονα.

Στην εικόνα 88 φαίνεται το διάγραμμα ελέγχου που χρησιμοποιούμε για τον έλεγχο του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, το οποίο σχεδιάσαμε στο Simulink module του Matlab.

Εικόνα 88. Σύστημα ελέγχου του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, στο Simulink module του Matlab

Στο παραπάνω διάγραμμα του ελέγχου του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, δίνουμε ένα βήμα (Step) για τη θέση του ρότορα για την X και Y-διεύθυνση, σε μέτρα. Στη συνέχεια, αυτά τα βήματα προστίθενται με τα σήματα που έρχονται από τους αισθητήρες τα οποία αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα θέση του ρότορα, σε μέτρα, για κάθε διεύθυνση ξεχωριστά. Αυτά τα σήματα εισάγονται στον PID ελεγκτή για την X και την Y-διεύθυνση ξεχωριστά. Στην εικόνα 54, φαίνεται ο τρόπος μοντελοποίησης του PID ελεγκτή, στο Simulink module του Matlab.

Αμέσως μετά τους δύο PID ελεγκτές, τα σήματα αντιπροσωπεύουν τα ρεύματα ελέγχου τα οποία πρέπει να εφαρμοστούν στα πηνία, για τις X και Y- διευθύνσεις.

Στη συνέχεια, έχουμε δύο κέρδη, ένα για κάθε διεύθυνση, τα οποία ονομάζονται «Sample time», με σκοπό να προσομοιώσουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας με την οποία οι PID ελεγκτές λειτουργούν. Η δειγματοληψία είναι 1/10000 δευτερόλεπτα, διότι επιλέγουμε η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι 10 KHz.

Αμέσως μετά, τα σήματα εισάγονται στο «Saturation dynamic». Εισάγουμε αυτά τα blocks με σκοπό να προσομοιώσουμε τα ανώτερα και κατώτερα όρια, εντός των οποίων επιτρέπουμε να κείται το ρεύμα ελέγχου, λόγω κορεσμού και υπερθέρμανσης των πηνίων. Το ανώτερο όριο των ρευμάτων ελέγχου για την X και την Y-διεύθυνση στο «Saturation dynamic», είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος με το οποίο επιτρέπεται να τροφοδοτήσουμε τα πηνία μείον το σταθερό ρεύμα, διότι στο «Saturation dynamic» εισάγουμε τις τιμές για τα ρεύματα ελέγχου και όχι για τις

τελικές τιμές των ρευμάτων, δηλαδή ρεύματα ελέγχου και σταθερά ρεύματα. Το κατώτερο όριο των ρευμάτων ελέγχου στο «Saturation dynamic» είναι το σταθερό ρεύμα μείον τη μέγιστη τιμή του ρεύματος με το οποίο επιτρέπεται να τροφοδοτήσουμε τα πηνία. Επομένως, παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή του ρεύματος ελέγχου ισούται με την αρνητική τιμή του ανώτερου ορίου του ελέγχου.

Μετά το «Saturation dynamic», τα σήματα αντιπροσωπεύουν τις τελικές τιμές των ρευμάτων ελέγχου που πρέπει να εφαρμοστούν στο έδρανο για την X και Y-διεύθυνση. Αυτά τα δύο σήματα, ένα για κάθε διεύθυνση του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου, εισάγονται στο «magnetic_bearing_model», στο οποίο block υπάρχουν οι μη-γραμμικές μαγνητικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα στις οποίες προστίθενται και οι δυνάμεις λόγω του υδροδυναμικού πεδίου, οι οποίες προκύπτουν μέσω της επίλυσης του υδροδυναμικού πεδίου στο Ansys, και έτσι τελικά προκύπτουν οι εξισώσεις (187).

Στο S-Function «magnetic_bearing_model» χρησιμοποιούμε:

- ως αρχικές τιμές για την επίλυση, τις θέσεις και τις ταχύτητες για τις X και Y-διευθύνσεις,
- ως μεταβλητές που ανανεώνονται: το χρόνο t , τις μεταβλητές X_1 , X_2 , X_3 και X_4 που αντιπροσωπεύουν τις εξόδους και τις μεταβλητές u_1 , u_2 , u_3 και u_4 που αντιπροσωπεύουν τις εισόδους,
- ως μεταβλητές για την έξοδο: το χρόνο t , τις μεταβλητές X_1 , X_2 , X_3 και X_4 που αντιπροσωπεύουν τις εξόδους και τις μεταβλητές u_1 , u_2 , u_3 και u_4 που αντιπροσωπεύουν τις εισόδους,
- ο αριθμός των σταθερών είναι 4,
- ο αριθμός των εξόδων είναι 6,
- ο αριθμός των εισόδων είναι 4,
- και για τα ρεύματα τροφοδοσία των πηνίων, ισχύουν οι περιορισμοί που ορίζονται από τις εξισώσεις (41) και (42).

Ο επιλυτής που επιλέγουμε για το Simulink είναι ο ode23 (stiff/Mod. Roden), διότι είναι ο καταλληλότερος για το μοντέλο που επιλύουμε και δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Οι εξοδοί από το S-Function «magnetic_bearing_model» είναι οι θέσεις και οι ταχύτητες του ρότορα καθώς και οι δυνάμεις λόγω του υδροδυναμικού πεδίου, σε κάθε διεύθυνση.

Μετά την επίλυση, οι θέσεις του ρότορα για κάθε διεύθυνση επιστρέφουν στο σύστημα ελέγχου, διότι αντιπροσωπεύουν τα σήματα των αισθητήρων και έτσι ολοκληρώνεται το κλειστό κύκλωμα του ελέγχου.

Επίσης, έχουμε συμπεριλάβει και ένα module, το οποίο ονομάζεται “Ρεύμα ηλεκτρομαγνητών = 0?”, μέσω του οποίου ελέγχουμε το ρεύμα ελέγχου το οποίο εισάγεται στο “magnetic_bearing_model”. Στην περίπτωση που το υβριδικό έδρανο ολίσθησης θεωρούμε ότι λειτουργεί μόνο ως υδροδυναμικό, τότε το “Ρεύμα ηλεκτρομαγνητών = 0?” παίρνει την τιμή μηδέν, ενώ κατά τις χρονικές στιγμές που το υβριδικό έδρανο ολίσθησης λειτουργεί ως ηλεκτρομαγνητικό ή υβριδικό, τότε η μεταβλητή αυτή παίρνει την τιμή ένα, ώστε να υπάρχει ρεύμα ελέγχου στο “magnetic_bearing_model”.

Έχουμε επιλέξει να γίνεται παύση της προσομοίωσης κάθε 0.00002 δευτερόλεπτα. Με την πάροδο αυτού του χρονικού διαστήματος, αποθηκεύουμε ως αποτελέσματα τις νέες X και Y-θέσεις του ρότορα καθώς και τις νέες X και Y-ταχύτητές του. Κάθε 0.00002 δευτερόλεπτα, υπολογίζουμε τις δυνάμεις λόγω του υδροδυναμικού πεδίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, εισάγοντας τα δεδομένα που αναφέραμε (τελικές τιμές για τις θέσεις και τις ταχύτητες του ρότορα) ως αρχικές συνθήκες για την επίλυση του υδροδυναμικού πεδίου στο Ansys. Επίσης, έχουμε προγραμματίσει το Matlab να σβήνει όλα τα αρχεία του Ansys πριν από κάθε επίλυση, ώστε η κάθε επίλυση του υδροδυναμικού πεδίου να είναι ανεπηρέαστη από τα αποτελέσματα της προηγούμενης επίλυσης.

Πραγματοποιήσαμε τέσσερεις δοκιμές σχετικά με την εύρεση του χρονικού διαστήματος μετά την πάροδο του οποίου θα γίνεται παύση της προσομοίωσης. Η πρώτη δοκιμή ήταν κάθε 0.00001 δευτερόλεπτα, η δεύτερη κάθε 0.00002 δευτερόλεπτα, η τρίτη κάθε 0.00005 δευτερόλεπτα και η τέταρτη κάθε 0.0001 δευτερόλεπτα. Σωστά αποτελέσματα είχαμε μόνο κατά τις περιπτώσεις των 0.00001 και 0.00002 δευτερολέπτων. Επομένως, επιλέξαμε η παύση του Simulink module του Matlab να γίνεται κάθε 0.00002 δευτερόλεπτα.

Εικόνα 89. Διάγραμμα ροής σχετικά με τη σύνδεση μεταξύ Simulink και Ansys, την οποία διαχειρίζεται το Matlab, για το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο

Το διάγραμμα ροής σχετικά με τη σύνδεση μεταξύ του Simulink και του Ansys, την οποία διαχειρίζεται το Matlab, για την περίπτωση της υβριδικής λειτουργίας του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, φαίνεται στην εικόνα 89. Αυτή η ροή συνεχίζεται έως ότου ο χρόνος της προσομοίωσης φτάσει τον επιθυμητό συνολικό χρόνο.

Τέλος, στην περίπτωση που δημιουργούμε διαγράμματα κατά τη διάρκεια των λύσεων, μία επιλογή που είναι απαραίτητη στο πρόγραμμα Matlab, είναι να ενεργοποιήσουμε και να θέσουμε στην μέγιστη τιμή την ποσότητα της μνήμης που θα χρησιμοποιεί η Java. Αυτό γίνεται συγκεκριμένα επιλέγοντας: File -> Preferences -> General -> Java Heap Memory.

Επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή για το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο

Ο ρότορας ασκεί δυνάμεις στο ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο λόγω των αζυγοσταθμιών του και λόγω του γυροσκοπικού φαινομένου. Έτσι, κατά την περιστροφή του, δεν παραμένει σε ένα σταθερό σημείο ισορροπίας αλλά το κέντρο του ακολουθεί ελλειπτική ή κυκλική τροχιά. Γι' αυτό επιθυμούμε ο ελεγκτής να πετυχαίνει μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης ή στις περιπτώσεις που

εμφανίζεται, να το μειώνει. Επίσης, επιθυμούμε το σύστημα να έχει όσο το δυνατόν πιο γρήγορη απόκριση, διότι σε τυχόν ξαφνικά εξωτερικά φορτία, ο ρότορας θα πρέπει να επανέρχεται στην επιθυμητή θέση άμεσα.

Προκειμένου να γίνει η επιλογή του καταλληλότερου ελεγκτή, έγιναν έλεγχοι για την απόκριση του συστήματος με αναλογικό ελεγκτή (P), με ολοκληρωτικό ελεγκτή (I), με αναλογικό και ολοκληρωτικό (PI), με αναλογικό και διαφορικό (PD) και με αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό ελεγκτή (PID). Αυτοί οι έλεγχοι έγιναν με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους, ακριβώς όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, διότι ακόμα και όταν το έδρανο λειτουργεί ως υβριδικό, θα πρέπει το ηλεκτρομαγνητικό του τμήμα να έχει την καλύτερη δυνατή απόκριση, στο μικρότερο δυνατό χρόνο και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, ώστε ακόμα και στην υβριδική λειτουργία να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Επομένως, τελικά επιλέγουμε PID ως καταλληλότερο ελεγκτή για τον έλεγχο του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, χρησιμοποιώντας τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης κατά την προσομοίωση.

Ελεγκτής PID

Ο ελεγκτής PID έχει την εξίσωση (151) που συνδέει την είσοδο $e(t)$ με την έξοδο $u(t)$.

Ένα διάγραμμα ελέγχου PID ενός ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου φαίνεται στην εικόνα 58.

Με τον όρο Plant της εικόνας 58, εννοούμε το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο, το οποίο έχει τη συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης (190).

$$G = \frac{y(s)}{I_{cY}(s)} = \frac{K_{YI}^{EME}}{ms^2 + K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO}} \quad (190)$$

Ένας απλός PID ελεγκτής μπορεί να εκφραστεί με τη συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης (153).

Επομένως, η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται:

$$\begin{aligned} \frac{y(s)}{y^*(s)} &= \frac{G_i \cdot G}{1 + K_{sn} \cdot G_i \cdot G} = \frac{\frac{K_D K_{YI}^{EME} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} s + K_I K_{YI}^{EME}}{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO})}}{1 + \frac{K_D K_{YI}^{EME} K_{sn} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} K_{sn} s + K_I K_{YI}^{EME} K_{sn}}{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO})}} = \\ &= \frac{\frac{K_D K_{YI}^{EME} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} s + K_I K_{YI}^{EME}}{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO}) + K_D K_{YI}^{EME} K_{sn} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} K_{sn} s + K_I K_{YI}^{EME} K_{sn}}}{\frac{K_D K_{YI}^{EME} s^2 + K_P K_{YI}^{EME} s + K_I K_{YI}^{EME}}{ms^3 + K_D K_{YI}^{EME} K_{sn} s^2 + (K_P K_{YI}^{EME} K_{sn} + K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO})s + K_I K_{YI}^{EME} K_{sn}}} \quad (191) \end{aligned}$$

και η χαρακτηριστική εξίσωση είναι:

$$ms^3 + K_D K_{YI}^{EME} K_{sn} s^2 + (K_P K_{YI}^{EME} K_{sn} + K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO})s + K_I K_{YI}^{EME} K_{sn} \quad (192)$$

όπου το K_{sn} είναι το κέρδος του αισθητήρα.

Στην περίπτωση που υπάρχει και εξωτερικό φορτίο, όπως είναι για παράδειγμα η αζυγοσταθμία του ρότορα ($F_{a\zeta\upsilon\gamma}$), η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, γίνεται:

$$m\ddot{y} = K_{YI}^{EME} I_{cY} + (-K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO}) y + F_{a\zeta\upsilon\gamma} \quad (193)$$

Η εξίσωση (193) μπορεί να μετασχηματιστεί στο πεδίο Laplace, θέτοντας $I_{cY}=0$ και θεωρώντας ότι η είσοδος είναι η $F_{a\zeta\upsilon\gamma}$. Έτσι, έχουμε:

$$m\ddot{y} = K_{YI}^{EME} I_{cY} + (-K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO}) y + F_{a\zeta\upsilon\gamma}$$

$$ms^2 y(s) = (-K_{Yy}^{EME} + K_{Yy}^{Y\Delta PO}) y(s) + F_{a\zeta\upsilon\gamma}(s) \Rightarrow \quad (194)$$

$$(ms^2 + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO}) y(s) = F_{a\zeta\upsilon\gamma}(s) \Rightarrow$$

$$\frac{y(s)}{F_{a\zeta\upsilon\gamma}(s)} = \frac{1}{ms^2 + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO}} \quad (195)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς της εικόνας 59, είναι:

$$\frac{y(s)}{F_{a\zeta\upsilon\gamma}(s)} = \frac{G_2}{1 - G_2 \cdot K_{sn} \cdot (-1) \cdot G_i} =$$

$$\frac{1}{ms^2 + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO}} =$$

$$1 - \frac{1}{ms^2 + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO}} \cdot K_{sn} \cdot (-1) \cdot \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} =$$

$$\frac{1}{ms^2 + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO}} =$$

$$\frac{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO}) + K_{sn} K_D s^2 + K_{sn} K_P s + K_{sn} K_I}{s(ms^2 + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO})}$$

$$\frac{s}{ms^3 + K_{sn} K_D s^2 + (K_{sn} K_P + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO}) s + K_{sn} K_I}$$

όπου το plant (G_2) έχει τη συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης (196) και η χαρακτηριστική εξίσωση είναι:

$$ms^3 + K_{sn} K_D s^2 + (K_{sn} K_P + K_{Yy}^{EME} - K_{Yy}^{Y\Delta PO}) s + K_{sn} K_I = 0 \quad (197)$$

Ο ελεγκτής PID μπορεί να συντονιστεί, μέσω των εξισώσεων (151), (153) και (190) έως (197), χρησιμοποιώντας τους παρακάτω κανόνες:

- Αυξάνοντας το αναλογικό κέρδος (K_P), είναι δυνατόν να επιτευχθεί πιο γρήγορη απόκριση.
- Αυξάνοντας το ολοκληρωτικό κέρδος (K_I), είναι δυνατόν να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια της επιθυμητής θέσης.
- Αυξάνοντας το διαφορικό κέρδος (K_D), είναι δυνατόν να επιτευχθεί μικρότερο εύρος ταλάντωσης.

Οι βέλτιστες τιμές για τα κέρδη του PID ελεγκτή προκύπτουν μετά από δοκιμές ακόμα και στα πραγματικά συστήματα, διότι δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν

όλα τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος και με την απαραίτητη ακρίβεια. Μερικά συστήματα συμπεριφέρονται καλύτερα με P ελεγκτή, άλλα με PI ελεγκτή, άλλα με PD ελεγκτή και άλλα με PID ελεγκτή. Στην εργασία αυτή, θα χρησιμοποιήσουμε PID ελεγκτή, διότι στο συγκεκριμένο είδος συστήματος που έχουμε, δηλαδή το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο, ο PID ελεγκτής είναι ο πιο κατάλληλος, συγκριτικά με τους προαναφερθέντες.

Τα κέρδη PID τα οποία προκύπτουν από το SISO tool module του Matlab για τα παραπάνω δεδομένα, είναι: $K_P = 9266.148$, $K_I = 256680$, $K_D = 9.88218$. Τα ίδια κέρδη PID χρησιμοποιούμε και για τις δύο διευθύνσεις X και Y.

Τρεις περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε 3 παραδείγματα διαφορετικής λειτουργίας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Περίπτωση λειτουργίας 1. Σταθερό εξωτερικό φορτίο

Στην περίπτωση του σταθερού εξωτερικού φορτίου, στην αρχή ενεργοποιείται το μαγνητικό πεδίο, παραλαμβάνοντας το σύνολο του βάρους του ρότορα, μετακινώντας τον στο κέντρο του εδράνου. Στη συνέχεια, απενεργοποιείται το μαγνητικό τμήμα και ενεργοποιείται το υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, παραλαμβάνοντας το βάρος του ρότορα. Έπειτα, εισάγεται και εξωτερικό φορτίο που ενεργεί στον ρότορα. Το σύνολο του φορτίου το παραλαμβάνει το υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται και πάλι το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα, παραλαμβάνοντας σταδιακά το σύνολο του φορτίου και οδηγώντας τον ρότορα στο κέντρο του εδράνου, περνώντας από τα σημεία ισορροπίας του υδροδυναμικού πεδίου.

Επομένως, για τα πρώτα 0.3 δευτερόλεπτα, ενεργοποιείται το μαγνητικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, μετακινώντας τον ρότορα από την αρχική θέση, η οποία είναι στο $X=0 \mu\text{m}$ και $Y=-100 \mu\text{m}$ (σημείο 1 της εικόνας 90), στο κέντρο του εδράνου, το οποίο είναι στο $X=0 \mu\text{m}$ και $Y=0 \mu\text{m}$ (σημείο 2 της εικόνας 90).

Εικόνα 90. Τροχιά του ρότορα, σε 3-διαστάσεις, εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου

Εικόνα 91. Μεγεθυμένη τροχιά του ρότορα, σε 3-διαστάσεις, εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου

Στην αρχή αυτής της χρονικής περιόδου, το ρεύμα ελέγχου στην Υ-διεύθυνση παρατηρούμε ότι κάνει ένα pick μέχρι την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, η οποία είναι 0.8 Ampere (εικόνα 96), με σκοπό να ανασηκώσει τον ρότορα σε όσο το δυνατόν πιο σύντομο χρονικό διάστημα γίνεται. Αμέσως μετά, το ρεύμα ελέγχου στην Υ-

διεύθυνση μειώνεται, διότι ο ρότορας έχει αποκτήσει υψηλή ταχύτητα κατά την Y-διεύθυνση (εικόνα 101) και πρέπει να μειωθεί, ώστε ο ρότορας να μπορέσει να σταθεροποιηθεί στο κέντρο του εδράνου, που είναι ο σκοπός για τα πρώτα 0.3 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι μέχρι τα 0.3 δευτερόλεπτα, το ρεύμα ελέγχου στην Y-διεύθυνση έχει σχεδόν σταθερή τιμή και ο ρότορας αιωρείται και παραμένει στο κέντρο του εδράνου. Το ρεύμα ελέγχου στην X-διεύθυνση είναι σχεδόν ίσο με μηδέν (εικόνα 97, από 0 έως 0.3 δευτερόλεπτα) και η ημιτονοειδής μορφή του είναι λόγω της αζυγοσταθμίας και του γυροσκοπικού φαινομένου του ρότορα. Αυτή τη χρονική περίοδο, το υβριδικό έδρανο λειτουργεί χωρίς λιπαντικό, και οι Y και X-υδροδυναμικές δυνάμεις είναι μηδέν (εικόνες 98 και 99, από 0 έως 0.3 δευτερόλεπτα). Η σχετική εκκεντρότητα του ρότορα στα 0 δευτερόλεπτα είναι 1 (εικόνα 94), διότι ο ρότορας ακουμπά το κατώτερο σημείο του εδράνου (αρχική θέση) και στα 0.3 δευτερόλεπτα, η σχετική εκκεντρότητα είναι 0, διότι ο ρότορας αιωρείται στο κέντρο του εδράνου.

Στη συνέχεια, στα 0.3 δευτερόλεπτα, το υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης ενεργοποιείται, με την εισαγωγή του λιπαντικού εντός του εδράνου και ταυτόχρονα, το ηλεκτρομαγνητικό τμήμα απενεργοποιείται, με τον μηδενισμό των ρευμάτων που διαρρέουν τα πηνία, όπως φαίνεται στις εικόνες 96 και 97, από 0.3 έως 0.6 δευτερόλεπτα, όπου τα ρεύματα ελέγχου και στις δύο διευθύνσεις μηδενίζονται (καθώς και τα σταθερά ρεύματα) και το έδρανο λειτουργεί ως υδροδυναμικό.

Σε αυτό το χρονικό διάστημα δεν εφαρμόζεται εξωτερική δύναμη στον ρότορα, επομένως ο ρότορας σταθεροποιείται στο σημείο ισορροπίας στο οποίο θα ισορροπεί όταν το υδροδυναμικό τμήμα παραλαμβάνει το βάρος του (σημείο 3 της εικόνας 90, από 0.3 έως 0.6 δευτερόλεπτα).

Το φορτίο που παραλαμβάνει το έδρανο λόγω του βάρους του ρότορα είναι (από την εξίσωση (123)):

$$F_{bgY} = \frac{mg_a L_a}{L} = \frac{1.36117 \cdot 9.81 \cdot 180.53 \cdot 10^{-3}}{285.5 \cdot 10^{-3}} = 8.44 \text{ N} \quad (198)$$

Επομένως, ο αριθμός Sommerfeld είναι:

$$S = \frac{\mu N_s}{P} \left(\frac{R_j}{c} \right)^2 = \frac{\mu N_s}{\frac{F_{bY}}{LD}} \left(\frac{R_j}{c} \right)^2 = \frac{0.012 \cdot 16}{8.44} \left(\frac{20 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} \right)^2 = 0.91 \quad (199)$$

Από τον Γκέρτζο και τους υπόλοιπους συγγραφείς [80], για $L/D=0.625$ και αριθμό Sommerfeld 0.91, η σχετική εκκεντρότητα του ρότορα πρέπει να είναι 0.27 και η γωνία συμπεριφοράς του ρότορα 74° , τα οποία συμπίπτουν με τα δικά μας αποτελέσματα, όπως φαίνεται στις εικόνες 94 και 95 από 0.3 έως 0.6 δευτερόλεπτα.

Η ημιτονοειδής μορφή των διαγραμμάτων είναι λόγω των αζυγοσταθμιών και του γυροσκοπικού φαινομένου του ρότορα, τα οποία συνυπολογίζονται στην προσομοίωση.

Οι δυνάμεις λόγω του υδροδυναμικού πεδίου φαίνονται στις εικόνες 98 και 99 για τις Y και X-διευθύνσεις αντίστοιχα. Η δύναμη λόγω του υδροδυναμικού πεδίου

στην Y-διεύθυνση για αυτήν την χρονική περίοδο (0.3 έως 0.6 δευτερόλεπτα), είναι 8.44 N, και ισούται με το βάρος του ρότορα που το έδρανο παραλαμβάνει.

Στα 0.3 δευτερόλεπτα, η ταχύτητα του ρότορα στην Y-διεύθυνση έχει αρνητική τιμή (εικόνα 101), διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα κάτω, δηλαδή προς την αρνητική φορά Y, λόγω του βάρους του ρότορα και η ταχύτητα στην X-διεύθυνση έχει θετικές τιμές (εικόνα 102), διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα δεξιά.

Στη συνέχεια, στα 0.6 δευτερόλεπτα, εφαρμόζουμε εξωτερική δύναμη στον ρότορα και το σημείο ισορροπίας γίνεται το σημείο 4 της εικόνας 90. Η εξωτερική δύναμη στην Y-διεύθυνση είναι $F_{eY} = 100 \text{ N}$, προς την αρνητική φορά Y και εφαρμόζεται σε μήκος $L_{FeY} = 125 \text{ mm}$ από το αριστερό άκρο του ρότορα (εικόνα 52). Η δύναμη που εφαρμόζεται στο έδρανο, λόγω της εξωτερικής δύναμης είναι (από την εξίσωση (126)):

$$F_{beY} = \frac{F_{eY} \cdot L_{FeY}}{L} = \frac{100 \cdot 125 \cdot 10^{-3}}{285.5 \cdot 10^{-3}} = 43.783 \text{ N} \quad (200)$$

Στην εικόνα 100 παρατηρούμε ότι από 0 έως 0.6 δευτερόλεπτα, η εξωτερική δύναμη είναι 0 και από 0.6 έως 1.8 δευτερόλεπτα, η εξωτερική δύναμη είναι σταθερή και ίση με 43.783 N.

Επομένως, το συνολικό φορτίο που παραλαμβάνει το έδρανο είναι:

$$F_{bY} = F_{bgY} + F_{beY} = 8.44 + 43.783 = 52.22 \text{ N} \quad (201)$$

Ο αριθμός Sommerfeld που αντιστοιχεί στο υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, από 0.6 έως 1.8 δευτερόλεπτα, είναι $S=0.147$.

Από τον Γκέρτζο και τους υπόλοιπους συγγραφείς [80], για $L/D=0.625$ και αριθμό Sommerfeld 0.147, η σχετική εκκεντρότητα του ρότορα πρέπει να είναι 0.7 και η γωνία συμπεριφοράς του ρότορα 47° , τα οποία συμπίπτουν με τα δικά μας αποτελέσματα, όπως φαίνεται στις εικόνες 94 και 95 από 0.6 έως 0.9 δευτερόλεπτα.

Η ημιτονοειδής μορφή των διαγραμμάτων είναι λόγω των αζυγοσταθμιών και του γυροσκοπικού φαινομένου του ρότορα, τα οποία συνυπολογίζονται στην προσομοίωση.

Οι δυνάμεις λόγω του υδροδυναμικού πεδίου φαίνονται στις εικόνες 98 και 99 για τις Y και X-διευθύνσεις αντίστοιχα. Η δύναμη λόγω του υδροδυναμικού πεδίου στην Y-διεύθυνση για αυτήν την χρονική περίοδο (0.6 έως 0.9 δευτερόλεπτα), είναι 52.22 N, και ισούται με το άθροισμα του βάρους του ρότορα που αντιστοιχεί στο σημείο του εδράνου και της εξωτερικής δύναμης που το έδρανο παραλαμβάνει.

Στα 0.6 δευτερόλεπτα, η ταχύτητα του ρότορα στην Y-διεύθυνση έχει αρνητική τιμή (εικόνα 101), μεγαλύτερης απόλυτης τιμής σε σχέση με αυτήν των 0.3 δευτερολέπτων, διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα κάτω, δηλαδή προς την αρνητική φορά Y, λόγω του εξωτερικού φορτίου, του οποίου η τιμή είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το βάρος του ρότορα που παραλαμβάνει το έδρανο και η ταχύτητα στην X-διεύθυνση έχει θετικές τιμές (εικόνα 102), διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα δεξιά.

Στη συνέχεια, στα 0.9 δευτερόλεπτα, το μαγνητικό πεδίο ενεργοποιείται και

πάλι, με σκοπό να παραλάβει σταδιακά όλο το φορτίο που δέχεται τώρα το έδρανο. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, έχουμε υβριδική λειτουργία του εδράνου. Αρχικά, ορίζουμε στον ελεγκτή επιθυμητό σημείο ισορροπίας το σημείο αυτό που βρισκόταν ο ρότορας, ακριβώς πριν ενεργοποιηθεί το ηλεκτρομαγνητικό τμήμα, ώστε να λειτουργεί το υδροδυναμικό πεδίο ανεπηρέαστο, και να ενεργοποιηθούν και οι ηλεκτρομαγνήτες του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Αυτό φαίνεται καθαρά στα διαγράμματα των εικόνων 92 και 93, από 0.9 έως 1.2 δευτερόλεπτα, όπου οι Y και X-θέσεις του ρότορα παραμένουν σταθερές. Στις εικόνες 92 και 93, μπορούμε να δούμε ότι από τα 0.9 δευτερόλεπτα και μετά, η ημιτονοειδής μορφή των διαγραμμάτων έχει μικρότερο πλάτος, διότι η θέση του ρότορα ελέγχεται και από το ηλεκτρομαγνητικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Στο διάγραμμα της εικόνας 96, από τα 0.9 έως τα 1.2 δευτερόλεπτα, παρατηρούμε ότι υπάρχει Y-ρεύμα ελέγχου, το οποίο ελέγχει τον ρότορα. Ακόμα, το X-ρεύμα ελέγχου έχει αρνητική τιμή (εικόνα 97, από 0.9 έως 1.2 δευτερόλεπτα), διότι ο ρότορας έχει εκκεντρότητα και γωνία συμπεριφοράς διαφορετικές από το μηδέν και ο ρότορας βρίσκεται στην δεξιά πλευρά, σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του εδράνου.

Στα 1.2 δευτερόλεπτα, η θέση του ρότορα είναι στο σημείο 5 της εικόνας 90. Οι Y και X-υδροδυναμικές δυνάμεις δεν έχουν μεταβληθεί (εικόνες 98 και 99, από 0.9 έως 1.2 δευτερόλεπτα), διότι το μαγνητικό τμήμα δεν παραλαμβάνει καθόλου φορτίο, εκτός από τις διαταραχές λόγω της αζυγοσταθμίας και του γυροσκοπικού φαινομένου του ρότορα. Επομένως, το υδροδυναμικό πεδίο εξακολουθεί να παραλαμβάνει το ίδιο φορτίο. Στα 0.9 δευτερόλεπτα, οι Y και X-ταχύτητες του ρότορα παραμένουν σχεδόν μηδενικές (εικόνες 101 και 102), διότι ο ρότορας παραμένει στο ίδιο σημείο ισορροπίας και δεν μετακινείται.

Στη συνέχεια, στα 1.2 δευτερόλεπτα, ορίζουμε στον ελεγκτή νέο επιθυμητό σημείο ισορροπίας (σημείο 6 της εικόνας 90) το σημείο ισορροπίας που είχε ο ρότορας αρχικά, όταν δεν εφαρμόζαμε εξωτερική δύναμη στον ρότορα και ισορροπούσε με ενεργό μόνο το υδροδυναμικό πεδίο. Ορίζουμε αυτό το σημείο ως επιθυμητό σημείο ισορροπίας, διότι σκοπός μας είναι το ηλεκτρομαγνητικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης να παραλάβει τελικά όλο το φορτίο που εφαρμόζεται στο έδρανο από τον ρότορα, και θέλουμε αυτό να πραγματοποιηθεί περνώντας από τα σημεία ισορροπίας του υδροδυναμικού τμήματος, ώστε να μην έχουμε επιπλέον δυνάμεις στην X-διεύθυνση, τις οποίες θα πρέπει να παραλάβει το ηλεκτρομαγνητικό τμήμα. Η σχετική εκκεντρότητα του ρότορα ήταν 0.27 και η γωνία συμπεριφοράς 74° και έτσι, από 1.2 έως 1.5 δευτερόλεπτα, έχουμε και πάλι αυτές τις τιμές (εικόνες 94 και 95). Η ημιτονοειδής μορφή της κίνησης του ρότορα έχει μικρότερο πλάτος σε σχέση με αυτήν που είχε από 0.3 έως 0.6 δευτερόλεπτα, διότι τώρα το έδρανο λειτουργεί ως υβριδικό, και η θέση του ρότορα ελέγχεται μέσω του ελεγκτή.

Η εξωτερική δύναμη παραμένει σταθερή, όπως μπορούμε να δούμε στο διάγραμμα της εικόνας 100, από 1.2 έως 1.5 δευτερόλεπτα. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση, ο ρότορας βρίσκεται σε ένα σημείο ισορροπίας το οποίο αντιστοιχεί σε αριθμό Sommerfeld 0.91 (μικρότερο φορτίο), αλλά το συνολικό φορτίο το οποίο το

υβριδικό έδρανο ολίσθησης παραλαμβάνει αντιστοιχεί σε αριθμό Sommerfeld 0.147 (μεγαλύτερο φορτίο). Επιπλέον, από 1.2 έως 1.5 δευτερόλεπτα, ο ρότορας κινείται και φτάνει στο αρχικό σημείο ισορροπίας του, όπου το υδροδυναμικό πεδίο μπορεί να παραλαμβάνει φορτία που αντιστοιχούν σε αριθμό Sommerfeld $S=0.91$. Η υδροδυναμική δύναμη στην X-διεύθυνση γίνεται σχεδόν μηδέν στο τέλος κάθε περιόδου 0.3 δευτερολέπτων, διότι τα επιθυμητά σημεία ισορροπίας, είναι σημεία ισορροπίας του υδροδυναμικού τμήματος.

Το ρεύμα ελέγχου στην Y-διεύθυνση μεγαλώνει, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 96, από 1.2 έως 1.5 δευτερόλεπτα, διότι το επιπλέον φορτίο παραλαμβάνεται από το ηλεκτρομαγνητικό τμήμα και πρέπει να αυξηθεί το ρεύμα ελέγχου προκειμένου να παραλάβει αυτό το φορτίο το έδρανο, και η απόλυτη τιμή του ρεύματος ελέγχου στην X-διεύθυνση μειώνεται.

Σε αυτήν την χρονική περίοδο, και το υδροδυναμικό και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι ενεργά, επομένως, το έδρανο λειτουργεί ως υβριδικό.

Στα 1.2 δευτερόλεπτα, η ταχύτητα του ρότορα στην Y-διεύθυνση έχει θετικές τιμές (εικόνα 101), διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα πάνω, λόγω του νέου σημείου ισορροπίας και η ταχύτητα του ρότορα στην X-διεύθυνση έχει αρνητικές τιμές (εικόνα 102), διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα αριστερά.

Τέλος, στα 1.5 δευτερόλεπτα, το επιθυμητό σημείο ισορροπίας μεταβάλλεται και γίνεται το κέντρο του εδράνου ($Y=0 \mu m$ και $X=0 \mu m$, σημείο 7 της εικόνας 90), με σκοπό το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης να παραλάβει το σύνολο του φορτίου, μηδενίζοντας το φορτίο που παραλαμβάνει το υδροδυναμικό τμήμα. Το εξωτερικό φορτίο παραμένει σταθερό, επομένως, το ρεύμα ελέγχου στην Y-διεύθυνση αυξάνεται (εικόνα 96, από 1.5 έως 1.8 δευτερόλεπτα), και το φορτίο παραλαμβάνεται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το ρεύμα ελέγχου στην X-διεύθυνση μηδενίζεται (εικόνα 97, από 1.5 έως 1.8 δευτερόλεπτα), διότι ο ρότορας μετακινείται στο κέντρο του εδράνου και το υδροδυναμικό πεδίο δεν ασκεί καμία δύναμη στον ρότορα, την οποία θα έπρεπε να παραλάβει το ηλεκτρομαγνητικό τμήμα στην περίπτωση που υπήρχε (εικόνες 98 και 99, από 1.5 έως 1.8 δευτερόλεπτα). Στα 1.5 δευτερόλεπτα, η ταχύτητα του ρότορα στην Y-διεύθυνση έχει θετικές τιμές (εικόνα 101), διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα πάνω, λόγω του νέου επιθυμητού σημείου ισορροπίας και η ταχύτητα του ρότορα στην X-διεύθυνση έχει αρνητικές τιμές, διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα αριστερά.

Ως συμπέρασμα, βλέπουμε ότι το υβριδικό έδρανο ολίσθησης μπορεί να λειτουργήσει ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό με σκοπό να αιωρηθεί ο ρότορας, στη συνέχεια να λειτουργήσει ως υδροδυναμικό και έπειτα το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα μπορεί να ενεργοποιηθεί και πάλι, με σκοπό να παραληφθεί το σύνολο του φορτίου σταδιακά, από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και να μετακινηθεί ο ρότορας στο κέντρο του εδράνου.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένη αζυγοσταθμία του ρότορα και έχει προσομοιωθεί και το γυροσκοπικό φαινόμενο του ρότορα. Ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα 16 rps. Επομένως, σε 0.3 δευτερόλεπτα, θα έχει κάνει $16 \cdot 0.3 = 4.8$ περιστροφές, όπως φαίνεται και στην εικόνα 91.

Εικόνα 92. Θέση y του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 93. Θέση x του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 94. Σχετική εκκεντρότητα του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 95. Γωνία συμπεριφοράς του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 96. Y-Ρεύμα ελέγχου του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου, για $K_P = 9266.148$, $K_I = 256680$, $K_D = 9.88218$

Εικόνα 97. X-Ρεύμα ελέγχου του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου, για $K_P = 9266.148$, $K_I = 256680$, $K_D = 9.88218$

Εικόνα 98. Y -Υδροδυναμική δύναμη που δέχεται ο ρότορας εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 99. X -Υδροδυναμική δύναμη που δέχεται ο ρότορας εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 100. Y -Εξωτερική δύναμη που δέχεται ο ρότορας εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 101. Y -Ταχύτητα του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 102. X-Ταχύτητα του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Περίπτωση λειτουργίας 2. Σταθερό σημείο ισορροπίας και αύξηση ικανότητας παραλαβής φορτίου

Στην περίπτωση του σταθερού σημείου ισορροπίας και της αύξησης της ικανότητας παραλαβής φορτίου, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του εδράνου ενεργοποιείται, με σκοπό να αιωρηθεί ο ρότορας από την αρχική του θέση (σημείο 1 της εικόνας 103), στο κέντρο του εδράνου (σημείο 2 της εικόνας 103). Στη συνέχεια, το υδροδυναμικό πεδίο ενεργοποιείται και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο απενεργοποιείται. Όταν το υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης παραλαμβάνει φορτίο W , έχοντας έναν συγκεκριμένο αριθμό Sommerfeld S , υπάρχει ένα συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας (ε, φ) (σημείο 3 της εικόνας 103).

Στη συνέχεια, το εξωτερικό φορτίο αυξάνεται και ταυτόχρονα, το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης ενεργοποιείται, αυξάνοντας τα ρεύματα ελέγχου των ηλεκτρομαγνητών, διατηρώντας το σημείο ισορροπίας του ρότορα σταθερό (σημείο 4 της εικόνας 103). Αυτή τη στιγμή, το έδρανο λειτουργεί ως υβριδικό.

Ο σκοπός αυτής της περίπτωσης λειτουργίας είναι η αύξηση του φορτίου που παραλαμβάνει το υβριδικό έδρανο ολίσθησης, διατηρώντας όμως το σημείο ισορροπίας του ρότορα σταθερό. Επίσης, κατά την υβριδική λειτουργία, οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των δύο πεδίων του υβριδικού εδράνου ολίσθησης (υδροδυναμικού και ενεργού ηλεκτρομαγνητικού) προστίθενται, με αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας και της ασφάλειας που προσφέρει το έδρανο στον ρότορα κατά την περιστροφή του.

Εικόνα 103. Τροχιά του ρότορα, σε 3-διαστάσεις, εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου

Εικόνα 104. Μεγεθυμένη τροχιά του ρότορα, σε 3-διαστάσεις, εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου

Περίπτωση λειτουργίας 3. Σταθερό σημείο ισορροπίας και αύξηση ευστάθειας

Η περίπτωση του σταθερού σημείου ισορροπίας και της αύξησης της ευστάθειας, μοιάζει αρκετά με την περίπτωση 2. Αρχικά, το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα του ρότορα ενεργοποιείται, με σκοπό να αιωρηθεί ο ρότορας από την αρχική του θέση (σημείο 1 της εικόνας 105), μέχρι το κέντρο του εδράνου (σημείο 2 της εικόνας 105).

Στη συνέχεια, το υδροδυναμικό πεδίο ενεργοποιείται και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο απενεργοποιείται. Όταν το υδροδυναμικό πεδίο του εδράνου παραλαμβάνει φορτίο W , έχοντας έναν συγκεκριμένο αριθμό Sommerfeld S , υπάρχει ένα συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας (ε, φ) (σημείο 3 της εικόνας 105). Στην περίπτωση 3, δεν έχουμε εξωτερικό φορτίο, αλλά το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενεργοποιείται, αυξάνοντας τα ρεύματα ελέγχου των ηλεκτρομαγνητών, διατηρώντας σταθερό το σημείο ισορροπίας του ρότορα (σημείο 4 της εικόνας 105). Αυτή τη στιγμή, το έδρανο λειτουργεί ως υβριδικό.

Ο σκοπός αυτής της περίπτωσης λειτουργίας είναι η αύξηση της ευστάθειας και της ασφάλειας που προσφέρει το έδρανο στον ρότορα κατά την περίπτωση της υβριδικής λειτουργίας, διότι οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των δύο πεδίων του εδράνου (υδροδυναμικού και ενεργού ηλεκτρομαγνητικού) προστίθενται, όταν το έδρανο λειτουργεί ως υβριδικό, με σκοπό να αποφεύγονται ανεπιθύμητες επιπτώσεις που προκαλεί η αστάθεια του ρότορα στα έδρανα και κατ' επέκταση στις κατασκευές που τα περιλαμβάνουν.

Εικόνα 105. Τροχιά του ρότορα, σε 3-διαστάσεις, εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου

Εικόνα 106. Μεγεθυμένη τροχιά του ρότορα, σε 3-διαστάσεις, εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου

Για τις περιπτώσεις 2 και 3, για τα πρώτα 0.3 δευτερόλεπτα, το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης είναι ενεργό, με σκοπό να αιωρηθεί ο ρότορας και να μετακινηθεί από την αρχική του θέση, η οποία είναι $X=0$ μm , $Y=-100$ μm , (σημείο 1 των εικόνων 103 και 105), στο κέντρο του εδράνου, το οποίο είναι $X=0$ μm , $Y=0$ μm (σημείο 2 των εικόνων 103 και 105).

Στην αρχή αυτής της περιόδου, το ρεύμα ελέγχου στην Y -διεύθυνση παρατηρούμε ότι κάνει ένα pick μέχρι την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, η οποία είναι 0.8 Ampere (εικόνα 111), με σκοπό να ανασηκώσει τον ρότορα σε όσο το δυνατόν πιο σύντομο χρονικό διάστημα γίνεται. Αμέσως μετά, το ρεύμα ελέγχου στην Y -διεύθυνση μειώνεται, διότι ο ρότορας έχει αποκτήσει υψηλή ταχύτητα κατά την Y -διεύθυνση (εικόνα 116) και πρέπει αυτή η ταχύτητα να μειωθεί, ώστε ο ρότορας να μπορέσει να σταθεροποιηθεί στο κέντρο του εδράνου, που είναι ο σκοπός για τα πρώτα 0.3 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι μέχρι τα 0.3 δευτερόλεπτα, το ρεύμα ελέγχου στην Y -διεύθυνση έχει σχεδόν σταθερή τιμή και ο ρότορας αιωρείται και παραμένει στο κέντρο του εδράνου. Το ρεύμα ελέγχου στην X -διεύθυνση είναι σχεδόν ίσο με μηδέν (εικόνα 112, από 0 έως 0.3 δευτερόλεπτα) και η ημιτονοειδής μορφή του είναι λόγω της αζυγοσταθμίας και του γυροσκοπικού φαινομένου του ρότορα. Αυτή τη χρονική περίοδο, το υβριδικό έδρανο ολίσθησης λειτουργεί χωρίς λιπαντικό, και οι Y και X -υδροδυναμικές δυνάμεις είναι μηδέν (εικόνες 113 και 114, από 0 έως 0.3 δευτερόλεπτα). Η σχετική εκκεντρότητα του ρότορα στα 0 δευτερόλεπτα είναι 1 (εικόνα 109), διότι ο ρότορας ακουμπά το κατώτερο σημείο του εδράνου (αρχική θέση) και στα 0.3 δευτερόλεπτα, η σχετική εκκεντρότητα είναι 0, διότι ο ρότορας αιωρείται στο κέντρο του εδράνου.

Στη συνέχεια, στα 0.3 δευτερόλεπτα, το υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης ενεργοποιείται, με την εισαγωγή του λιπαντικού εντός του εδράνου και ταυτόχρονα, το μαγνητικό τμήμα απενεργοποιείται, με τον μηδενισμό των ρευμάτων που διαρρέουν τα πηνία, όπως φαίνεται στις εικόνες 111 και 112, από 0.3 έως 0.6 δευτερόλεπτα, όπου τα ρεύματα ελέγχου και στις δύο διευθύνσεις μηδενίζονται (καθώς και τα σταθερά ρεύματα) και το έδρανο λειτουργεί ως υδροδυναμικό.

Σε αυτό το χρονικό διάστημα, δεν εφαρμόζεται εξωτερική δύναμη στον ρότορα, επομένως, ο ρότορας σταθεροποιείται στο σημείο ισορροπίας στο οποίο θα ισορροπεί λόγω του βάρους του, όταν θα παραλαμβάνει το βάρος του το υδροδυναμικό τμήμα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, (σημείο 3 των εικόνων 103 και 105, από 0.3 έως 0.6 δευτερόλεπτα).

Το φορτίο που παραλαμβάνει το έδρανο λόγω του βάρους του ρότορα είναι $F_{bgY} = 8.44 \text{ N}$ (από την εξίσωση (198)). Επομένως, ο αριθμός Sommerfeld θα είναι $S=0.91$ (από την εξίσωση (199)).

Από τον Γκέρτζο και τους υπόλοιπους συγγραφείς [80], για $L/D=0.625$ και αριθμό Sommerfeld 0.91, η σχετική εκκεντρότητα του ρότορα πρέπει να είναι 0.27 και η γωνία συμπεριφοράς του ρότορα 74° , τα οποία συμπίπτουν με τα δικά μας αποτελέσματα, όπως φαίνεται στις εικόνες 109 και 110 από 0.6 έως 0.9 δευτερόλεπτα.

Οι δυνάμεις λόγω του υδροδυναμικού πεδίου φαίνονται στις εικόνες 113 και 114 για τις Y και X-διευθύνσεις αντίστοιχα. Η δύναμη λόγω του υδροδυναμικού πεδίου στην Y-διεύθυνση για αυτήν την χρονική περίοδο (0.3 έως 0.6 δευτερόλεπτα), είναι 8.44 N, και ισούται με το βάρος του ρότορα που το έδρανο παραλαμβάνει.

Στα 0.3 δευτερόλεπτα, η ταχύτητα του ρότορα στην Y-διεύθυνση έχει αρνητική τιμή (εικόνα 116), διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα κάτω, δηλαδή προς την αρνητική φορά Y, λόγω του βάρους του ρότορα και η ταχύτητα στην X-διεύθυνση έχει θετικές τιμές (εικόνα 117), διότι ο ρότορας μετακινείται προς τα δεξιά.

Στη συνέχεια, στα 0.6 δευτερόλεπτα οι δύο περιπτώσεις διαφοροποιούνται.

Για την περίπτωση 2, εφαρμόζουμε ένα εξωτερικό φορτίο στον ρότορα. Η εξωτερική δύναμη στην Y-διεύθυνση είναι $F_{eY} = 100 \text{ N}$, προς την αρνητική φορά Y και εφαρμόζεται σε μήκος $L_{FeY} = 125 \text{ mm}$ από το αριστερό άκρο του ρότορα (εικόνα 52). Η δύναμη που εφαρμόζεται στο έδρανο, λόγω της εξωτερικής δύναμης είναι $F_{beY} = 43.783 \text{ N}$ (από την εξίσωση (200)). Το φορτίο που παραλαμβάνει το έδρανο λόγω του βάρους του ρότορα και λόγω του εξωτερικού φορτίου είναι $F_{bY} = 52.22 \text{ N}$ (από την εξίσωση (201)). Επομένως, ο αριθμός Sommerfeld από 0.6 έως 0.9 δευτερόλεπτα, ο οποίος αντιστοιχεί στο υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, είναι $S=0.147$.

Ταυτόχρονα, στα 0.6 δευτερόλεπτα, το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα ενεργοποιείται και πάλι, με σκοπό να παραλάβει το φορτίο διατηρώντας το σημείο ισορροπίας σταθερό. Σε αυτό το χρονικό σημείο, το έδρανο λειτουργεί ως υβριδικό.

Ορίζουμε στον ελεγκτή του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού τμήματος του

υβριδικού εδράνου ολίσθησης, το επιθυμητό σημείο ισορροπίας να είναι το σημείο ισορροπίας που είχε ο ρότορας αρχικά, ακριβώς πριν ενεργοποιηθεί το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα. Αυτό φαίνεται στις εικόνες 107 και 108, από 0.6 έως 0.9 δευτερόλεπτα, όπου οι θέσεις y και x του ρότορα παραμένουν σταθερές. Στα 0.9 δευτερόλεπτα, η θέση του ρότορα είναι το σημείο 4 της εικόνας 103.

Οι Y και X -υδροδυναμικές δυνάμεις δεν έχουν μεταβληθεί, διότι το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο παραλαμβάνει μόνο το εξωτερικό φορτίο, με αποτέλεσμα το υδροδυναμικό πεδίο να συνεχίζει να παραλαμβάνει το ίδιο φορτίο που παραλάμβανε προηγουμένως, διότι το σημείο ισορροπίας του ρότορα παραμένει σταθερό, παρόλο που το συνολικό φορτίο που παραλαμβάνει το υβριδικό έδρανο ολίσθησης αντιστοιχεί σε αριθμό Sommerfeld 0.147 (μεγαλύτερο φορτίο). Στα 0.6 δευτερόλεπτα, οι ταχύτητες του ρότορα στις Y και X -διευθύνσεις δεν παραμένουν σχεδόν μηδέν (εικόνες 116 και 117), διότι ο ρότορας διαταράσσεται όταν ενεργοποιείται το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Η υδροδυναμική δύναμη στην X -διεύθυνση γίνεται σχεδόν μηδέν στο τέλος κάθε περιόδου 0.3 δευτερολέπτων, διότι τα επιθυμητά σημεία ισορροπίας, είναι σημεία ισορροπίας του υδροδυναμικού τμήματος. Επίσης, για την περίπτωση 3, στα 0.6 δευτερόλεπτα δεν εφαρμόζουμε εξωτερικό φορτίο στον ρότορα (εικόνα 115).

Στα 0.6 δευτερόλεπτα, το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης ενεργοποιείται και πάλι, διατηρώντας το σημείο ισορροπίας του ρότορα σταθερό, με σκοπό να μειωθούν οι διαταραχές στην κίνηση του ρότορα. Σε αυτό το χρονικό σημείο, το έδρανο λειτουργεί ως υβριδικό.

Ως συμπέρασμα, βλέπουμε ότι το υβριδικό έδρανο ολίσθησης μπορεί να λειτουργήσει ως ενεργό ηλεκτρομαγνητικό με σκοπό να αιωρηθεί ο ρότορας, στη συνέχεια να λειτουργήσει ως υδροδυναμικό και έπειτα το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα μπορεί να ενεργοποιηθεί και πάλι, με σκοπό να παραλάβει το εξωτερικό φορτίο, εάν υπάρχει, διατηρώντας το σημείο ισορροπίας του ρότορα σταθερό, σε σημείο ισορροπίας του υδροδυναμικού τμήματος.

Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί, εάν για παράδειγμα υπάρξει κάποιο πρόβλημα στον ρότορα, όπως μία ρωγμή, με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ρότορα να αυξάνονται, και σε αυτήν την περίπτωση υπάρξει η ανάγκη, το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης να παραλάβει αυτές τις διαταραχές και να διατηρήσει τον ρότορα όσο το δυνατόν πιο σταθερό στο σημείο ισορροπίας του, μειώνοντας το εύρος της τροχιάς του.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένη αζυγοσταθμία του ρότορα και έχει προσομοιωθεί και το γυροσκοπικό φαινόμενο του ρότορα. Ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα 16 rps. Επομένως, σε 0.3 δευτερόλεπτα, θα έχει κάνει $16 \cdot 0.3 = 4.8$ περιστροφές, όπως φαίνεται και στις εικόνες 104 και 106.

Εικόνα 107. Θέση y του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 108. Θέση x του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 109. Σχετική εκκεντρότητα του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 110. Γωνία συμπεριφοράς του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 111. Υ-Ρεύμα ελέγχου του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου, για $K_P = 9266.148$, $K_I = 256680$, $K_D = 9.88218$

Εικόνα 112. Χ-Ρεύμα ελέγχου του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου, για $K_P = 9266.148$, $K_I = 256680$, $K_D = 9.88218$

Εικόνα 113. Y -Υδροδυναμική δύναμη που δέχεται ο ρότορας εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσεως του χρόνου

Εικόνα 114. X -Υδροδυναμική δύναμη που δέχεται ο ρότορας εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσεως του χρόνου

Εικόνα 115. Y -Εξωτερική δύναμη που δέχεται ο ρότορας εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 116. Y -Ταχύτητα του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 117. X-Ταχύτητα του ρότορα εντός του Ενεργού Υδρομαγνητικού Εδράνου, συναρτήσει του χρόνου

Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων, σχηματικό διάγραμμα του ελέγχου, ανάλυση των εξισώσεων του PID ελεγκτή, ανάλυση των συναρτήσεων μεταφοράς, ανάλυση των μη-γραμμικών εξισώσεων κίνησης του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου συμπεριλαμβάνοντας την αζυγοσταθμία του ρότορα και το γυροσκοπικό φαινόμενο και προσομοίωση του ελέγχου στο Matlab και στο Simulink module του Matlab.

Τα αποτελέσματα που δίνει το Matlab όπως προγραμματίστηκε στη συγκεκριμένη εργασία, είναι η τροχιά του ρότορα, οι x και y -θέσεις του ρότορα, οι ταχύτητες του ρότορα και τα ρεύματα ελέγχου για την X και Y -διεύθυνση και οι δυνάμεις λόγω του υδροδυναμικού πεδίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης για την X και Y -διεύθυνση. Αυτά τα αποτελέσματα το Matlab αποθηκεύει σε αρχεία στον υπολογιστή, σε μορφή εικόνων και σε αρχεία Excel, ώστε να μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε για την εξαγωγή διαγραμμάτων και συμπερασμάτων.

Ακόμα, τα κέρδη PID τα οποία προκύπτουν από το SISO tool module του Matlab μέσω των γραμμικών εξισώσεων κίνησης του ρότορα, προκύπτει ότι μπορούν να ελέγξουν τον ρότορα και σε μεγαλύτερη ακτίνα γύρω από το κέντρο του εδράνου, και όχι μόνο στο κέντρο του. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει διότι κατά την προσομοίωση χρησιμοποιούμε τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα, οι οποίες αντιστοιχούν στην πραγματικότητα, και παρατηρούμε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τον έλεγχο του ρότορα. Επίσης, αυτό το αποτέλεσμα παρατηρείται διότι η ακτινική χάρη του υβριδικού εδράνου ολίσθησης είναι κατά πολύ μικρότερη από το μαγνητικό διάκενό του, επομένως, ο PID ελεγκτής είναι σαν να λειτουργεί εντός της γραμμικής περιοχής του. Μετά από δοκιμές, για τα

συγκεκριμένα δεδομένα που χρησιμοποιήσαμε, παρατηρήσαμε ότι ο ρότορας του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου μπορεί να ελεγχθεί σε ακτίνα γύρω από το κέντρο του εδράνου, ίση με το μισό του μαγνητικού διακένου. Το μαγνητικό διάκενο που επιλέξαμε στις παραπάνω προσομοιώσεις είναι 0.5 mm, το μισό του είναι 0.25 mm και η ακτινική χάρη είναι 0.1 mm, επομένως, μπορεί η θέση του ρότορα να ελεγχθεί με άνεση εντός της ακτινικής χάρης. Τέλος, παρατηρούμε ότι ο ρότορας μετακινείται σε κάθε επιθυμητό σημείο ισορροπίας σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και οι διαταραχές του ρότορα μειώνονται κατά την υβριδική λειτουργία του εδράνου.

Η προσομοίωση του PID ελέγχου των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων στο Matlab αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να προσομοιώνει ολοκληρωμένο PID έλεγχο ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων.

Κεφάλαιο 6

Σύστημα Ρότορα – Εδράνων

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναφερθούμε στο σχεδιασμό του συστήματος ρότορα-εδράνων. Το κεφάλαιο αυτό συνδυάζει τα προηγούμενα κεφάλαια, δηλαδή περιλαμβάνει την επίλυση του υδροδυναμικού και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου των εδράνων μέσω του προγράμματος Ansys. Επίσης, περιλαμβάνει την επίλυση του ελέγχου του ρότορα εντός των εδράνων μέσω του Matlab και του Simulink module του Matlab και επιπλέον, σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται επίλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος ρότορα-εδράνων μέσω του προγράμματος Matlab.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο χρησιμοποιούμε τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να επιλύσουμε το σύστημα του ρότορα-εδράνων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε τη μοντελοποίηση σύμφωνα με τη θεωρία Timoshenko για τα στοιχεία του ρότορα.

Τα έδρανα στα οποία θα αναφερθούμε στο συγκεκριμένο κεφάλαιο είναι υβριδικά, και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για την περίπτωση που λειτουργούν ως υδροδυναμικά μόνο, ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά μόνο και ως ενεργά υδρομαγνητικά, με σκοπό να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα. Σε κάθε μία από τις παραπάνω τρεις περιπτώσεις λειτουργίας των εδράνων, οι γραμμικοί συντελεστές ελαστικότητας K και απόσβεσης C των εδράνων υπολογίζονται, θεωρώντας μικρές μετατοπίσεις του ρότορα γύρω από το σημείο ισορροπίας του, χρησιμοποιώντας CFD και FEM τεχνικές μέσω του προγράμματος Ansys.

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα Matlab σε συνδυασμό με το Simulink module του Matlab χρησιμοποιείται με σκοπό να υπολογιστούν οι κρίσιμες ταχύτητες του συστήματος ρότορα-εδράνων. Επίσης, υπολογίζεται η τροχιά του ρότορα στα σημεία των εδράνων, τα διαγράμματα Campbell και οι ιδιομορφές τους. Η αξυγοσταθμία ενός ή περισσότερων δίσκων που περιστρέφονται μαζί με τον ρότορα καθώς και το γυροσκοπικό φαινόμενο λαμβάνονται υπόψη.

Επίσης, ως αποτελέσματα έχουμε και τα ρεύματα ελέγχου για τα έδρανα για τις X και Y -διευθύνσεις, τα οποία εξαρτώνται και από τα κέρδη που υπολογίζουμε για τον PID ελεγκτή.

Εξισώσεις κίνησης του ρότορα

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την εξίσωση κίνησης του ρότορα μετά το assembly [87], δίνεται από την εξίσωση (202).

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{F}_{\text{εξωτ}} \quad (202)$$

Όπου, για n κόμβους, έχουμε:

$$\mathbf{q} = [y_1, x_1, \theta_{y1}, \theta_{x1}, y_2, x_2, \theta_{y2}, \theta_{x2}, \dots, y_n, x_n, \theta_{yn}, \theta_{xn}]^T \quad (203)$$

Προκειμένου να ευρεθούν οι ιδιοτιμές του συστήματος, γράφουμε την εξίσωση (202) σε state-space μορφή, η οποία δίνεται από την εξίσωση (204):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} + \Omega \mathbf{G} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (204)$$

Το πρόβλημα των ιδιοτιμών σε μορφή διπλής τάξης δίνεται από την εξίσωση (205):

$$[\mathbf{M}s^2 + \mathbf{C}s + \Omega \mathbf{G}s + \mathbf{K}] \mathbf{u}_R = \mathbf{0} \quad (205)$$

Όπου $\mathbf{u}_R$ είναι η δεξιά ιδιομορφή. Οι δεξιές ιδιομορφές σχετίζονται με την απόκριση.

Η αριστερή ιδιομορφή $\mathbf{u}_L$ δίνεται από την εξίσωση (206):

$$[\mathbf{M}^T \bar{s}^2 + \mathbf{C}^T \bar{s} + \Omega \mathbf{G}^T \bar{s} + \mathbf{K}^T] \mathbf{u}_L = \mathbf{0} \quad (206)$$

Όπου $\bar{s}$ είναι το συζυγές του s .

Το μητρώο μάζας των στοιχείων, σύμφωνα με τη μοντελοποίηση Timoshenko, δίνεται από την εξίσωση (207):

$$\mathbf{M}_e = \frac{\rho_e A_e L_e}{840 \cdot (1 + \Phi_e)^2} \begin{bmatrix} m_1 & & & & & & & \\ 0 & m_1 & & & & & & \text{συμ} \\ 0 & -m_2 & m_5 & & & & & \\ m_2 & 0 & 0 & m_5 & & & & \\ m_3 & 0 & 0 & -m_4 & m_1 & & & \\ 0 & m_3 & m_4 & 0 & 0 & m_1 & & \\ 0 & -m_4 & m_6 & 0 & 0 & m_2 & m_5 & \\ m_4 & 0 & 0 & m_6 & -m_2 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} + \frac{\rho_e I_e}{30 \cdot L_e \cdot (1 + \Phi_e)^2} \begin{bmatrix} m_7 & & & & & & & \\ 0 & m_7 & & & & & & \text{συμ} \\ 0 & -m_8 & m_9 & & & & & \\ m_8 & 0 & 0 & m_9 & & & & \\ -m_7 & 0 & 0 & -m_8 & m_7 & & & \\ 0 & -m_7 & m_8 & 0 & 0 & m_7 & & \\ 0 & -m_8 & m_{10} & 0 & 0 & m_8 & m_9 & \\ m_8 & 0 & 0 & m_{10} & -m_8 & 0 & 0 & m_9 \end{bmatrix} \quad (207)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} m_1 &= 312 + 588\Phi_e + 280\Phi_e^2 & m_6 &= -(6 + 14\Phi_e + 7\Phi_e^2)L_e^2 \\ m_2 &= (44 + 77\Phi_e + 35\Phi_e^2)L_e & m_7 &= 36 \\ m_3 &= 108 + 252\Phi_e + 140\Phi_e^2 & m_8 &= (3 - 15\Phi_e)L_e \\ m_4 &= -(26 + 63\Phi_e + 35\Phi_e^2)L_e & m_9 &= (4 + 5\Phi_e + 10\Phi_e^2)L_e^2 \\ m_5 &= (8 + 14\Phi_e + 7\Phi_e^2)L_e^2 & m_{10} &= (-1 - 5\Phi_e + 5\Phi_e^2)L_e^2 \end{aligned} \quad (208)$$

Επίσης, ρ_e είναι η πυκνότητα του υλικού του στοιχείου, A_e είναι η επιφάνεια της τομής του στοιχείου, L_e είναι το μήκος του στοιχείου, I_e είναι η ροπή αδράνειας και το Φ_e δίνεται από την εξίσωση (209):

$$\Phi_e = \frac{12E_e I_e}{\kappa_e G_e A_e L_e^2} \quad (209)$$

Όπου E_e είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του στοιχείου, κ_e είναι ο συντελεστής διάτμησης, ο οποίος εξαρτάται από την επιφάνεια τομής του ρότορα και για την περίπτωση του συμπαγούς ρότορα με τομή κυκλικού σχήματος, όπως στην περίπτωση που εξετάζουμε στη συγκεκριμένη εργασία, δίνεται από την εξίσωση (210):

$$\kappa_e = \frac{6(1+\nu_e)}{(7+6\nu_e)} \quad (210)$$

Όπου ν_e είναι ο λόγος Poisson.

Επίσης, G_e είναι το μέτρο διάτμησης και δίνεται από την εξίσωση (211):

$$G_e = \frac{E_e}{2 \cdot (1+\nu_e)} \quad (211)$$

Το γυροσκοπικό μητρώο των στοιχείων, σύμφωνα με τη μοντελοποίηση Timoshenko δίνεται από την εξίσωση (212):

$$\mathbf{G}_e = \frac{\rho_e I_e}{15(1+\Phi_e)^2 L_e} \begin{bmatrix} 0 & & & & & & & \\ -g_1 & 0 & & & & & & \text{αντισυμ} \\ g_2 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & g_2 & -g_3 & 0 & & & & \\ 0 & -g_1 & g_2 & 0 & 0 & & & \\ g_1 & 0 & 0 & g_2 & -g_1 & 0 & & \\ g_2 & 0 & 0 & g_4 & -g_2 & 0 & 0 & \\ 0 & g_2 & -g_4 & 0 & 0 & -g_2 & -g_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (212)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} g_1 &= 36 & g_3 &= (4+5\Phi_e+10\Phi_e^2)L_e^2 \\ g_2 &= (3-15\Phi_e)L_e & g_4 &= (-1-5\Phi_e+5\Phi_e^2)L_e^2 \end{aligned} \quad (213)$$

Το μητρώο ελαστικότητας των στοιχείων, σύμφωνα με τη μοντελοποίηση Timoshenko δίνεται από την εξίσωση (214):

$$\mathbf{K}_e = \frac{E_e I_e}{(1 + \Phi_e) L_e^3} \begin{bmatrix} 12 & & & & & & & & \\ 0 & 12 & & & & & & & \\ & & \text{συμ} & & & & & & \\ 0 & -6L_e & (4 + \Phi_e)L_e^2 & & & & & & \\ 6L_e & 0 & 0 & (4 + \Phi_e)L_e^2 & & & & & \\ -12 & 0 & 0 & -6L_e & 12 & & & & \\ 0 & -12 & 6L_e^2 & 0 & 0 & 12 & & & \\ 0 & -6L_e & (2 - \Phi_e)L_e^2 & 0 & 0 & 6L_e & (4 + \Phi_e)L_e^2 & & \\ 6L_e & 0 & 0 & (2 - \Phi_e)L_e^2 & -6L_e & 0 & 0 & (4 + \Phi_e)L_e^2 \end{bmatrix} \quad (214)$$

Το μητρώο δύναμης, λόγω του βάρους του κάθε στοιχείου, δίνεται από την εξίσωση (215):

$$\mathbf{F}_{\text{εξωτ}} = [m_{e1}g_a, 0, 0, 0, m_{e2}g_a, 0, 0, 0, \dots, m_{en}g_a, 0, 0, 0]^T \quad (215)$$

Μητρώα λόγω του δίσκου

Για τους κόμβους του ρότορα στους οποίους βρίσκεται δίσκος, το τοπικό μητρώο μάζας του δίσκου δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{M}_\delta = \begin{bmatrix} m_\delta & & & \text{συμ} \\ 0 & m_\delta & & \\ 0 & 0 & I_\delta & \\ 0 & 0 & 0 & I_\delta \end{bmatrix} \quad (216)$$

Όπου:

$$I_\delta = \frac{m_\delta}{12} (3R_\delta^2 + b^2) \quad (217)$$

όπου m_δ είναι η μάζα του δίσκου, R_δ είναι η ακτίνα του δίσκου και b είναι το πλάτος του δίσκου.

Το τοπικό γυροσκοπικό μητρώο του δίσκου, δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{G}_\delta = \begin{bmatrix} 0 & & & \text{αντισυμ} \\ 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & -I_p & 0 \end{bmatrix} \quad (218)$$

Όπου:

$$I_p = \frac{1}{2} m_\delta R_\delta^2 \cong 2I_\delta \quad (219)$$

Τέλος, για τους κόμβους του ρότορα στους οποίους βρίσκεται δίσκος, το τοπικό μητρώο δύναμης του δίσκου στην περίπτωση όπου υπάρχει και αζυγοσταθμία σε αυτόν, δίνεται από την εξίσωση (220):

$$\mathbf{F}_\delta = [m_\delta g_a + m_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \cdot d_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \cdot \eta\mu(\Omega t), m_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \cdot d_{\alpha\zeta\gamma\gamma} \cdot \sigma\upsilon\nu(\Omega t), 0, 0]^T \quad (220)$$

Μητρώα λόγω των εδράνων

Τα δύο έδρανα τα οποία υποστηρίζουν τον ρότορα είναι υβριδικά και ίδια μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 68. Μπορούν να λειτουργούν ως υδροδυναμικά, ενεργά ηλεκτρομαγνητικά ή υβριδικά (υδροδυναμικά και ενεργά ηλεκτρομαγνητικά ταυτόχρονα). Η λειτουργία των δύο εδράνων επιλέγουμε να είναι η ίδια κάθε στιγμή.

Στην περίπτωση όπου τα έδρανα λειτουργούν ως υδροδυναμικά, για τους κόμβους του ρότορα στους οποίους βρίσκονται τα έδρανα, το τοπικό μητρώο ελαστικότητας των εδράνων δίνεται από την εξίσωση (221):

$$\mathbf{K}_{\varepsilon\delta\rho} = \begin{bmatrix} K_{Yy}^{Y\Delta PO} & K_{Yx}^{Y\Delta PO} & 0 & 0 \\ K_{Xy}^{Y\Delta PO} & K_{Xx}^{Y\Delta PO} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (221)$$

και το τοπικό μητρώο απόσβεσης δίνεται από την εξίσωση (222):

$$\mathbf{C}_{\varepsilon\delta\rho} = \begin{bmatrix} C_{Yy}^{Y\Delta PO} & C_{Yx}^{Y\Delta PO} & 0 & 0 \\ C_{Xy}^{Y\Delta PO} & C_{Xx}^{Y\Delta PO} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (222)$$

Στην περίπτωση όπου τα έδρανα λειτουργούν ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά, για τους κόμβους του ρότορα στους οποίους βρίσκονται τα έδρανα, το τοπικό μητρώο ελαστικότητας των εδράνων δίνεται από την εξίσωση (223):

$$\mathbf{K}_{\varepsilon\delta\rho} = \begin{bmatrix} K_{Yy}^{EME} & K_{Yx}^{EME} & 0 & 0 \\ K_{Xy}^{EME} & K_{Xx}^{EME} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (223)$$

και το τοπικό μητρώο απόσβεσης δίνεται από την εξίσωση (224):

$$\mathbf{C}_{\varepsilon\delta\rho} = \begin{bmatrix} C_{Yy}^{EME} & C_{Yx}^{EME} & 0 & 0 \\ C_{Xy}^{EME} & C_{Xx}^{EME} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (224)$$

Τέλος, το τοπικό μητρώο δύναμης στους κόμβους των εδράνων, δίνεται από την εξίσωση (225):

$$\mathbf{F}_{\varepsilon\delta\rho} = [F_{Yy}^{EME} + F_{Yx}^{EME}, F_{Xx}^{EME} + F_{Xy}^{EME}, 0, 0]^T \quad (225)$$

Όπου:

$$F_{Yy}^{EME} = K_{Yyl}^{EME} \cdot I_{cY} \quad (226)$$

$$F_{Yx}^{EME} = K_{Yxl}^{EME} \cdot I_{cY} \quad (227)$$

$$F_{Xy}^{EME} = K_{XyI}^{EME} \cdot I_{cX} \quad (228)$$

$$F_{Xx}^{EME} = K_{XxI}^{EME} \cdot I_{cX} \quad (229)$$

Στην περίπτωση όπου τα έδρανα λειτουργούν ως ενεργά υδρομαγνητικά, για τους κόμβους του ρότορα στους οποίους βρίσκονται τα έδρανα, το τοπικό μητρώο ελαστικότητας των εδράνων δίνεται από την εξίσωση (230):

$$\mathbf{K}_{\varepsilon\delta\rho} = \begin{bmatrix} K_{Yy}^{Y\Delta PO} + K_{Yy}^{EME} & K_{Yx}^{Y\Delta PO} + K_{Yx}^{EME} & 0 & 0 \\ K_{Xy}^{Y\Delta PO} + K_{Xy}^{EME} & K_{Xx}^{Y\Delta PO} + K_{Xx}^{EME} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (230)$$

και το τοπικό μητρώο απόσβεσης δίνεται από την εξίσωση (231):

$$\mathbf{C}_{\varepsilon\delta\rho} = \begin{bmatrix} C_{Yy}^{Y\Delta PO} + C_{Yy}^{EME} & C_{Yx}^{Y\Delta PO} + C_{Yx}^{EME} & 0 & 0 \\ C_{Xy}^{Y\Delta PO} + C_{Xy}^{EME} & C_{Xx}^{Y\Delta PO} + C_{Xx}^{EME} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (231)$$

Όπου $C_{Xx}^{Y\Delta PO}$, $C_{Xy}^{Y\Delta PO}$, $C_{Yx}^{Y\Delta PO}$ και $C_{Yy}^{Y\Delta PO}$ είναι οι υδροδυναμικοί συντελεστές απόσβεσης, $K_{Xx}^{Y\Delta PO}$, $K_{Xy}^{Y\Delta PO}$, $K_{Yx}^{Y\Delta PO}$ και $K_{Yy}^{Y\Delta PO}$ είναι οι υδροδυναμικοί συντελεστές ελαστικότητας, C_{Xx}^{EME} , C_{Xy}^{EME} , C_{Yx}^{EME} και C_{Yy}^{EME} είναι οι ενεργοί ηλεκτρομαγνητικοί συντελεστές απόσβεσης και K_{Xx}^{EME} , K_{Xy}^{EME} , K_{Yx}^{EME} και K_{Yy}^{EME} είναι οι ενεργοί ηλεκτρομαγνητικοί συντελεστές ελαστικότητας. Οι τελευταίοι συντελεστές έχουν αρνητικές τιμές. Οι συντελεστές K_{XI}^{EME} , K_{XyI}^{EME} , K_{YxI}^{EME} και K_{YI}^{EME} αντιστοιχούν στους συντελεστές ελαστικότητας ρεύματος των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων, το g_a είναι η επιτάχυνση βαρύτητας, $m_{αζυγ}$ είναι η μάζα της αζυγοσταθμίας, $d_{αζυγ}$ είναι η απόσταση της αζυγοσταθμίας από τον άξονα περιστροφής του ρότορα και Ω είναι η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, I_{cX} και I_{cY} είναι τα ρεύματα ελέγχου στις X και Y-διευθύνσεις αντίστοιχα.

Τέλος, στην περίπτωση των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων, το μητρώο δύναμης δίνεται επίσης από την εξίσωση (225).

Διάγραμμα Campbell, κρίσιμες ταχύτητες

Προκειμένου να ευρεθούν οι κρίσιμες ταχύτητες του συστήματος ρότορα-εδράνων στις οποίες παρατηρείται μεγιστοποίηση του εύρους της απόκρισης του ρότορα, σχεδιάζουμε το διάγραμμα Campbell, το οποίο απεικονίζει τη μεταβολή των φυσικών συχνοτήτων του συστήματος (συνήθως σε Hz) συναρτήσει των ταχυτήτων περιστροφής του ρότορα (συνήθως σε rpm).

Στα σημεία όπου οι φυσικές συχνότητες του συστήματος είναι αριθμητικά ίσες με την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα (σε ίδιες μονάδες μέτρησης) παρατηρούνται οι μέγιστες αποκρίσεις. Γι' αυτό τον λόγο, σχεδιάζουμε στο ίδιο διάγραμμα και την ευθεία η οποία έχει αρχή το σημείο (0,0) και αντιστοιχεί στην

εξίσωση: φυσικές συχνότητες συστήματος = ταχύτητα περιστροφής του ρότορα. Τα σημεία τομής της ευθείας αυτής με τις καμπύλες της μεταβολής των φυσικών συχνοτήτων του συστήματος συναρτήσει των ταχυτήτων περιστροφής του ρότορα είναι οι κρίσιμες ταχύτητες του ρότορα.

Πρακτικά, για την εύρεση των τιμών των κρίσιμων ταχυτήτων χρησιμοποιούμε την μέθοδο άμεσης προσέγγισης, θεωρώντας ότι οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των εδράνων δεν εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα και οι εξωτερικές δυνάμεις μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής (εξωτερικές δυνάμεις λόγω αζυγοσταθμίας). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, οι κρίσιμες ταχύτητες βρίσκονται όταν μία φυσική συχνότητα ισούται με την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα και υπολογίζονται ως αποτέλεσμα προβλήματος ιδιοτιμών.

Έστω ότι η συχνότητα ω_f μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής ως εξής:

$$\omega_f = n\Omega \quad (232)$$

Έστω ότι η δύναμη δίνεται από την εξίσωση:

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{Q}_0 e^{j\omega_f t} \quad (233)$$

τότε, εάν η λύση της εξίσωσης (232) είναι της μορφής:

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_0 e^{j\omega_f t} \quad (234)$$

η εξίσωση (232) οδηγεί στην εξίσωση (235):

$$\left(-\Omega^2 \left[n^2 \mathbf{M} + jn\mathbf{G} \right] + j\Omega n\mathbf{C} + \mathbf{K} \right) \mathbf{q}_0 = \mathbf{Q}_0 \quad (235)$$

Οι κρίσιμες ταχύτητες βρίσκονται όταν η απόκριση είναι μεγάλη, το οποίο συμβαίνει όταν η μήτρα της εξίσωσης (235) είναι σχεδόν ιδιάζουσα.

Η λύση βρίσκεται θέτοντας $\mathbf{Q}_0 = \mathbf{0}$, το οποίο καταλήγει σε πρόβλημα ιδιοτιμών για την ταχύτητα Ω , η οποία δίνεται από την εξίσωση (236):

$$\left(-\Omega^2 \left[n^2 \mathbf{M} + jn\mathbf{G} \right] + j\Omega n\mathbf{C} + \mathbf{K} \right) \mathbf{q}_0 = \mathbf{0} \quad (236)$$

Η κρίσιμη ταχύτητα Ω αντιστοιχεί στο πραγματικό μέρος της λύσης της εξίσωσης (236).

Απόκριση του ρότορα λόγω αζυγοσταθμίας σε δίσκο

Για την εύρεση της απόκρισης του ρότορα λόγω αζυγοσταθμίας σε δίσκο, έστω ότι η αποσταση της αζυγοσταθμίας από τον άξονα συμμετρίας του ρότορα είναι $\mathbf{q}_e$. Τότε, μπορούμε στην εξίσωση (202) να αντικαταστήσουμε το $\mathbf{q}$ με $\mathbf{q} + \mathbf{q}_e$ στους όρους της αδράνειας και στους γυροσκοπικούς όρους. Επομένως, έχουμε:

$$\mathbf{M} \cdot (\ddot{\mathbf{q}} + \ddot{\mathbf{q}}_e) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \Omega \cdot \mathbf{G} \cdot (\dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{q}}_e) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{F}_{\text{εξωτ}} \quad (237)$$

και χωρίς εξωτερικές δυνάμεις, έχουμε:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \cdot (\ddot{\mathbf{q}} + \ddot{\mathbf{q}}_e) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \Omega \cdot \mathbf{G} \cdot (\dot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{q}}_e) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} &= \mathbf{0} \Rightarrow \\ \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \Omega \cdot \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} &= -\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_e - \Omega \cdot \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{q}}_e \Rightarrow \\ \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \Omega \cdot \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} &= \Omega^2 \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{q}_e - \Omega \cdot \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{q}}_e \end{aligned} \quad (238)$$

Έστω ότι ο δίσκος ο οποίος βρίσκεται στον κόμβο κ κατά μήκος του ρότορα, έχει τοποθετηθεί με μία μετατόπιση ε και μία γωνία β . Σε αυτή την περίπτωση, το διάνυσμα $\mathbf{q}_\kappa$ το οποίο αναφέρεται στο στοιχείο όπου βρίσκεται ο δίσκος είναι:

$$\mathbf{q}_\kappa = \begin{Bmatrix} \varepsilon \cdot \sin(\Omega t + \delta) \\ \varepsilon \cdot \eta \mu(\Omega t + \delta) \\ -\beta \cdot \eta \mu(\Omega t + \gamma) \\ \beta \cdot \sin(\Omega t + \gamma) \end{Bmatrix} \quad \text{και} \quad \dot{\mathbf{q}}_\kappa = \begin{Bmatrix} -\varepsilon \cdot \Omega \cdot \eta \mu(\Omega t + \delta) \\ \varepsilon \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega t + \delta) \\ -\beta \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega t + \gamma) \\ -\beta \cdot \Omega \cdot \eta \mu(\Omega t + \gamma) \end{Bmatrix} \quad (239)$$

Όπου δ και γ είναι οι γωνίες για χρόνο $t=0$, για τα διανύσματα της δύναμης και της ροπής λόγω της αζυγοσταθμίας, σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων και οι τέσσερις βαθμοί ελευθερίας είναι οι $4\kappa-3$, $4\kappa-2$, $4\kappa-1$ και 4κ .

Τα διανύσματα της εξίσωσης (239), μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\mathbf{q}_\kappa = \Re \left\{ \begin{Bmatrix} \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ -j \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ j \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \\ \beta \cdot e^{j\gamma} \end{Bmatrix} e^{j\Omega t} \right\} \quad \text{και} \quad \dot{\mathbf{q}}_\kappa = \Re \left\{ \begin{Bmatrix} j \cdot \Omega \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ \Omega \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ -\Omega \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \\ j \cdot \Omega \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \end{Bmatrix} e^{j\Omega t} \right\} \quad (240)$$

Επομένως, για τον συγκεκριμένο κόμβο κ , το δεξί μέρος της εξίσωσης (238) ισούται με:

$$\begin{aligned} \Omega^2 \cdot \mathbf{M}_\kappa \cdot \mathbf{q}_e - \Omega \cdot \mathbf{G}_\kappa \cdot \dot{\mathbf{q}}_e &= \\ \Re \left\{ \Omega^2 \begin{bmatrix} m_\kappa & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_\kappa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{\delta\kappa} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{\delta\kappa} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ -j \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ j \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \\ \beta \cdot e^{j\gamma} \end{Bmatrix} e^{j\Omega t} - \right. & \\ \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{P\kappa} \\ 0 & 0 & -I_{P\kappa} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} j \cdot \Omega \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ \Omega \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ -\Omega \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \\ j \cdot \Omega \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \end{Bmatrix} e^{j\Omega t} \left. \right\} & \end{aligned} \quad (241)$$

και ως εκ τούτου, έχουμε:

$$\Omega^2 \cdot \mathbf{M}_\kappa \cdot \mathbf{q}_e - \Omega \cdot \mathbf{G}_\kappa \cdot \dot{\mathbf{q}}_e = \Re \left\{ \Omega^2 \begin{Bmatrix} m_\kappa \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ -j \cdot m_\kappa \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ j \cdot I_{\delta\kappa} \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \\ I_{\delta\kappa} \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \end{Bmatrix} e^{j\Omega t} - \Omega^2 \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ j \cdot I_{P\kappa} \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \\ I_{P\kappa} \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \end{Bmatrix} e^{j\Omega t} \right\} \quad (242)$$

και επομένως:

$$\Omega^2 \cdot \mathbf{M}_\kappa \cdot \mathbf{q}_\varepsilon - \Omega \cdot \mathbf{G}_\kappa \cdot \dot{\mathbf{q}}_\varepsilon = \Re \left(\Omega^2 \left\{ \begin{array}{c} m_\kappa \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ -j \cdot m_\kappa \cdot \varepsilon \cdot e^{j\delta} \\ j \cdot (I_{\delta\kappa} - I_{p\kappa}) \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \\ (I_{\delta\kappa} - I_{p\kappa}) \cdot \beta \cdot e^{j\gamma} \end{array} \right\} e^{j\Omega t} \right) = \Re (\Omega^2 \cdot \mathbf{b}_{0e} \cdot e^{j\Omega t}) \quad (243)$$

Ο όρος $\Omega^2 \cdot \mathbf{b}_{0e}$ είναι το διάνυσμα των δυνάμεων που ενεργούν στον κόμβο κ λόγω της μετατόπισης και της κλίσης του δίσκου.

Επομένως, η εξίσωση (238) γίνεται λόγω της εξίσωσης (243):

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \Omega \cdot \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \Re (\Omega^2 \cdot \mathbf{b}_{0e} \cdot e^{j\Omega t}) \quad (244)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (244), βρίσκουμε την (μιγαδική) απόκριση:

$$\mathbf{q}_0 = \left[(\mathbf{K} - \Omega^2 \cdot \mathbf{M}) + j \cdot \Omega \cdot (\Omega \cdot \mathbf{G} + \mathbf{C}) \right]^{-1} \cdot \Omega^2 \cdot \mathbf{b}_0 \quad (245)$$

η οποία για κάθε κόμβο δίνει την τροχιά του ρότορα στον κόμβο αυτό.

Δεδομένα για την επίλυση του συστήματος

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ρότορα-εδράνων, τα οποία εισάγουμε ως δεδομένα στον κώδικα ο οποίος πραγματοποιεί την επίλυση της δυναμικής του συστήματος αυτού, μέσω του προγράμματος Matlab είναι:

- Τους συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των εδράνων (εξισώσεις (221) και (222) ή (223) και (224) ή (230) και (231), τις θέσεις (εξίσωση (203)) και τις ταχύτητες του ρότορα για την X και Y-διεύθυνση, τα οποία λαμβάνουμε μετά από επίλυση της λειτουργίας των εδράνων μέσω του προγράμματος Ansys,
- το είδος των εδράνων, εάν δηλαδή θα είναι υδροδυναμικά, ενεργά ηλεκτρομαγνητικά ή ενεργά υδρομαγνητικά,
- τον αριθμό των κόμβων και τις διαστάσεις των στοιχείων στα οποία χωρίζουμε το συνολικό μήκος του ρότορα,
- το μέτρο ελαστικότητας,
- τον λόγο Poisson,
- την πυκνότητα των υλικών του ρότορα και των δίσκων,
- τις διαστάσεις των δίσκων,
- τη συνολική μάζα του συστήματος,
- τη μάζα που πρέπει να παραλαμβάνει το κάθε έδρανο,
- την αζυγοσταθμία και τον κόμβο της αζυγοσταθμίας,
- την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα,
- το συνολικό χρόνο της προσομοίωσης και
- το χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε ένα παράδειγμα προσομοίωσης δυναμικής ρότορα-εδράνων, για τις τρεις περιπτώσεις λειτουργίας των εδράνων, δηλαδή υδροδυναμικά, ενεργά ηλεκτρομαγνητικά και ενεργά υδρομαγνητικά.

Η γεωμετρία του ρότορα φαίνεται στην εικόνα 118.

Εικόνα 118. Διαστάσεις του ρότορα

Τα πεπερασμένα στοιχεία του ρότορα αποτελούνται από 17 κόμβους και 16 στοιχεία και προσομοιώνονται με βάση τη θεωρία Timoshenko.

Στις δύο άκρες όπου βρίσκονται τα έδρανα, η διάμετρος του ρότορα είναι 40 mm. Το μήκος του ρότορα είναι 350 mm και το κέντρο βάρους συμπεριλαμβανομένων και των δίσκων βρίσκεται σε μήκος 181.269 mm από το αριστερό άκρο του ρότορα.

Το συνολικό βάρος του ρότορα και των δίσκων είναι 0.971 kg. Το αριστερό έδρανο παραλαμβάνει 4.214 Nt και το δεξί έδρανο 5.314 Nt.

Το υλικό του κάθε δίσκου και του ρότορα κατά το μήκος όπου βρίσκονται τα έδρανα και έχει διάμετρο 40 mm, είναι καθαρός σίδηρος, με μέτρο ελαστικότητας $1.2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, λόγο Poisson 0.31 N/A και πυκνότητα 7100 kg/m^3 . Το υλικό του ρότορα στο υπόλοιπο μήκος του είναι 1060 κράμα Αλουμινίου, με μέτρο ελαστικότητας $6.9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, λόγο Poisson 0.33 N/A και πυκνότητα 2700 kg/m^3 .

Ο ρότορας στηρίζεται σε δύο ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα. Το μήκος των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων είναι 25 mm, ο λόγος μήκους προς διάμετρο $L/D=0.625$, το ιξώδες του λιπαντικού $\mu=0.012 \text{ Pa.s}$, η πυκνότητα του λιπαντικού είναι $\rho=960 \text{ kg/m}^3$, η ακτίνα του ρότορα 20 mm και η ακτινική χάρη $c=100 \mu\text{m}$ (εικόνα 68).

Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού είναι $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$. Το κάθε έδρανο έχει οκτώ πόλους ηλεκτρομαγνητών, οι οποίοι ενώνονται ανά δύο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τέσσερεις ηλεκτρομαγνήτες σχήματος πετάλου. Το σταθερό ρεύμα που διαρρέει τον κάθε έναν από τους τέσσερεις ηλεκτρομαγνήτες είναι 0.2 Ampere και στην X και στην Y-διεύθυνση και το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα για τα πηνία τους είναι 1 Ampere. Το μαγνητικό διάκενο είναι 0.5 mm, ο αριθμός περιελίξεων για κάθε έναν από τους οκτώ πόλους είναι 500, το πλάτος του κάθε πόλου 8 mm και επομένως, η επιφάνεια τομής του κάθε πόλου είναι $8 \times 25 = 200 \text{ mm}^2$.

Για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα των εδράνων, και για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας, δηλαδή ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων και ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων, χρησιμοποιούμε PID ελεγκτές. Συγκεκριμένα, τα κέρδη PID για τα έδρανα φαίνονται στον πίνακα 1.

	Αριστερό έδρανο		Δεξί έδρανο	
	X-διεύθυνση	Y-διεύθυνση	X-διεύθυνση	Y-διεύθυνση
P	9749.7	9967.2	9733.9	9861.3
I	325860	333130	325330	329590
D	8.6939	8.8879	8.6798	8.7935

Πίνακας 1: Κέρδη PID ελεγκτών για το αριστερό και δεξί έδρανο

Η μάζα της αζυγοσταθμίας είναι 2 gr και βρίσκεται σε απόσταση 1 mm από τον άξονα συμμετρίας του ρότορα, στο μέσο του πλάτους του αριστερού δίσκου.

Το σύστημα έχει ροπές αδράνειας $I_z=0.00034767 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ και $I_x=I_y=0.01497659 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Το Matlab και το Simulink module του Matlab χρησιμοποιούνται προκειμένου να υπολογιστούν οι κρίσιμες ταχύτητες, τα διαγράμματα Campbell, οι ιδιομορφές και να γίνει η προσομοίωση της απόκρισης του ρότορα στα σημεία των εδράνων.

Ο υπολογισμός των συντελεστών ελαστικότητας και απόσβεσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού τμήματος των εδράνων γίνεται για δύο περιπτώσεις. Κατά την πρώτη περίπτωση όπου τα έδρανα λειτουργούν ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά, ο υπολογισμός των συντελεστών γίνεται για φορτίο ίσο με το φορτίο που παραλαμβάνει κάθε έδρανο. Κατά την δεύτερη περίπτωση όπου τα έδρανα λειτουργούν ως υβριδικά, ο υπολογισμός των συντελεστών γίνεται για μηδενικό φορτίο, διότι το σύνολο του φορτίου θεωρούμε ότι παραλαμβάνεται από το υδροδυναμικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα λειτουργεί μόνο υποστηρικτικά, ώστε να παραλαμβάνει τις διαταραχές λόγω της αζυγοσταθμίας και του γυροσκοπικού φαινομένου.

	Λειτουργία εδράνων					
	Υδροδυναμική		Ενεργή ηλεκτρομαγνητική		Ενεργή υδρομαγνητική	
	Έδρανο					
	Αριστερό	Δεξί	Αριστερό	Δεξί	Αριστερό	Δεξί
K_{Xx}	82312.998	103694.314	-82066.262	-82130.514	246.736	21564
K_{Xy}	-737292.526	-744496.46	-49.127	-38.779	-737341.65	-744535.2
K_{Yx}	759403.233	765993.499	-34.089	-91.203	759370	765902
K_{Yy}	39718.282	51116.772	-82043.540	-82136.137	-42325	-31019
C_{Xx}	5279.399	5172.857	-2.1461	-2.4107	5277.3	5170.4
C_{Xy}	289.853	359.723	0	0	289.853	359.723
C_{Yx}	454.301	554.261	0	0	454.301	554.261
C_{Yy}	5347.442	5385.254	-2.1553	-2.4295	5345.3	5382.8
K_{XxI}	-	-	193.855	193.855	193.855	193.850
K_{XyI}	-	-	0.002	0.002	0.002	0.002
K_{YxI}	-	-	0.114	0.114	0.114	0.114
K_{YyI}	-	-	193.885	193.885	193.867	193.824

Πίνακας 2: Συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των εδράνων

Οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των εδράνων για τις τρεις περιπτώσεις λειτουργίας τους (υδροδυναμική, ενεργή ηλεκτρομαγνητική και ενεργή υδρομαγνητική), φαίνονται στον πίνακα 2.

Το διάγραμμα ροής της προσομοίωσης φαίνεται στην εικόνα 119. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής, αρχικά εισάγουμε το φορτίο για το αριστερό και το δεξί έδρανο και όλα τα γεωμετρικά δεδομένα του ρότορα και των εδράνων. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις κρίσιμες ταχύτητες για τις τρεις περιπτώσεις λειτουργίας των εδράνων (εξίσωση (236)). Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τη θέση ισορροπίας του ρότορα στο αριστερό και στο δεξί έδρανο, σύμφωνα με το φορτίο που αντιστοιχεί σε κάθε έδρανο, όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε και τους συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των δύο αυτών εδράνων. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούμε στη συνέχεια προκειμένου να γίνει η επίλυση της δυναμικής του ρότορα.

Αρχικά, γίνεται έλεγχος εάν τα έδρανα θα λειτουργούν ως υδροδυναμικά, ενεργά ηλεκτρομαγνητικά ή υβριδικά. Στην περίπτωση που λειτουργούν ως υδροδυναμικά, έχουμε προγραμματίσει να πραγματοποιείται η επίλυση από τη χρονική στιγμή 0 δευτερόλεπτα έως τον τελικό χρόνο. Στη περίπτωση που τα έδρανα λειτουργούν ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά ή ενεργά υδρομαγνητικά, πραγματοποιείται παύση της προσομοίωσης κάθε 1/30000 δευτερόλεπτα. Μόνο στη πρώτη παύση, γίνεται υπολογισμός των κερδών PID, σύμφωνα και με τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος που δίνεται από την εξίσωση (154). Στη συνέχεια, με αυτά τα κέρδη PID, κάθε 1/30000 δευτερόλεπτα υπολογίζουμε τα ρεύματα ελέγχου που θα δίνονται στα πηνία των δύο εδράνων, τις θέσεις και τις ταχύτητες του ρότορα μέσα στα έδρανα αυτά, μέσω του Simulink module του Matlab. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τον τελικό χρόνο που έχουμε επιλέξει για την προσομοίωση, όπου τότε αποθηκεύονται και τα αποτελέσματα, τα οποία θα δούμε στη συνέχεια.

Εικόνα 119. Διάγραμμα ροής της προσομοίωσης της δυναμικής ρότορα-εδράνων

Στις περιπτώσεις των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών ή ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων, κατά τη διάρκεια όπου το Matlab (Σύστημα ρότορα-εδράνων) λειτουργεί, υπάρχουν χαρακτηριστικά ελέγχου, τα οποία όμως δεν μεταβάλλονται σε σχέση με τα τελευταία που είχε το Simulink module του Matlab.

Αποτελέσματα

Τα διαγράμματα Campbell για τον ρότορα, για τις περιπτώσεις της υδροδυναμικής, της ενεργής ηλεκτρομαγνητικής και της ενεργής υδρομαγνητικής λειτουργίας, φαίνονται στην εικόνα 120.

Εικόνα 120. Διαγράμματα Campbell για τον ρότορα, α) υδροδυναμική, β) ενεργή ηλεκτρομαγνητική και γ) ενεργή υδρομαγνητική λειτουργία των εδράνων, τέσσερις πρώτες κρίσιμες ταχύτητες

Οι ιδιομορφές του ρότορα για την 1^η, 2^η και 3^η κρίσιμη ταχύτητα, όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υδροδυναμικά, ενεργά ηλεκτρομαγνητικά ή ενεργά υδρομαγνητικά, φαίνονται στην εικόνα 121.

Εικόνα 121. Ιδιομορφές του ρότορα για την 1^η, 2^η και 3^η κρίσιμη ταχύτητα για την α) υδροδυναμική, β) ενεργή ηλεκτρομαγνητική και γ) ενεργή υδρομαγνητική λειτουργία των εδράνων

Οι τέσσερις πρώτες κρίσιμες ταχύτητες του ρότορα κατά την υδροδυναμική λειτουργία των εδράνων, κατά την ενεργή ηλεκτρομαγνητική λειτουργία τους και κατά την ενεργή υδρομαγνητική λειτουργία τους φαίνονται στον πίνακα 3.

	Λειτουργία εδράνων		
	Υδροδυναμική	Ενεργή ηλεκτρομαγνητική	Ενεργή υδρομαγνητική
1 ^η κρίσιμη ταχύτητα	1349 rpm	$\cong 0$ rpm	1348 rpm
2 ^η κρίσιμη ταχύτητα	1374 rpm	$\cong 0$ rpm	1371 rpm
3 ^η κρίσιμη ταχύτητα	2721 rpm	2990 rpm	2722 rpm
4 ^η κρίσιμη ταχύτητα	2912 rpm	3303 rpm	2912 rpm

Πίνακας 3: Κρίσιμες ταχύτητες

Παρατηρούμε ότι οι κρίσιμες ταχύτητες του συστήματος ρότορα-εδράνων αλλάζουν ανάλογα με το είδος λειτουργίας των εδράνων. Αυτό συμβαίνει διότι αλλάζουν οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των εδράνων, οι οποίοι με τη σειρά τους επηρεάζουν τις τιμές των κρίσιμων ταχυτήτων των συστημάτων αυτών. Επίσης, παρατηρούμε ότι κατά την υδροδυναμική και ενεργή υδρομαγνητική λειτουργία των εδράνων, τα διαγράμματα Campbell, οι κρίσιμες ταχύτητες και οι ιδιομορφές είναι σχεδόν ίδια. Αυτό συμβαίνει διότι έχουμε επιλέξει το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα των υβριδικών εδράνων να λειτουργεί μόνο υποστηρικτικά κατά την υβριδική λειτουργία, και να μην παραλαμβάνει κάποιο ποσοστό του συνολικού φορτίου, με αποτέλεσμα η παρουσία του να μην αλλάζει πολύ τα διαγράμματα αυτά και τις συγκεκριμένες τιμές. Αυτό που πετυχαίνουμε είναι κυρίως να περιορίζουμε το εύρος των αποκρίσεων του ρότορα, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

Οι προσομοιώσεις έγιναν για 2721 rpm.

Τα αποτελέσματα σχετικά με την απόκριση του ρότορα, στη θέση όπου βρίσκεται το αριστερό έδρανο, παρουσιάζονται στις εικόνες 122 και 123.

Εικόνα 122. Απόκριση x του ρότορα στο σημείο του αριστερού εδράνου

Εικόνα 123. Απόκριση y του ρότορα στο σημείο του αριστερού εδράνου

Από την εικόνα 122, παρατηρούμε ότι το εύρος της απόκρισης x του ρότορα όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υδροδυναμικά είναι 0.16 mm, ενώ όταν λειτουργούν ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά είναι 0.079 mm, το οποίο είναι 49.37% της πρώτης περίπτωσης. Όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υβριδικά, τότε η απόκριση είναι 0.04879 mm, το οποίο είναι 30.49% της πρώτης περίπτωσης.

Από την εικόνα 123, παρατηρούμε ότι το εύρος της απόκρισης y του ρότορα όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υδροδυναμικά είναι 6.87 mm, ενώ όταν λειτουργούν

ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά είναι 0.0957 mm, το οποίο είναι 1.39% της πρώτης περίπτωσης. Όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υβριδικά, τότε η απόκριση είναι 0.0497 mm, το οποίο είναι 0.72% της πρώτης περίπτωσης.

Τα αποτελέσματα σχετικά με την απόκριση του ρότορα, στη θέση όπου βρίσκεται το δεξί έδρανο, παρουσιάζονται στις εικόνες 124 και 125.

Εικόνα 124. Απόκριση x του ρότορα στο σημείο του δεξιού εδράνου

Εικόνα 125. Απόκριση y του ρότορα στο σημείο του δεξιού εδράνου

Από την εικόνα 124, παρατηρούμε ότι το εύρος της απόκρισης x του ρότορα όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υδροδυναμικά είναι 0.249 mm, ενώ όταν λειτουργούν

ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά είναι 0.1009 mm, το οποίο είναι 40.52% της πρώτης περίπτωσης. Όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υβριδικά, τότε η απόκριση είναι 0.0611 mm, το οποίο είναι 24.54% της πρώτης περίπτωσης.

Από την εικόνα 125, παρατηρούμε ότι το εύρος της απόκρισης y του ρότορα όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υδροδυναμικά είναι 7.75 mm, ενώ όταν λειτουργούν ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά είναι 0.1244 mm, το οποίο είναι 1.6% της πρώτης περίπτωσης. Όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υβριδικά, τότε η απόκριση είναι 0.0608 mm, το οποίο είναι 0.78% της πρώτης περίπτωσης.

Η τροχιά του ρότορα στο σημείο του αριστερού εδράνου, για τις τρεις περιπτώσεις λειτουργίας των εδράνων, φαίνεται στην εικόνα 126.

Εικόνα 126. Τροχιά του ρότορα στο σημείο του αριστερού εδράνου

Η τροχιά του ρότορα στο σημείο του δεξιού εδράνου, για τις τρεις περιπτώσεις λειτουργίας των εδράνων, φαίνεται στην εικόνα 127.

Εικόνα 127. Τροχιά του ρότορα στο σημείο του δεξιού εδράνου

Τα ρεύματα ελέγχου των ηλεκτρομαγνητών του αριστερού εδράνου, για την περίπτωση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων και των υβριδικών εδράνων κατά την X και Y-διεύθυνση, φαίνονται στις εικόνες 128 και 129 αντίστοιχα.

Εικόνα 128. X-ρεύμα ελέγχου των πηνίων των εδράνων

Εικόνα 129. Y-ρεύμα ελέγχου των πηνίων των εδράνων

Τα ρεύματα ελέγχου των ηλεκτρομαγνητών του δεξιού εδράνου, για την περίπτωση των ενεργών ηλεκτρομαγνητικών εδράνων και των υβριδικών εδράνων κατά την X και Y-διεύθυνση, φαίνονται στις εικόνες 130 και 131 αντίστοιχα.

Εικόνα 130. X-ρεύμα ελέγχου των πηνίων των εδράνων

Εικόνα 131. Y-ρεύμα ελέγχου των πηνίων των εδράνων

Τα διαγράμματα σχετικά με τα ρεύματα ελέγχου των πηνίων δεν απεικονίζονται για χρόνο μεγαλύτερο από 0.4 δευτερόλεπτα, διότι έχουν ήδη σταθεροποιηθεί και από τα 0.4 δευτερόλεπτα έως τα 1.2 δευτερόλεπτα ακολουθούν την ίδια μορφή, όπως στο τέλος των διαγραμμάτων αυτών.

Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του συστήματος ρότορα-εδράνων, ανάλυση των εξισώσεων της κίνησης του ρότορα, διάγραμμα ροής της προσομοίωσης και προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος ρότορα-εδράνων στο Matlab και στο Simulink module του Matlab.

Τα αποτελέσματα που δίνει το Matlab όπως προγραμματίστηκε στη συγκεκριμένη εργασία, είναι η απόκριση του ρότορα για τις X και Y-διευθύνσεις στα σημεία των εδράνων, η τροχιά του ρότορα στα σημεία των εδράνων και τα ρεύματα ελέγχου για την X και Y-διεύθυνση. Αυτά τα αποτελέσματα το Matlab αποθηκεύει σε αρχεία στον υπολογιστή, σε μορφή εικόνων και σε αρχεία Excel, ώστε να μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε για την εξαγωγή διαγραμμάτων και συμπερασμάτων.

Παρατηρούμε ότι η τροχιά του ρότορα έχει μικρότερο εύρος κατά την ενεργή ηλεκτρομαγνητική λειτουργία σε σχέση με την υδροδυναμική λειτουργία των εδράνων και ακόμα μικρότερη κατά την υβριδική λειτουργία. Αυτό συμβαίνει διότι το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό τμήμα ελέγχει την απόκριση και κατά την ενεργή υδρομαγνητική λειτουργία, οι συντελεστές ελαστικότητας και απόσβεσης των δύο τμημάτων των εδράνων προστίθενται, με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση της σταθερότητας των συστημάτων ρότορα-εδράνων και κατ' επέκταση και της ασφάλειας των κατασκευών που τα περιλαμβάνουν.

Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα είναι ότι οι κρίσιμες ταχύτητες του συστήματος ρότορα-εδράνων είναι διαφορετικές κατά την περίπτωση που τα έδρανα λειτουργούν ως υδροδυναμικά, σε σχέση με την περίπτωση που λειτουργούν ως

ενεργά ηλεκτρομαγνητικά και σε σχέση με την περίπτωση που λειτουργούν ως ενεργά υδρομαγνητικά.

Επομένως, στην περίπτωση που ένα σύστημα ρότορα-εδράνων λειτουργεί με ενεργά υδρομαγνητικά έδρανα, υπάρχει η δυνατότητα να περάσουμε από τις κρίσιμες ταχύτητες που θα έχει το σύστημα όταν τα έδρανα λειτουργούν ως υδροδυναμικά, απενεργοποιώντας το σύστημα τροφοδοσίας λιπαντικού και ενεργοποιώντας τους ηλεκτρομαγνήτες στις συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής του ρότορα. Ομοίως, έχουμε τη δυνατότητα να απενεργοποιήσουμε τους ηλεκτρομαγνήτες και να ενεργοποιήσουμε το σύστημα τροφοδοσίας λιπαντικού των υβριδικών εδράνων, με σκοπό να περάσουμε από τις αντίστοιχες κρίσιμες ταχύτητες των συστημάτων ρότορα-εδράνων που θα είχαμε όταν τα έδρανα λειτουργούν ως ενεργά ηλεκτρομαγνητικά. Αντίστοιχα ισχύει και για την ενεργή υδρομαγνητική λειτουργία των εδράνων αυτών. Με αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα ρότορα-εδράνων δεν θα επηρεάζονται από τις μεγιστοποιήσεις των αποκρίσεων που παρατηρούνται κατά τις κρίσιμες ταχύτητες.

Ο σχεδιασμός του συστήματος ρότορα-εδράνων των ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων με προγραμματισμό στο πρόγραμμα Matlab αποτελεί πρωτοτυπία, καθώς δεν υπάρχει κάποιο έτοιμο module το οποίο να επιλύει σύστημα ρότορα-ενεργών υδρομαγνητικών εδράνων.

Κεφάλαιο 7

Πειραματική Διαδικασία και Επαλήθευση

Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης και η πειραματική διαδικασία για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του. Αρχικά, θα παρουσιαστεί ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός εικονικού μοντέλου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης και στη συνέχεια η κατασκευή του πραγματικού υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Όλος ο σχεδιασμός και η κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν προϋπήρχε υβριδικό έδρανο ολίσθησης το οποίο να συνδυάζει το υδροδυναμικό και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού, παρουσιάζεται και η συναρμολόγηση του υβριδικού εδράνου ολίσθησης στη μηχανή Bently Nevada RK4 καθώς και η πειραματική διαδικασία της επαλήθευσης της μοντελοποίησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του.

Σχεδιασμός-κατασκευή εικονικού μοντέλου

Σχεδιασμός εικονικού μοντέλου

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός εικονικού μοντέλου, του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Ο σκοπός του σχεδιασμού και της κατασκευής του εικονικού μοντέλου, είναι να βρεθούν και να διορθωθούν πιθανά σφάλματα στη γεωμετρία του τελικού υβριδικού εδράνου ολίσθησης, πιθανά σφάλματα που θα δυσκολεύουν τη συναρμολόγησή του και τη λειτουργία του, όταν θα κατασκευαστεί το τελικό προϊόν.

Τμήματα της κατασκευής του εικονικού μοντέλου

Το εικονικό μοντέλο σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί από λεπτό φύλλο αλουμινίου, πάχους 3 mm. Το λεπτό φύλλο αλουμινίου κόπηκε με Laser. Σχεδιάστηκε ο στάτης του εδράνου, ο εσωτερικός δακτύλιος και τα πηνία.

Οι διαστάσεις του εσωτερικού δακτυλίου φαίνονται στην εικόνα 132.

Οι διαστάσεις του στάτη, φαίνονται στην εικόνα 133.

Εικόνα 132. Διαστάσεις του εσωτερικού δακτυλίου του εικονικού μοντέλου, (CATIA)

Εικόνα 133. Διαστάσεις του στάτη του εικονικού μοντέλου, (CATIA)

Οι διαστάσεις των πηνίων φαίνονται στην εικόνα 134.

Εικόνα 134. Διαστάσεις των πηνίων του εικονικού μοντέλου, (CATIA)

Στην εικόνα 135, ο στάτης διακρίνεται με το κόκκινο χρώμα, ο εσωτερικός δακτύλιος με το μπλε χρώμα και τα πηνία με το πράσινο χρώμα.

Εικόνα 135. Τμήματα εικονικού μοντέλου υβριδικού εδράνου ολίσθησης, με χρωματικό διαχωρισμό, (CATIA)

Το εικονικό μοντέλο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης συναρμολογημένο στο πρόγραμμα CATIA, φαίνεται στις εικόνες 136, 137 και 138.

Εικόνα 136. Εικονικό μοντέλο υβριδικού εδράνου ολίσθησης, συναρμολογημένο, (CATIA)

Εικόνα 137. Εικονικό μοντέλο υβριδικού εδράνου ολίσθησης, συναρμολογημένο, πρόσοψη, (CATIA)

Εικόνα 138. Εικονικό μοντέλο υβριδικού εδράνου ολίσθησης, συναρμολογημένο, πλάγια όψη, (CATIA)

Κατασκευή εικονικού μοντέλου

Για την κατασκευή του εικονικού μοντέλου, τοποθετήθηκαν τα σχέδια του στάτη, του εσωτερικού δακτυλίου και των πηνίων σε κατάλληλη διάταξη ώστε η επιφάνεια που θα καλύπτουν να έχει κατάλληλες διαστάσεις και να προκύπτει το ελάχιστο πολλαπλάσιο των διαστάσεων 1m X 1m, διότι αυτές είναι οι τυποποιημένες διαστάσεις των φύλλων αλουμινίου, με σκοπό τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση υλικού.

Έχει επιλεγεί το μήκος του εδράνου να είναι 45 mm, επομένως χρειάζονται 15 κομμάτια πάχους 3 mm για τον στάτη και 15 κομμάτια πάχους 3 mm για τον εσωτερικό δακτύλιο.

Ο διαθέσιμος χώρος για τα πηνία έχει μήκος 17.138 mm, όπως φαίνεται στην εικόνα . Επομένως, ο μέγιστος αριθμός των πηνίων θα μπορεί να είναι 5 κομμάτια πάχους 3 mm.

Εικόνα 139. Διαθέσιμος χώρος για τα πηνία, στο εικονικό μοντέλο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, (CATIA)

Η τελική επιλογή ήταν 4 κομμάτια πάχους 3 mm, ώστε να μπορούν να συναρμολογηθούν τα πηνία, όπως φαίνεται στην εικόνα 140, διότι σε διαφορετική περίπτωση τα πηνία που θα είχαν ήδη τοποθετηθεί, θα εμπόδιζαν τα διπλανά τους.

Εικόνα 140. Τρόπος συναρμολόγησης των πηνίων, στο εικονικό μοντέλο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, (CATIA)

Το τελικό σχέδιο το οποίο περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα και τον απαραίτητο αριθμό των εξαρτημάτων αυτών, φαίνεται στην εικόνα 141.

Εικόνα 141. Σχέδιο για την κοπή των εξαρτημάτων του εικονικού μοντέλου, του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Οι μέγιστες διαστάσεις του σχεδίου είναι 897.38 mm X 927.84 mm. Επομένως, μπορεί να κατασκευαστεί το εικονικό μοντέλο με μόνο ένα φύλλο αλουμινίου διαστάσεων 1 m X 1 m.

Μετά την κοπή του παραπάνω σχεδίου με Laser, και τη συναρμολόγησή του, προέκυψε το εικονικό μοντέλο όπως φαίνεται στις εικόνες 142, 143, 144 και 145.

Εικόνα 142. Εικονικό μοντέλο υβριδικού εδράνου ολίσθησης, συναρμολογημένο

Εικόνα 143. Εικονικό μοντέλο υβριδικού εδράνου ολίσθησης, συναρμολογημένο, πρόσοψη

Εικόνα 144. Εικονικό μοντέλο υβριδικού εδράνου ολίσθησης, συναρμολογημένο, πλάγια όψη

Εικόνα 145. Εικονικό μοντέλο υβριδικού εδράνου ολίσθησης, συναρμολογημένο, με χρωματικό διαχωρισμό των τμημάτων του

Σχεδιασμός του πειράματος

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του πειράματος, με σκοπό την κατασκευή του.

Αρχικά, έγινε ο σχεδιασμός της μηχανής Bently Nevada RK4 στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA, ώστε να είναι δυνατός ο σχεδιασμός όλων των απαραίτητων εξαρτημάτων στη συνέχεια.

Ο σχεδιασμός της μηχανής Bently Nevada RK4 περιλαμβάνει το σχεδιασμό της βάσης σχήματος V, το σχεδιασμό των τριών τμημάτων στήριξης της βάσης σχήματος V (δύο στις άκρες και ένα στο κέντρο) και το σχεδιασμό του ηλεκτροκινητήρα.

Ο σχεδιασμός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης (εικόνα 146), περιλαμβάνει το σχεδιασμό της βάσης στήριξης του εδράνου (μπλε εξάρτημα), το σχεδιασμό του στάτη (κίτρινο εξάρτημα), του εσωτερικού δακτυλίου (χρυσό εξάρτημα), των πηνίων (κόκκινο εξάρτημα) και των εξαρτημάτων για τη στεγανοποίηση του εδράνου, τα οποία θα κατασκευαστούν από plexy glass (διαφανές εξαρτήματα).

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του ρότορα (γαλάζιο εξάρτημα).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της βάσης στήριξης των αισθητήρων (πράσινο εξάρτημα).

Εικόνα 146. Υβριδικό έδρανο ολίσθησης συναρμολογημένο στη μηχανή Bently Nevada RK4, (CATIA)

Σχεδιασμός της μηχανής Bently Nevada RK4, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της μηχανής Bently Nevada RK4. Η βάση σχήματος V, φαίνεται στην εικόνα 147.

Εικόνα 147. Βάση σχήματος V, της μηχανής Bently Nevada RK4, (CATIA)

Τα δύο τμήματα τα οποία τοποθετούνται στις άκρες, για τη στήριξη της βάσης σχήματος V της μηχανής Bently Nevada RK4, είναι ίδια μεταξύ τους και το σχήμα τους φαίνεται στην εικόνα 148.

Εικόνα 148. Εξάρτημα που τοποθετείται στην άκρη, για τη στήριξη της βάσης σχήματος V, της μηχανής Bently Nevada RK4, (CATIA)

Το κεντρικό τμήμα, για τη στήριξη της βάσης σχήματος V της μηχανής Bently Nevada RK4, αποτελείται από δύο εξαρτήματα, τα οποία τοποθετούνται στο μέσο και είναι ίδια μεταξύ τους. Το σχήμα τους φαίνεται στην εικόνα 149.

Εικόνα 149. Κεντρικά εξαρτήματα που τοποθετούνται στο μέσο, για τη στήριξη της βάσης σχήματος V, της μηχανής Bently Nevada RK4, (CATIA)

Τελικά, μετά τη συναρμολόγηση των παραπάνω εξαρτημάτων, προκύπτει η βάση της μηχανής Bently Nevada RK4, όπως φαίνεται στην εικόνα 150.

Εικόνα 150. Βάση μηχανής Bently Nevada RK4, (CATIA)

Σχεδιασμός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι τελικές διαστάσεις του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, έγιναν υπολογισμοί των δυνάμεων λόγω του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του υδροδυναμικού πεδίου μέσω του προγράμματος Ansys, σύμφωνα με τις μέγιστες επιτρεπτές διαστάσεις, λόγω των γεωμετρικών περιορισμών από τη μηχανή Bently Nevada RK4. Μετά την κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, έγινε έλεγχος και διαπιστώθηκε ότι όντως ισχύουν οι τιμές των δυνάμεων που ασκεί το έδρανο στον ρότορα, λόγω του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [34].

Τα κυριότερα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται το υβριδικό έδρανο ολίσθησης είναι η βάση στήριξης του εδράνου στη μηχανή Bently (εικόνες 151, 152, 153 και 154), ο στάτης (εικόνα 155) και ο εσωτερικός δακτύλιος (εικόνες 156 και 157).

Εικόνα 151. Βάση στήριξης του υβριδικού εδράνου ολίσθησης στη μηχανή Bently Nevada RK4, (CATIA)

Εικόνα 152. Βάση στήριξης του υβριδικού εδράνου ολίσθησης στη μηχανή Bently Nevada RK4, πρόσοψη, (CATIA)

Εικόνα 153. Βάση στήριξης του υβριδικού εδράνου ολίσθησης στη μηχανή Bently Nevada RK4, πίσω όψη, (CATIA)

Εικόνα 154. Βάση στήριξης του υβριδικού εδράνου ολίσθησης στη μηχανή Bently Nevada RK4, κάτω όψη, (CATIA)

Εικόνα 155. Στάτης του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, (CATIA)

Εικόνα 156. Εσωτερικός δακτύλιος του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, εξωτερική πλευρά, (CATIA)

Εικόνα 157. Εσωτερικός δακτύλιος του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, εσωτερική πλευρά, (CATIA)

Ο τρόπος συναρμολόγησης του εσωτερικού δακτυλίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης φαίνεται στην εικόνα 158. Συναρμολογείται με σφιχτή συναρμογή, στους πόλους του στάτη.

Εικόνα 158. Συναρμολόγηση του εσωτερικού δακτυλίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, (CATIA)

Σχεδιασμός του ρότορα, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA

Ο ρότορας όπως σχεδιάστηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA, φαίνεται στην εικόνα 159.

Εικόνα 159. Ρότορας του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Ο ρότορας είναι σχεδιασμένος από τρία διαφορετικά υλικά. Συγκεκριμένα, το κεντρικό του τμήμα είναι σχεδιασμένο από Inox 316, το τμήμα με τη μεγαλύτερη διάμετρο, στο οποίο «διαβάζουν» τη θέση του ρότορα οι αισθητήρες, είναι σχεδιασμένο από αλουμίνιο και το κυλινδρικό τμήμα δεξιά, το οποίο βρίσκεται εντός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, είναι σχεδιασμένο από μαλακό σίδηρο, Fe 540.

Σχεδιασμός της βάσης στήριξης των αισθητήρων, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA

Η βάση στήριξης των αισθητήρων φαίνεται στην εικόνα 160. Στη βάση της έχει μία ενιαία συρταρωτή τρύπα, ώστε να βιδώνεται στην κεντρική βάση της μηχανής Bently Nevada RK4. Στο κατακόρυφο τμήμα της, στο τμήμα που σχηματίζει 45° με το οριζόντιο επίπεδο και στο οριζόντιο τμήμα της, έχει από δύο συρταρωτές τρύπες, ώστε εκεί να προσαρμόζονται οι αισθητήρες.

Εικόνα 160. Βάση στήριξης των αισθητήρων του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Συναρμολόγηση της κατασκευής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA

Κάθε εξάρτημα της κατασκευής αποσυναρμολογημένο, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα CATIA, φαίνεται στις εικόνες 161, 162 και 163.

Εικόνα 161. Εξαρτήματα της κατασκευής, πλάγια όψη (CATIA)

Εικόνα 162. Εξαρτήματα της κατασκευής, κάτοψη (CATIA)

Εικόνα 163. Εξαρτήματα της κατασκευής, μεγέθυνση (CATIA)

Κατασκευή του πειράματος

Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε την κατασκευή του πειράματος. Συγκεκριμένα, θα αναφερθούμε στην κατασκευή των πιο κύριων εξαρτημάτων της κατασκευής, δηλαδή τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται το υβριδικό έδρανο ολίσθησης και ο ρότορας.

Κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Η κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης πραγματοποιήθηκε στο Μηχανουργείο Υποστήριξης Ερευνητικών Δραστηριοτήτων του Πανεπιστημίου Πατρών.

Οι εικόνες 164 και 165 δείχνουν την βάση του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, κατά τη διάρκεια της κατασκευής του.

Εικόνα 164. Κατασκευή της βάσης του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Εικόνα 165. Κατασκευή της βάσης του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Στις εικόνες 166, 167, 168, 169 και 170 φαίνονται τα εξαρτήματα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Εικόνα 166.Εξαρτήματα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Εικόνα 167.Εξαρτήματα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Εικόνα 168.Εξαρτήματα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Εικόνα 169.Εξαρτήματα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Εικόνα 170. Εξαρτήματα του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Το υβριδικό έδρανο ολίσθησης συναρμολογημένο μαζί με τις περιελίξεις, φαίνεται στις εικόνες 171 και 172.

Εικόνα 171. Υβριδικό έδρανο ολίσθησης συναρμολογημένο, εσωτερική πλευρά

Εικόνα 172. Υβριδικό έδρανο ολίσθησης συναρμολογημένο, εξωτερική πλευρά

Το υβριδικό έδρανο ολίσθησης με τα καπάκια plexy glass φαίνεται στην εικόνα 173.

Εικόνα 173. Υβριδικό έδρανο ολίσθησης συναρμολογημένο, με τα καπάκια plexy glass

Το υβριδικό έδρανο ολίσθησης συναρμολογημένο, μαζί με τα καπάκια και το εικονικό μοντέλο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, φαίνονται στην εικόνα 174.

Εικόνα 174. Υβριδικό έδρανο ολίσθησης συναρμολογημένο και εικονικό μοντέλο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Κατασκευή του ρότορα

Ο ρότορας, μετά την κατασκευή του με τόρνο, είχε ακρίβεια 10 μm , που σημαίνει ότι κατά την περιστροφή του είχε εύρος 20 μm .

Γι' αυτόν το λόγο, χρειάστηκε ρεκτιφιέ σε τρία σημεία του. Συγκεκριμένα χρειάστηκε ρεκτιφιέ στο αριστερό μέρος του, εκεί όπου πιάνει στο ρουλεμάν της μηχανής Bently Nevada RK4, στο σημείο όπου «διαβάζουν» οι αισθητήρες και στο δεξί μέρος του, αυτό δηλαδή που μπαίνει μέσα στο έδρανο.

Ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από τρία διαφορετικά υλικά. Συγκεκριμένα, το κεντρικό του τμήμα είναι κατασκευασμένο από Inox 316, το τμήμα με τη μεγαλύτερη διάμετρο, στο οποίο «διαβάζουν» τη θέση του ρότορα οι αισθητήρες, είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο και το κυλινδρικό τμήμα δεξιά, το οποίο βρίσκεται εντός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, είναι κατασκευασμένο από μαλακό σίδηρο, Fe 540.

Κατασκευή της βάσης στήριξης των αισθητήρων

Η βάση στήριξης των αισθητήρων έχει κατασκευαστεί από φύλλο αλουμινίου, σύμφωνα με το σχεδιασμό της.

Συναρμολόγηση της κατασκευής

Η μηχανή Bently Nevada RK4 μαζί με το υβριδικό έδρανο ολίσθησης, τον ρότορα και τους αισθητήρες, φαίνονται στην εικόνα 175.

Εικόνα 175. Υβριδικό έδρανο ολίσθησης, ρότορας και αισθητήρες συναρμολογημένα στη μηχανή Bently

Το υβριδικό έδρανο ολίσθησης, ο ρότορας και ο αισθητήρας της Υ-διεύθυνσης, φαίνονται στην εικόνα 176.

Εικόνα 176. Υβριδικό έδρανο ολίσθησης, ρότορας και αισθητήρας της Υ-διεύθυνσης

Ο ενισχυτής σήματος των αισθητήρων, από την εμπρός και πίσω όψη, φαίνεται στις εικόνες 177 και 178.

Εικόνα 177. Ενισχυτής σήματος αισθητήρων, πρόσοψη

Εικόνα 178. Ενισχυτής σήματος αισθητήρων, πίσω όψη

Το τροφοδοτικό που τροφοδοτεί τα πηνία, φαίνεται στην εικόνα 179.

Εικόνα 179. Τροφοδοτικό για την τροφοδοσία των πηνίων

Πειραματική διαδικασία

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε την πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε προκειμένου να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου και να συλλέξουμε τα απαραίτητα δεδομένα για το σχεδιασμό και την κατασκευή του ελεγκτή του συστήματος [34]. Ένα από τα αποτελέσματα είναι η επαλήθευση των τιμών των δυνάμεων που ασκεί το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον ρότορα. Αυτό μας δείχνει ότι το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων αντιπροσωπεύει σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα και είναι η αρχή για την κατασκευή του ελεγκτή και για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό αλλά και για το υβριδικό έδρανο ολίσθησης.

Συγκεκριμένες τιμές ρεύματος στα πηνία προκαλούν συγκεκριμένες ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις οι οποίες είναι ικανές να ανασηκώσουν και με τη βοήθεια κατάλληλου ελεγκτή να αιωρήσουν τον ρότορα.

Κάθε διαφορετική θέση του ρότορα εντός του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου και κάθε διαφορετική τιμή φορτίου που παραλαμβάνει ο ρότορας απαιτούν διαφορετική τιμή έντασης ρεύματος στους ηλεκτρομαγνήτες προκειμένου να αιωρείται ο ρότορας.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται και τα αποτελέσματα που έχουμε, μπορούν να οδηγήσουν στην κατασκευή του κατάλληλου αναλογικού ή ψηφιακού ελεγκτή και στην εύρεση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδράνου.

Δεδομένα μετρήσεων

Η κατασκευή φαίνεται στις εικόνες 175 και 176 και ο ρότορας στις εικόνες 48 και 52. Η μάζα του ρότορα είναι $m = 0.820 \text{ kg}$ και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που

ασκείται στον ρότορα από τον άνω ηλεκτρομαγνήτη του υβριδικού εδράνο ολίσθησης γ με μηδενικό σταθερό ρεύμα, δίνεται από την εξίσωση (246).

$$F_Y = \mu_0 N_w^2 A \left(\frac{I_Y}{g - y} \right)^2 \quad (246)$$

Το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό έδρανο έχει τα εξής δεδομένα: μαγνητική διαπερατότητα κενού: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$, 500 περιελίξεις ανά πόλο, η επιφάνεια τομής του κάθε ηλεκτρομαγνήτη από τους οκτώ είναι 191.81 mm^2 και το μαγνητικό διάκενο είναι $800 \text{ }\mu\text{m}$.

Επίδραση της θερμοκρασίας των αισθητήρων στα σήματά τους

Προκειμένου να ερευνήσουμε την επίδραση της θερμοκρασίας των αισθητήρων στις τιμές των σημάτων τους, αυξήσαμε τη θερμοκρασία τους με ένα thermogun, διατηρώντας το σημείο ισορροπίας του ρότορα σταθερό. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4, από όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για διαφορά θερμοκρασίας 40.9°C , η διαφορά στην έξοδο του αισθητήρα είναι 0.734 Volt .

Θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$)	Τάση εξόδου αισθητήρα (Volt)
19.1	-8.92
30	-9.183
39.15	-9.457
60	-9.654

Πίνακας 4: Τάση εξόδου αισθητήρα θέσης για διάφορες τιμές θερμοκρασίας του αισθητήρα

Εύρεση μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής έντασης ρεύματος

Προκειμένου να ευρεθεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της έντασης ρεύματος με την οποία επιτρέπεται να τροφοδοτούμε τα πηνία, παρείχαμε σταθερό, συνεχές ρεύμα στα πηνία του γ άνω ηλεκτρομαγνήτη και με αισθητήρες θερμοκρασίας παρατηρήσαμε τις τιμές των παρακάτω πέντε θερμοκρασιών:

1. γ άνω ηλεκτρομαγνήτη (μπλε χρώμα)
2. γ κάτω ηλεκτρομαγνήτη (κόκκινο χρώμα)
3. X αριστερά ηλεκτρομαγνήτη (πράσινο χρώμα)
4. X δεξιά ηλεκτρομαγνήτη (ροζ χρώμα)
5. Περιβάλλον (μαύρο χρώμα)

Εικόνα 180. Θερμοκρασία συναρτήσει του χρόνου

Ορίζουμε τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία για τα πηνία του κάθε ηλεκτρομαγνήτη να είναι 90°C . Θεωρώντας ότι η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι 40°C , η αύξηση θερμοκρασίας κατά 50°C του κάθε ηλεκτρομαγνήτη θα είναι το ανώτερο επιτρεπτό όριο.

Η αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των μετρήσεών μας ήταν 17°C .

Στον πίνακα 5 φαίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας σε σχέση με τις τιμές του ρεύματος με το οποίο τροφοδοτούμε τον Υ άνω ηλεκτρομαγνήτη, η οποία απεικονίζεται και στην εικόνα 180. Στον πίνακα 5, εκτός από τις μετρήσεις θερμοκρασίας, φαίνεται και η μέτρηση σχετικά με την αντίσταση του πηνίου του άνω ηλεκτρομαγνήτη.

Ρεύμα (mA)	Χρόνος έναρξης (sec)	Χρόνος λήξης (sec)	Παρατηρήσεις
100	0	400	Αρχή πειράματος. Αντίσταση 15.7Ω .
200	401	800	17.8°C στα 400sec με αντίσταση 16.05Ω .
300	801	1300	20.14°C στα 1220sec με αντίσταση 16.26Ω .
800	1301	1700	20.29°C στα 1300sec με αντίσταση 17.125Ω .
1000	1701	2400	35.5°C στα 1700sec.
1020	2401	2535	64.56°C στα 2535sec. Η τροφοδοσία ρεύματος διακόπηκε στα 2535sec για την προστασία του συστήματος από υπερθέρμανση.

1020	2716	2842	1.2A ρεύμα τροφοδοτεί το πηνίο προκειμένου να θερμανθεί το σύστημα και πάλι, με γρήγορο ρυθμό και να φτάσει γρηγορότερα στο σημείο ισορροπίας του για 1A.
1000	2843	4915	66.90°C στα 4915sec. Ισορροπία θερμοκρασίας έχουμε στους 70°C.

Πίνακας 5: Αύξηση θερμοκρασίας για διάφορες τιμές της έντασης ρεύματος τροφοδοσίας του Υ άνω ηλεκτρομαγνήτη

Στους 66.5°C, η αντίσταση του πηνίου του άνω ηλεκτρομαγνήτη είναι 22Ω.

Από τις παραπάνω μετρήσεις ορίζουμε ως τη μέγιστη τιμή ρεύματος για την τροφοδοσία των πηνίων, για συνεχή λειτουργία, το 1 Ampere.

Επίσης, εκτός από τις παραπάνω παρατηρήσεις, από την εικόνα 180 μπορούμε να εξάγουμε και άλλα συμπεράσματα, όπως για παράδειγμα τη σχέση και την αναλογία των θερμοκρασιών των πηνίων και των τεσσάρων ηλεκτρομαγνητών. Τέλος, στην περίπτωση όπου και οι τέσσερις ηλεκτρομαγνήτες θα τροφοδοτούνται με ρεύμα, οι θερμοκρασίες θα είναι υψηλότερες από αυτές που μετρήθηκαν, ακόμα και για τις ίδιες τιμές του ρεύματος του άνω ηλεκτρομαγνήτη, διότι θα υπάρχει και η επίδραση από την αύξηση θερμοκρασίας των άλλων τριών ηλεκτρομαγνητών.

Εύρεση μέγιστης ικανότητας παραλαβής φορτίου

Μετά από την εύρεση της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής έντασης ρεύματος με την οποία επιτρέπεται να τροφοδοτούνται τα πηνία των ηλεκτρομαγνητών (1 Ampere), θα προσδιορίσουμε το μέγιστο φορτίο το οποίο είναι σε θέση να συγκρατήσει το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης.

Εικόνα 181. Τρόπος και θέση εφαρμογής φορτίου στον ρότορα

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ικανότητα παραλαβής φορτίου του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, εφαρμόσαμε διάφορα πρότυπα φορτία (εικόνα 181, τμήμα Δ), στο μέσο του μήκους του ρότορα (εικόνα

181, σημείο B), με τη βοήθεια ενός μεταλλικού άξονα βάρους 365.44 gr (εικόνα 181, τμήμα E), χωρίς να περιστρέφεται ο ρότορας.

Στη συνέχεια, εφαρμόζαμε ρεύμα στο πηνίο του άνω ηλεκτρομαγνήτη ελεγχόμενα, με σκοπό να υπολογίζουμε σε ποιες τιμές ρεύματος ανυψώνεται ή κατεβαίνει ο ρότορας.

Το φορτίο το οποίο εφαρμόζεται στο σημείο του εδράνου (εικόνα 181, σημείο Γ), είναι ακριβός το μισό του φορτίου που ασκείται στον ρότορα στο σημείο B. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο εφαρμόζεται ακριβός στο μέσο του μήκους του ρότορα και ο ρότορας έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται γύρω από και τους τρεις άξονες στο σημείο A της εικόνας 181.

Οι πέντε πρώτες στήλες του πίνακα 6 αναφέρονται στο φορτίο που εφαρμόζουμε στον ρότορα στο σημείο B, τη δύναμη την οποία πρέπει να ασκήσει ο Υ άνω ηλεκτρομαγνήτης του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου, ο οποίος βρίσκεται στο σημείο Γ της εικόνας 181, τη θέση του ρότορα και τα ρεύματα που απαιτούνται για την ανύψωση του ρότορα από το κατώτερο σημείο (-120 μm) καθώς επίσης και για την έναρξη της καθόδου του ρότορα από το ανώτερο σημείο (+120 μm) από τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η τελευταία στήλη αναφέρεται στην απόκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Στον πίνακα 6, με τον όρο «ΦΡ» εννοούμε το «Φορτίο Ρότορα» το οποίο υπάρχει λόγω του βάρους του ρότορα, εφαρμόζεται στο σημείο Γ της εικόνας 181 και είναι 0.820 kg.

Σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις - επιβεβαίωση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων το οποίο περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, αρχικά εισαγάγαμε όλα τα απαραίτητα δεδομένα του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού εδράνου στον κώδικα που το επιλύει στο Ansys, σύμφωνα με αυτά του πειράματος και βρήκαμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στην εικόνα 182 απεικονίζονται οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές του υβριδικού εδράνου ολίσθησης και στην εικόνα 183 απεικονίζεται η φορά τους, από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Εικόνα 182. Μαγνητικές δυναμικές γραμμές υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Εικόνα 183. Φορά μαγνητικών δυναμικών γραμμών υβριδικού εδράνου ολίσθησης

Στη συνέχεια διεξήχθησαν πειράματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με την ένταση ρεύματος που απαιτείται για να ανυψώσει ή να επιτρέψει την κάθοδο του ρότορα στον οποίο εφαρμόζεται φορτίο κατά την Υ-διεύθυνση, φαίνονται στον πίνακα 6.

Φορτίο στο σημείο Β της εικόνας 181 (kg)	Φορτίο στο σημείο Γ της εικόνας 181 (kg)	Θέση y του ρότορα (μm)	Ένταση ρεύματος Υ άνω ηλεκτρομαγνήτη – πειραματικά αποτελέσματα (mA)	Ένταση ρεύματος Υ άνω ηλεκτρομαγνήτη – αποτελέσματα προσομοίωσης Ansys (mA)	Απόκλιση (%)
Χωρίς φορτίο	ΦΡ	-120	330	332.62	0.79
		+120	240	254.44	5.68
7.36544	ΦΡ + 3.6827	-120	750	779.13	3.74
		+120	580	595.55	2.61
10.36544	ΦΡ + 5.1827	-120	860	899.62	4.4
		+120	670	687.6	2.56
14.36544	ΦΡ + 7.1827	-120	1020	1038.82	1.81
		+120	800	794.12	0.74

Πίνακας 6: Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης έντασης ρεύματος Υ άνω ηλεκτρομαγνήτη

Από τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στον πίνακα 6 παρατηρούμε ότι πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αυτό δηλώνει ότι η πειραματική μέθοδος και η μέθοδος της προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε είναι έγκυρες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους απαραίτητους υπολογισμούς του συστήματος ελέγχου.

Εύρεση χαρακτηριστικών αδράνειας συστήματος

Προκειμένου να ευρεθούν τα χαρακτηριστικά αδράνειας του συστήματος, ενεργοποιούμε ή απενεργοποιούμε την τροφοδοσία ρεύματος του άνω ηλεκτρομαγνήτη και ανυψώνεται ή ελευθερώνεται και κατεβαίνει ο ρότορας. Κατά τη διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας, καταγράφουμε την τάση εξόδου του αισθητήρα της Υ-διεύθυνσης. Η διάταξη του πειράματος για την καταγραφή των ενδείξεων του αισθητήρα της Υ-διεύθυνσης απεικονίζεται στην εικόνα 184.

Εικόνα 184. Διάταξη πειράματος για την καταγραφή των ενδείξεων του αισθητήρα της Υ-διεύθυνσης

Τα αποτελέσματα του πειράματος απεικονίζονται στις εικόνες 185, 186, 187 και 188.

Εικόνα 185. Ανύψωση ρότορα χωρίς εξωτερικό φορτίο. Τάση Υ-αισθητήρα συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 186. Κάθοδος ρότορα χωρίς εξωτερικό φορτίο. Τάση Υ-αισθητήρα συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 187. Ανύψωση ρότορα με 7 kg εξωτερικό φορτίο. Τάση Υ-αισθητήρα συναρτήσει του χρόνου

Εικόνα 188. Κάθοδος ρότορα με 7 kg εξωτερικό φορτίο. Τάση Υ-αισθητήρα συναρτήσει του χρόνου

Οι παραπάνω εικόνες 185, 186, 187 και 188, είναι στιγμιότυπα από τον παλμογράφο. Ο Χ-άξονας των διαγραμμάτων αυτών των εικόνων αντιστοιχεί στον χρόνο και έχει οριστεί σε 10 ms ανά τμήμα και ο Υ-άξονας αντιστοιχεί στην τάση των αισθητήρων και έχει οριστεί στα 500 mV ανά τμήμα. Η σχέση μεταξύ απόστασης και τάσης εξόδου του αισθητήρα είναι 14 mV / μm . Αυτό σημαίνει ότι για τα διαγράμματα των παραπάνω εικόνων για τον Υ-άξονα ισχύει $500 \text{ mV} / 14 \text{ mV} = 35.7 \mu\text{m}$ ανά τμήμα.

Αρχιτεκτονική συστήματος ελέγχου

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των προηγούμενων παραγράφων, μπορούμε να σχεδιάσουμε το σύστημα ελέγχου του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου. Το σύστημα ελέγχου, εκτός από τους αισθητήρες και τον ενισχυτή σήματός τους, θα περιλαμβάνει μία γέφυρα για την τροφοδοσία των πηνίων των ηλεκτρομαγνητών, η οποία θα «οδηγεί» τα πηνία, τον ελεγκτή αυτής της γέφυρας, ο οποίος θα είναι ελεγκτής ρεύματος (current control) και τον ελεγκτή του συνολικού συστήματος, ο οποίος θα μπορεί να είναι για παράδειγμα PID ελεγκτής.

Μία πρώτη προσέγγιση της γέφυρας της τροφοδοσίας των πηνίων των ηλεκτρομαγνητών απεικονίζεται στην εικόνα 189. Αυτή η γέφυρα τροφοδοτεί τα πηνία ενός μόνο ηλεκτρομαγνήτη από τους τέσσερις που περιλαμβάνει το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο. Επομένως, συνολικά θα χρειαστούν τέσσερις γέφυρες.

Εικόνα 189. Αρχιτεκτονική γέφυρας τροφοδοσίας των πηνίων του κάθε ηλεκτρομαγνήτη και ελεγκτής της γέφυρας

Στο κάτω μέρος της εικόνας 189, απεικονίζεται το σύστημα ελέγχου της γέφυρας τροφοδοσίας των πηνίων του ηλεκτρομαγνήτη, αναλογικό ή ψηφιακό. Τα σήματα εισόδου του ελεγκτή είναι αναλογικοί είσοδοι μετά από low pass φίλτρα (LPF), πριν ή μετά από αναλογικούς-σε-ψηφιακούς μετατροπείς (A/D). Οι έξοδοι είναι αναλογικοί και ψηφιακοί. Οι αναλογικοί μετατρέπονται σε ψηφιακούς με ψηφιακούς-σε-αναλογικούς μετατροπείς (D/A) και οι ψηφιακοί είναι σήματα παλμών ρυθμιζόμενου πλάτους και εύρους (PWM, Pulse Width Modulation), τα οποία «οδηγούν» ενισχυτές σήματος όπως είναι για παράδειγμα τα MOSFET.

Ένας κεντρικός ελεγκτής θα ρυθμίζει τις απαραίτητες τιμές εξόδου που θα πρέπει να δίνει ο ελεγκτής της γέφυρας τροφοδοσίας των πηνίων του κάθε ηλεκτρομαγνήτη. Ο ελεγκτής της γέφυρας τροφοδοσίας των πηνίων του κάθε ηλεκτρομαγνήτη θα διατηρεί αυτές τις τιμές σταθερές, παρ' όλη τη μεταβολή της αντίστασης των πηνίων η οποία παρατηρείται λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας τους.

Η δύναμη που ασκεί κάθε ηλεκτρομαγνήτης είναι συνάρτηση της έντασης του ρεύματος με την οποία τροφοδοτούνται τα πηνία του και της θέσης στην οποία βρίσκεται ο ρότορας (εξίσωση (46)).

Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του εικονικού και του πραγματικού ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου. Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι είναι δυνατή η κατασκευή όλων των τμημάτων από τα οποία αποτελείται το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο με τον τρόπο που τα σχεδιάσαμε και η προσαρμογή τους στη μηχανή Bently Nevada RK4.

Επίσης, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος που απεικονίζονται στον πίνακα 6, παρατηρούμε ότι υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ τους και αυτό δηλώνει ότι η πειραματική μέθοδος και η μέθοδος της προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε είναι έγκυρες. Πραγματοποιήθηκε η εύρεση της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής έντασης ρεύματος για την τροφοδοσία των πηνίων καθώς επίσης και η μέγιστη ικανότητα παραλαβής φορτίου για το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου.

Τέλος, από τα χαρακτηριστικά αδράνειας του συστήματος, θα έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε την απαίτηση του συστήματος σχετικά με τη συχνότητα δειγματοληψίας που αφορά τη θέση του ρότορα.

Όλος ο σχεδιασμός και η κατασκευή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης αποτελεί καινοτομία, καθώς δεν προϋπήρχε υβριδικό έδρανο ολίσθησης το οποίο να συνδυάζει το υδροδυναμικό και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, παρατηρούμε ότι πραγματοποιήθηκε με επιτυχία ο σχεδιασμός, η ανάλυση και η κατασκευή ενός καινοτόμου υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Από τα αποτελέσματα και τις προσομοιώσεις παρατηρούμε ότι το νέο αυτό έδρανο είναι λειτουργικό, έχει βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με άλλα έδρανα και μπορεί να εφαρμοστεί σε κατασκευές και μηχανές που περιλαμβάνουν περιστρεφόμενους ρότορες.

Στο τέλος του κάθε κεφάλαιου γίνεται μία αναφορά στα επιμέρους συμπεράσματα που αφορούν κάθε ενότητα ξεχωριστά, με αποτέλεσμα να γίνεται σταδιακά μία παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων του νέου ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου.

Η τρέχουσα εργασία είναι μία συνέχεια προηγούμενων εργασιών σχετικά με υδροδυναμικά και ενεργά ηλεκτρομαγνητικά έδρανα, η οποία όμως περιλαμβάνει αρκετά καινοτόμα θέματα, όπως για παράδειγμα ο σχεδιασμός και η κατασκευή του νέου εδράνου, ως ιδέα γενικά, ως προς τη γεωμετρία του και ως προς τον έλεγχο του ρότορα που περιλαμβάνει.

Ο εσωτερικός δακτύλιος του υβριδικού εδράνου ολίσθησης είναι το σημαντικότερο καινοτόμο εξάρτημά του και ο υπολογισμός των διαστάσεων του είναι πολύ σημαντικός, διότι με τη βοήθεια του εσωτερικού δακτυλίου μπορούν να λειτουργούν και το υδροδυναμικό και το ενεργό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, είτε ξεχωριστά είτε ταυτόχρονα.

Επίσης, η προσομοίωση του ελέγχου του υβριδικού εδράνου ολίσθησης με PID ελεγκτή, του οποίου τα κέρδη προκύπτουν από τις γραμμικές εξισώσεις, χρησιμοποιώντας όμως κατά την προσομοίωση τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης του ρότορα, αποτελεί και αυτό πολύ σημαντικό βήμα, διότι με αυτόν τον τρόπο έχουμε τη δυνατότητα να προσομοιώνουμε την πραγματική κίνηση του ρότορα εντός του ενεργού υδρομαγνητικού εδράνου.

Το συγκεκριμένο υβριδικό έδρανο ολίσθησης είναι πρωτότυπο, με αποτέλεσμα να υπάρχει ευρύ φάσμα για βελτιώσεις στο μέλλον. Κάποιες από αυτές τις ιδέες για βελτιώσεις είναι οι εξής:

- Η εύρεση ενός αδιάστατου αριθμού, ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών του υδροδυναμικού πεδίου και του ενεργού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, με τη βοήθεια του οποίου θα περιγράφονται τα διάφορα μεγέθη που αφορούν τη λειτουργία του υβριδικού εδράνου ολίσθησης. Κάτι αντίστοιχο με τον αδιάστατο αριθμό Sommerfeld που αφορά τα υδροδυναμικά έδρανα ολίσθησης.
- Μία άλλη πρόταση για το μέλλον είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός γραμμικού ή μη-γραμμικού ελεγκτή του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, πιθανόν καινοτόμου, με σκοπό τη διεξαγωγή πειραμάτων ώστε να επαληθευτούν και πειραματικά τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας και να αποδειχτεί και έμπρακτα ότι το υβριδικό αυτό έδρανο είναι χρήσιμο και η εφαρμογή του στις κατασκευές, απαραίτητη. Η κατασκευή του ελεγκτή βρίσκεται στη διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης.
- Επίσης, για το μέλλον θα ήταν χρήσιμη η έρευνα σχετικά με τον έλεγχο της

συμπεριφοράς του ρότορα εντός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, στην περίπτωση που ο εσωτερικός δακτύλιος έχει υποστεί φθορά και επηρεάζεται η λειτουργία του υδροδυναμικού πεδίου του.

- Μία άλλη πρόταση για το μέλλον είναι ο σχεδιασμός του υβριδικού εδράνου ολίσθησης με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί και ως ακτινικό και ως αξονικό, σε κοινό κέλυφος, ώστε να είναι πιο ολοκληρωμένη η στήριξη που παρέχει στους ρότορες, σε ένα μόνο ενιαίο μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξάρτημα.
- Επίσης, μία πρόταση για το μέλλον είναι οι αισθητήρες που «διαβάζουν» τη θέση του ρότορα κάθε στιγμή, να είναι στερεωμένοι πάνω στο ίδιο το υβριδικό έδρανο ολίσθησης και όχι σε άλλο σημείο της κατασκευής ή να λειτουργούν τα ίδια τα πηνία και ως αισθητήρες, διότι με αυτόν τον τρόπο θα αποφεύγονται τυχόν λανθασμένες ενδείξεις των αισθητήρων και ως προς την ακριβή θέση του ρότορα και ως προς τη χρονική στιγμή που συμβαίνει η κάθε μετακίνησή του, ειδικά στην περίπτωση που κάποιο εξωτερικό φορτίο τον παραμορφώνει.
- Επίσης, άλλη πρόταση για το μέλλον είναι η βελτιστοποίηση του αριθμού των ηλεκτρομαγνητών και γενικότερα των διαστάσεων του υβριδικού εδράνου ολίσθησης, ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία επιθυμούμαι να εφαρμοστεί το ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο.
- Τέλος, μία άλλη πρόταση είναι το υβριδικό έδρανο ολίσθησης να μην είναι μόνο δύο λειτουργιών, αλλά περισσότερων, ώστε να εκμεταλλευόμαστε και τα πλεονεκτήματα άλλων πεδίων και άλλων ειδών εδράνων, όπως είναι για παράδειγμα τα έδρανα που στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής λειτουργούν ανυψώνοντας τον ρότορα με την εισαγωγή αέρα και έτσι δεν είναι απαραίτητη η κατανάλωση ισχύος από τα έδρανα.

1. Dufrane K.F., Kannel J.W. και McCloskey T.H., *Wear of steam turbine journal bearings at low operating speeds*. Journal of lubrication technology, 1983. **105**(3): σελ. 313-317.
2. Papanikolaou G. Michael, Farmakopoulos G. Michael και Papadopoulos A. Chris. *Study of the alternation of the dynamic coefficients of short journal bearings due to wear*. στο 3rd International Conference of Engineering Against Failure (ICEAF III). 2013. Kos, Greece.
3. Papanikolaou G. Michael, Farmakopoulos G. Michael και Papadopoulos A. Chris, *Alternation of the dynamic coefficients of short journal bearings due to wear*. Έχει γίνει αποδεκτό από το περιοδικό: International Journal of Structural Integrity.
4. Kumar A. και Mishra S. S., *Stability of rigid rotor in turbulent hydrodynamic worn journal bearings*. Wear, 1996. **193**: σελ. 25-30.
5. Mokhtar M., Howarth R. και Davies P., *Wear characteristics of plain hydrodynamic journal bearings during repated starting and stopping*. ASLE Trans, 1977. **20**: σελ. 191-194.
6. Awasthi R. K., Sharma S. C. και Jain S. C., *Performance of worn non-recessed hole-entry hybrid journal bearings*. Tribology International, 2007. **40**: σελ. 717-734.
7. Hashimoto H., Wada S. και Nojima K., *Performance characteristics of worn journal bearings in both laminar and turbulent regimes*. Part II: Dynamic Characteristics, ASLE transactions, 1986. **29**(4): σελ. 572-577.
8. Chasalevris A. C., Nikolakopoulos P. G. και Papadopoulos C. A., *Dynamic effect of bearing wear on rotor-bearing system response*. Journal of Vibration and Acoustics, 2013. **135**(1): σελ. 1-12.
9. Gertzos K. P., Nikolakopoulos P. G., Chasalevris A. C. και Papadopoulos C. A., *Wear identification in rotor-bearing systems by measurements of dynamic bearing characteristics*. Computers and Structures, 2011. **89**(1-2): σελ. 55-66.
10. Rozeanu L. και Kennedy F. E., *Wear of hydrodynamic journal bearings*. Tribology Series, 2001. **39**: σελ. 161-166.
11. Ronen A. και Malkin S., *Wear mechanisms of statically loaded hydrodynamic bearings by contaminant abrasive particles*. Wear, 1981. **68**(3): σελ. 371-389.
12. Li Y., Zhu L., Wang J., Gui H., Yan D. και Huang Q., *Study on the wear properties of hydrodynamic oil film bearing by finite element method*. Applied Mechanics and Materials, 2010. **37-38**: σελ. 1356-1359.
13. Bouyer J., Fillon M. και Pierre-Danos I., *Influence of wear on the behavior of a two-lobe hydrodynamic journal bearing subjected to numerous startups and stops*. Journal of Tribology, 2007. **129**(1): σελ. 205-208.
14. Nikolakopoulos P. και Papadopoulos C. A., *A study of friction in worn misaligned journal bearings under severe hydrodynamic lubrication*. Tribology International, 2008. **41**: σελ. 461-472.
15. Bompos A. Dimitrios, Farmakopoulos G. Michael, Nikolakopoulos G. Pantelis και Papadopoulos A. Chris. *Model of journal bearing system with out of roundness defect*. στο 10th EDF/Pprime Workshop: Futuroscope, "Condition Monitoring, Performance Improvement and Safe Operation of Bearings". 2011. Futuroscope, France.
16. Kim K. και Kim K., *Analytical study on the rotational accuracy of externally pressurized air journal bearing*. JSME International Journal, Series 3: Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry, 1992. **35**(3): σελ. 485-492.
17. Liu J., Sun Y., Lu L. και Liang Y., *Manufacturing errors effects on disturbing torque of aerostatic bearings*. Applied Mechanics and Materials, 2009. **16-19**: σελ. 505-509.
18. Ren D., Wang Z., Yang Q. και Bao G., *Effect of manufacturing errors on static characteristics of externally pressurized spherical air bearings*. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2009. **22**(6): σελ. 896-902.

19. Abramovitz S., *Theory for a slider bearing with a convex pad surface; side flow neglected*. Journal of the Franklin Institute, 1955. **259**(3): σελ. 221-233.
20. Puri V., Patel C. M. και Bhat M. V., *The analysis of a pivoted porous slider bearing with a convex pad surface*. Wear, 1983. **88**(2): σελ. 127-131.
21. Ramanaiah G. και Sundarammal A., *Effect of bearing deformation on the characteristics of a slider bearing*. Wear, 1982. **78**(3): σελ. 273-278.
22. Zhou H., Zhao S., Xu H. και Zhu J., *An experimental study on oil-film dynamic coefficients*. Tribol. Int., 2004. **37**: σελ. 245-253.
23. Hattori H., *Dynamic analysis of a rotor-journal bearing system with large dynamic loads (stiffness and damping coefficient variations in bearing oil films)*. JSME International Journal, Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing, 1993. **36**: σελ. 251-257.
24. Goodwin M. J., Ogrodnik P. J., Roach M. P. και Fang Y., *Calculation and measurement of the stiffness and damping coefficients for a low impedance hydrodynamic bearing*. Journal of Tribology, 1997. **119**: σελ. 57-63.
25. Zhang M., Xu Z., Qi X. και Yu L., *Identification investigation of oil-film dynamic coefficients of large-size journal bearings*. Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010. **44**: σελ. 75-78.
26. San Andrés L. και de Santiago O., *Identification of journal bearing force coefficients under high dynamic loading centered static operation*. Tribol. Trans., 2005. **48**: σελ. 9-17.
27. Rao TVVLN., Biswas S. και Athre K., *A methodology for dynamic coefficients and nonlinear response of multi-lobe journal bearings*. Tribol. Trans., 2001. **44**: σελ. 111-117.
28. Papadopoulos C. A., Nikolakopoulos P. G. και Gounaris G. D., *Identification of clearances and stability analysis for a rotor-journal bearing system*. Mechanism and Machine Theory, 2008. **43**(4): σελ. 411-426.
29. Campos J., Crawford M. και Longoria R., *Rotordynamic modeling using bond graphs: modeling the Jeffcott rotor*. IEEE Transactions on Magnetics, 2005. **41**(1 II): σελ. 274-280.
30. Pedersen E., *Rotordynamics and bond graphs: basic models*. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 2009. **15**(4): σελ. 337-352.
31. Štimac G., Braut S., Bulic N. και Žigulic R., *Modeling and experimental verification of a flexible rotor / AMB system*. COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2013. **32**(4): σελ. 1244-1254.
32. Antila M., *Electromechanical properties of radial active magnetic bearings*, στο *Acta Polytechnica Scandinavica*. 1998, Helsinki University of Technology, Electrical Engineering Series: Espoo, Finland.
33. Zimon J., Tomczuk B. και Wajnert D., *Field-circuit modeling of AMB system for various speeds of the rotor*. Journal of Vibroengineering, 2012. **14**(1): σελ. 165-170.
34. Farmakopoulos G. Michael, Loghis K. Eleutherios, Nikolakopoulos G. Pantelis, Xiros I. Nikolaos και Papadopoulos A. Chris. *Modeling and control of the electrical actuation system of an active hydromagnetic journal bearing (AHJB)* στο *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. 2014. Montreal, Canada.
35. Schweitzer G., Bleurer H. και Traxler A., *Active magnetic bearings*. 1994, Hochschulverlag AG. ETH Zurich.
36. Knopf E. και Nordmann R. *Active magnetic bearings for the accurate force measurement in rotating machinery*. στο *The Fourth International Conference on Motion and Vibration Control*. ETH Zurich.
37. Xu L., Zhang J. και Yu T., *Design and implementation of magnetic bearing based on Hoo theory*. China Mechanical Engineering, 2006. **17**(10): σελ. 1060-1064.

38. Chen K., Tung P., Tsai M. και Fan Y., *A self-tuning fuzzy PID-type controller design for unbalance compensation in an active magnetic bearing*. Expert Systems with Applications, 2009. **36**: σελ. 8560–8570.
39. Yang Y Wang H, Guo L and Fan M *Control parameter tuning of magnetic bearing PID controller based on expansion coefficient critical proportion*. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech publications, Switzerland, 2012. **150**: σελ. 24–29.
40. Grega W. και Pilat A., *Comparison of linear control methods for an AMB system*. Int. J. Appl. Math. Comput.Sci., 2005. **15**(2): σελ. 245–255.
41. Kuseyri S., *Robust control and unbalance compensation of rotor/active magnetic bearing systems*. Journal of Vibration and Control, 2011. **18**(6): σελ. 817–832.
42. Farmakopoulos G. Michael, Thanou D. Michalis, Nikolakopoulos G. Pantelis, Papadopoulos A. Chris και Tzes P. Anthony. *A control model of active magnetic bearings*. στο *3rd International Conference of Engineering Against Failure (ICEAF III)*. 2013. Kos, Greece.
43. Jiang ZF., Wu HC., Lu H. και Li CR., *Study on the controllability for active magnetic bearings*. Journal of Physics: Conference Series, 2005. **13**: σελ. 406–409.
44. Kjølhed K. και Santos IF., *Experimental contribution to high-precision characterization of magnetic forces in active magnetic bearings*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007. **129**: σελ. 503–510.
45. Wan J., Wang X., Li W., Tian F., Qian J. και Jia D., *Modal analysis of turbo expander rotor supported by active magnetic bearings*. Journal of Mechanical Engineering, 2010. **46**: σελ. 86–91.
46. Wang X., *Analysis on stiffness and damping performances of an active magnetic bearing system*. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1997. **14**: σελ. 95–100.
47. Lei S. και Palazzolo A., *Control of flexible rotor systems with active magnetic bearings*. Journal of sound and vibration, 2008. **314**(1–2): σελ. 19–38.
48. Zhong Z. και Zhu C., *Effects of active magnetic bearing controller on fault characteristics of Jeffcott cracked rotor*. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2012. **32**(5): σελ. 105–110.
49. Tong W. και Jiancheng F., *A feedback linearization control for the nonlinear 5-DOF flywheel suspended by the permanent magnet biased hybrid magnetic bearing*. Acta Astronautica, 2012. **79**: σελ. 131–139.
50. Dziedzic K. και Kurnik W. *Resonant vibrations in active magneto-hydrodynamic journal bearing subjected to kinematic excitation*. στο *Proceedings of the Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies*. 2004.
51. Hirani H. και Samanta P., *Hybrid (hydrodynamic + permanent magnetic) journal bearings*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part J., 2007. **221**: σελ. 881–891.
52. Wu G., Zhang Y. και Liu K., *Variable structure control and simulation of two-axial hybrid magnetic bearing*. Journal of System Simulation. **18**: σελ. 251–253.
53. Mei L., Deng Z., Zhao X. και Wang X., *New configuration hybrid radial magnetic bearing*. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009. **24**: σελ. 13–18.
54. Li Y., Li W. και Lu Y., *Computer-aided simulation analysis of a novel structure hybrid magnetic bearing*. IEEE Trans. Magn., 2008. **44**: σελ. 2283–2287.
55. Jiancheng F., Jinji S., Yanliang X. και Xi W., *A new structure for permanent-magnet-biased axial hybrid magnetic bearings*. IEEE Trans. Magn., 2009. **45**: σελ. 5319–5325.
56. Bornstein K. R., *Dynamic load capabilities of active electromagnetic bearings*. Journal of Tribology, 1991. **113** (No. 3): σελ. 598–603.
57. Ren S., Bian C. και Liu J., *Finite element analysis on the electromagnetic fields of active magnetic bearing*. Journal of Physics: Conference Series, 2008. **96**(1).
58. Lim M., Zhang D. και Yang J., *Design and parameter estimation of hybrid magnetic bearings for blood pump applications*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009. **23** (No. 7): σελ. 2352–2382.

59. Arkkio A., Antila M. και Pokki K., *Electromagnetic force on a whirling cage rotor*. IEE Proc. Electr. Power Appl., 2000. **147** (No. 5): σελ. 353-360.
60. Tsai N., Chiang C. και Li H., *Innovative active magnetic bearing design to reduce cost and energy consumption*. Electromagnetics, 2009. **29** (No. 5): σελ. 406-420.
61. Nagi F. H., Inayat-Hussain J. I. και Ahmed S. K., *Fuzzy bang-bang relay control of a single-axis active magnetic bearing system*. Simulation Modeling Practice and Theory, 2009. **17** (No. 10): σελ. 1734-1747.
62. Farmakopoulos G. Michael, Nikolakopoulos G. Pantelis και Papadopoulos A. Chris. *Design of an active hydromagnetic journal bearing*. στο *Proceedings of the 8th IFToMM International Conference on Rotordynamics*. 2010. Seoul, Korea.
63. Farmakopoulos G. Michael, Nikolakopoulos G. Pantelis και Papadopoulos A. Chris. *The role of hydromagnetic bearings in the structural health of rotating machinery*. στο *2nd International Conference of Engineering Against Fracture (ICEAF II)*. 2011. Mykonos, Greece.
64. Samanta P. και Hirani H., *An overview of passive magnetic bearings*. 2008 Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference, IJTC, 2009: σελ. 465-467.
65. Bassani R., *Levitation of passive magnetic bearings and systems*. Tribol. Int., 2006. **39**: σελ. 963-970.
66. Πατέντα. *Hybrid journal bearing*. Ιστοσελίδα: <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2012032362>.
67. Farmakopoulos G. Michael, Nikolakopoulos G. Pantelis και Papadopoulos A. Chris, *Design of an active hydromagnetic journal bearing*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology, 2013. **227**(7): σελ. 673-694.
68. Zhang P., Wang L. και Sun T. *Design and simulation of HMB control system based on parameter self-tuning fuzzy PID*. στο *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing, ICICIP 2011 (Part 2)*. 2011.
69. Farmakopoulos G. Michael, Thanou D. Michalis, Nikolakopoulos G. Pantelis, Papadopoulos A. Chris και Tzes P. Anthony, *Linearized PID control in a non-linear model of an active hydromagnetic journal bearing*. (Έχει γίνει αποδεκτό από το περιοδικό IMechE: Journal of Mechanical Engineering Science).
70. El-Shafei A. και Dimitri AS., *Controlling journal bearing instability using active magnetic bearings*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010. **132**: σελ. 1-9.
71. Allaire E., Dimond W. και Lin Z., *Rotordynamic analysis of machines on active magnetic bearings: Comparison to fluid film bearing machines and vibration specifications*. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2009. **7**: σελ. 57-66.
72. Mendes R. U., Cavalca K. L. και Ferreira L. O. S., *Analysis of a complete model of rotating machinery excited by magnetic actuator system*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013. **227**(1): σελ. 48-64.
73. Farmakopoulos G. Michael, Bompos A. Dimitrios, Nikolakopoulos G. Pantelis και Papadopoulos A. Chris. *The role of the AMB on the ship propulsion*. στο *1st International Marineline Conference on "All Electric Ship"*. 2012. Eugenides Foundation, Athens, Greece.
74. Παπαδόπουλος Α. Χρήστος, Νικολακόπουλος Γ. Παντελής και Φαρμακόπουλος Γρ. Μιχαήλ. *Ενεργό υδρομαγνητικό έδρανο*. στο *1η Έκθεση Μεταφοράς Τεχνογνωσίας 2012, «Patras IQ (Innovation Quest), συνεργαζόμαστε, καινοτομούμε, δημιουργούμε»*. 2012. Αγορά Αργύρη, Πάτρα: Γραφείο Καινοτομίας & Μεταφοράς Τεχνογνωσίας Πανεπιστημίου Πατρών - Επιμελητήριο Αχαΐας.
75. Παπαδόπουλος Α. Χρήστος, Νικολακόπουλος Γ. Παντελής και Φαρμακόπουλος Γρ. Μιχαήλ, *Υβριδικό έδρανο ολίσθησης*, Ο.Β.Ι. Εκδότης. 2010: Ελλάδα.

76. Papadopoulos A. Chris, Nikolakopoulos G. Pantelis και Farmakopoulos G. Michael, *Hybrid journal bearing*, Office European Patent Εκδότης. 2013: Greece.
77. Papadopoulos A. Chris, Nikolakopoulos G. Pantelis και Farmakopoulos G. Michael, *Hybrid journal bearing*, W.I.P.O. Εκδότης. 2013: Greece.
78. Alastair Cameron, *Basic lubrication theory*. 3η έκδ. 1981: John Wiley & Sons.
79. Παπαδόπουλος Α. Χρήστος, *Στοιχεία μηχανών*. 2η έκδ: Τζιόλα.
80. Gertzos P. Konstantinos, Nikolakopoulos G. Pantelis και Papadopoulos A. Chris, *CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant*. Tribology International, 2008. **41**(12): σελ. 1190-1204.
81. Nikolakopoulos G. Pantelis και Papadopoulos A. Chris, *Nonlinearities in misaligned journal bearings*. Tribology International, 1994. **27**(4): σελ. 243-257.
82. Schweitzer G. και Maslen EH, *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. 2009: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
83. Khoo W. K. S., Garvey S. D. και Kalita K., *The specific load capacity of radial-flux radial magnetic bearings*. Ieee Transactions on Magnetism, 2007. **43**(7): σελ. 3293-3300.
84. Antila M., Lantto E. και Arkkio A., *Determination of forces and linearized parameters of radial active magnetic bearings by finite element technique*. Ieee Transactions on Magnetism, 1998. **34**(3): σελ. 684-694.
85. *Metals handbook*. 8η έκδ. Τόμος 1. 1961: American Society for Metals.
86. Chiba A., Fukao T., Ichikawa O., Oshima M., Takemoto M. και Dorrell D.G., *Magnetic bearings and bearingless drives*. 2005: Newnes, an imprint of Elsevier.
87. Friswell M., Penny J., Garvey S. και Lees A., *Dynamics of rotating machines*, έκδ. series Cambridge aerospace. 2010.