



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής»
«Advanced Control Systems and Robotics»

«Σχεδιασμός Ελεγκτή Συνεχούς Χρόνου
για την Ρύθμιση των Μεταβλητών Απόδοσης Συστήματος Μαγνητικής Αιώρησης»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
που υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Προηγμένα Συστήματα
Ελέγχου και Ρομποτικής» του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ως
μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα
Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής
από την

Ξύδη Αικατερίνη

Νοέμβριος 2022



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής»

«Advanced Control Systems and Robotics»

«Σχεδιασμός Ελεγκτή Συνεχούς Χρόνου
για την Ρύθμιση των Μεταβλητών Απόδοσης Συστήματος Μαγνητικής Αιώρησης»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής» του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ως μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής

από την

Ξύδη Αικατερίνη

Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα **Copyright**

«Ο μεταπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός-ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κ.λπ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή την γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».

Νοέμβριος 2022

«Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Συνέλευση του Γενικού Τμήματος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σύμφωνα με το νόμο και τον εγκεκριμένο Οδηγό Σπουδών του ΠΜΣ «*Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής*». Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

- 1 Νικόλαος Δ. Κούβακας, Αναπληρωτής Καθηγητής(Επιβλέπων)
- 2 Φώτιος Ν. Κουμπουλής, Καθηγητής..... (Μέλος)
- 3 Δημήτριος Γ. Φραγκούλης, Επίκουρος Καθηγητής(Μέλος)

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

Σύμφωνα με τον Ν. 4589/2019 (ΦΕΚ 13/29-1-2019 τ. Α) το Π.Μ.Σ. «Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής» εντάχθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.»

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία στο κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά σε διάφορες εφαρμογές οι οποίες χρησιμοποιούν τη μέθοδο της μαγνητικής αιώρησης. Γίνεται αναφορά στις πιο σημαντικές και τονίζεται η σημασία της μεθόδου αυτής στις μέρες μας. Επίσης στο κεφάλαιο 2 μελετάται το πρόβλημα του ελέγχου της θέσης μιας μαγνητικά αιωρούμενης σφαίρας μέσω ενός γραμμικού ελεγκτή ανατροφοδότησης κατάστασης τύπου PD και η ταυτόχρονη ικανοποίηση ενός συνόλου επιμέρους διαφορετικών απαιτήσεων σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένης της ευστάθειας του συστήματος κλειστού βρόχου, της ακολούθησης εντολής, της επιλογής των παραμέτρων του ελεγκτή ώστε το σύστημα κλειστού βρόχου να προσεγγίζει την συμπεριφορά μιας συνάρτησης μεταφοράς μοντέλο και τον περιορισμό της εισόδου ώστε να παραμένει φραγμένη. Οι απαιτήσεις καθορίζονται πάνω στη γραμμική προσέγγιση του συστήματος μαγνητικής αιώρησης. Επίσης για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται ένας μεταερευτικός αλγόριθμος, βασισμένος στη γραμμική προσέγγιση του συστήματος μαγνητικής αιώρησης. Η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου, όταν εφαρμόζεται στο αρχικό μη γραμμικό σύστημα απεικονίζεται μέσω σειράς υπολογιστικών πειραμάτων.

Λέξεις κλειδιά: μαγνητική αιώρηση, ελεγκτής τύπου PD, μεταερευτικός έλεγχος.

Summary

In this thesis, in chapter 1, reference is made to various applications that use the method of magnetic levitation. Reference is made to the most important ones and the importance of this method nowadays is emphasized. Also in chapter 2 the problem of controlling the position of a magnetically levitating sphere by means of a linear PD state feedback controller and simultaneously satisfying a set of individual different design requirements is studied, including stability, following the command, following the model and the appropriately bounded input. The requirements are determined on the linear approximation of the magnetic levitation system. Also, to solve the problem, a meta-heuristic algorithm is proposed, based on the linear approximation of the magnetic levitation system. The performance of the proposed control system for the resulting nonlinear closed-loop system is illustrated through a series of computational experiments.

Keywords: Magnetic Levitation, PD controller, metaheuristic control

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Summary.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΙΩΡΗΣΗΣ	7
1.1 Η τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης.....	7
1.2 Τραίνα μαγνητικής αιώρησης.....	7
1.3 Εκτόξευση πυραύλων	8
1.4 Καρδιακές αντλίες	8
1.5 Μαγνητικά ρουλεμάν.....	9
1.6 Ανάλυση τροφίμων	9
1.7 Ιπτάμενα αυτοκίνητα	9
1.7 Ανεμογεννήτριες.....	10
1.8 Ανελκυστήρας μαγνητικής αιώρησης.....	10
1.9 Πλυντήριο ρούχων με τεχνολογία μαγνητικής αιώρησης.....	11
1.11 3D κυτταροκαλλιέργειες.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΜΕΣΩ ΕΛΕΓΚΤΗ PD	12
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Το μοντέλο των συστημάτων μαγνητικής αιώρησης.....	14
2.2.1 Μη γραμμική δυναμική του συστήματος	14
2.2.2 Γραμμικοποιημένη προσέγγιση.....	16
2.3 Ένα μεταερευτικό σύστημα ελέγχου PD.....	17
2.3.1 Ο Ελεγκτής	17
2.3.2 Επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή	19
2.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης	21
2.5 Συμπεράσματα	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΛΟΓΟΣ	28
Βιβλιογραφία.....	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΙΩΡΗΣΗΣ

1.1 Η τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης

Μαγνητική ανύψωση (Magnetic levitation), maglev ή μαγνητική αιώρηση (magnetic suspension) είναι μια μέθοδος με την οποία ένα αντικείμενο αιωρείται χωρίς υποστήριξη πέρα από μαγνητικά πεδία. Η μαγνητική δύναμη χρησιμοποιείται για να εξουδετερώσει τις επιπτώσεις της επιτάχυνσης της βαρύτητας και οποιονδήποτε άλλων επιταχύνσεων.

Τα δύο κύρια θέματα που υπάρχουν στην μαγνητική αιώρηση είναι οι *δυνάμεις ανύψωσης (lifting forces)* που παρέχουν μια ανοδική δύναμη αρκετή να εξουδετερώσει τη βαρύτητα και η *σταθερότητα* που εξασφαλίζει ότι το σύστημα δεν θα ολισθήσει ή δεν θα αναποδογυρίσει αυθόρμητα σε μια διαμόρφωση όπου η αιώρηση εξουδετερώνεται.

Η μαγνητική αιώρηση χρησιμοποιείται για τα τρένα τύπου μαγνητικής αιώρησης (maglev)s, για ανέπαφη τήξη (contactless melting), για μαγνητικά ρουλεμάν (magnetic bearings) και σε διάφορες άλλες εφαρμογές. (βλ. [1])

1.2 Τραίνα μαγνητικής αιώρησης

Η τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης έχει διάφορες χρήσεις μεταξύ των οποίων η πιο σημαντική είναι η λειτουργία αμαξοστοιχιών με μαγνητική αιώρηση. Τα τραίνα αυτά είναι αυτή τη στιγμή τα πιο εξελιγμένα οχήματα στη σιδηροδρομική βιομηχανία. Είναι τραίνα τα οποία δεν έχουν ρόδες, άξονες, κιβώτιο ταχυτήτων και κινούνται κατά μήκος μαγνητικών πεδίων τα οποία υπάρχουν μεταξύ του οχήματος και της ράγας οδήγησης. Η μη ύπαρξη μηχανικής επαφής και η απουσία τριβών έχουν ως αποτέλεσμα πολύ υψηλές ταχύτητες. Ένας μεγάλος αριθμός βιομηχανιών σε όλο τον κόσμο έχει στρέψει το ενδιαφέρον του για μεταφορές αυτής της τεχνολογίας. Τα τραίνα μαγνητικής αιώρησης μπορούν να θεωρηθούν ως η διέξοδος για τις μελλοντικές ανάγκες στις μεταφορές.

Τα συστήματα αναρτήσεων μαγνητικής αιώρησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: ηλεκτρομαγνητικές αναρτήσεις (EMS) και ηλεκτροδυναμικές αναρτήσεις (EDS). Οι μαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσω των μαγνητών καλύπτουν την αιώρηση, την προώθηση και την καθοδήγηση. Για τα συστήματα με ηλεκτρομαγνητικές αναρτήσεις αυτοί οι μαγνήτες βρίσκονται

μέσα στο όχημα ενώ στα συστήματα με ηλεκτροδυναμικές αναρτήσεις βρίσκονται στις ράγες. Η απόδοση των EMS βασίζονται σε ελκτικές μαγνητικές δυνάμεις ενώ στα EDS στις απωθητικές μαγνητικές δυνάμεις.

Οι ταχύτητες που μπορούν να επιτευχθούν είναι υψηλές, όμως οι επιβάτες είναι πιο ασφαλείς απ' ό τι σε άλλα μεταφορικά συστήματα. Το όχημα είναι «τυλιγμένο» γύρω από τη γραμμή μεταφοράς και έτσι είναι απίθανο να ανατραπεί. Για να αποφευχθεί η επαφή μεταξύ του οχήματος και της ράγας και να παραμένει το επιθυμητό κενό μεταξύ τους, υπάρχει ένα συνεχές σύστημα ελέγχου (Operation Control System). Το σύστημα αυτό ικανοποιεί όλες τις τεχνικές προδιαγραφές σχεδίασης, επίβλεψης και ασφαλείας της λειτουργίας του οχήματος. (βλ [2])

1.3 Εκτόξευση πυραύλων

Ένα σύστημα εκτόξευσης πυραύλων μαγνητικής αιώρησης θα χρησιμοποιούσε μαγνητικά πεδία για να ανυψώσει και να επιταχύνει ένα πύραυλο κατά μήκος μιας τροχιάς με πολύ υψηλές ταχύτητες. Η ιδέα του δακτυλίου εκτόξευσης πυραύλων αποτελείται από ένα όχημα-πύραυλος μαγνητικής αιώρησης το οποίο επιταχύνεται από έναν γραμμικό κινητήρα γύρω από μια κλειστή, οριζόντια, εκκενωμένη κυκλική τροχιά μεγάλης διαμέτρου δακτυλίου. Οι μαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αντίθεση με την ακτινική επιτάχυνση εμποδίζουν την επαφή του οχήματος με το τοίχωμα διέλευσης και το όχημα είναι στατικά σταθερό σε κατευθύνσεις κατακόρυφες, ακτινικές και εκτροπής λόγω της δράσης του συστήματος ανύψωσης. Σε αντίθεση με τις περισσότερες από τις άλλες ιδέες εκτόξευσης πυραύλων, η επιτάχυνση στον δακτύλιο εκτόξευσης συμβαίνει σε σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα και η απαιτούμενη τροφοδοσία ρεύματος είναι πολύ πιο μέτρια. Το κόστος των διαστημικών ταξιδιών θα μπορούσε να μειωθεί αφού η τροφοδότηση θα γίνεται από ηλεκτρική ενέργεια η οποία είναι φθηνότερη σε σχέση με τα καύσιμα που απαιτούνται και θα μείωνε το επιπλέον βάρος που προστίθεται στα οχήματα από αυτά. (βλ. [3])

1.4 Καρδιακές αντλίες

Η καρδιακή ανεπάρκεια είναι μια από τις κύριες αιτίες θανάτου. Η υποστήριξη των παραδοσιακών αντλιών τεχνητής καρδιάς συχνά χρησιμοποιεί κυλιόμενο ή συρόμενο ρουλεμάν δηλαδή εμπεριέχει κινούμενα και περιστρεφόμενα μέρη. Εξαιτίας της επαφής μεταξύ των μερών αυτών με το αίμα έχει παρατηρηθεί συχνά το αίμα να μολύνεται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται θρομβώσεις. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας της μαγνητικής αιώρησης, οι καρδιακές αντλίες ξεπερνούν τα προβλήματα της τριβής και της λίπανσης με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο μέσος όρος ζωής της αντλίας. (βλ. [4])

1.5 Μαγνητικά ρουλεμάν

Μια άλλη εφαρμογή της μαγνητικής αιώρησης εντοπίζονται στα μαγνητικά ρουλεμάν. Τα μαγνητικά ρουλεμάν αντικατέστησαν τα κοινά μηχανικά ρουλεμάν που χρησιμοποιούνται στους περιστροφικούς κινητήρες, εκμηδενίζοντας την τριβή μεταξύ του άξονα του κινητήρα και των σφαιρών του ρουλεμάν. Αυτό επιτυγχάνεται καταργώντας τα ρουλεμάν και εξαναγκάζοντας τον άξονα του κινητήρα να στρέφεται στον αέρα. Υπάρχουν ηλεκτρομαγνήτες τοποθετημένοι κυκλικά στη περιφέρεια εσωτερικά του κινητήρα, οι οποίοι έλκουν τον άξονα του κινητήρα ανάλογα με το σήμα που δίνουν οι αισθητήρες που βρίσκονται πάνω στον κινητήρα. (βλ. [5])

1.6 Ανάλυση τροφίμων

Στη βιομηχανία τροφίμων και υγείας η μέτρηση της πυκνότητας μιας ουσίας είναι πολύ σημαντική καθώς δίνει σημαντικές πληροφορίες για τη χημική σύσταση της ουσίας. Οι υπάρχουσες συσκευές για τη μέτρηση αυτή δεν έχουν τελειοποιηθεί και είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας συσκευής απλούστερης, φθηνότερης και εύκολης στη χρήση. Μετράμε την πυκνότητα των δειγμάτων αιωρώντας τα σε ένα παραμαγνητικό διάλυμα τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο μαγνήτες ευθυγραμμισμένους παράλληλα με παρόμοιους πόλους ο ένας απέναντι στον άλλο. Τα διαμαγνητικά δείγματα αιωρούνται σε αυτή τη συσκευή όταν η βαρυτική δύναμη που ασκείται στην ουσία εξισορροπείται από τη μαγνητική δύναμη. (βλ. [6])

1.7 Ιπτάμενα αυτοκίνητα

Το skyTran είναι μια ιδέα συστήματος ταχείας μεταφοράς που προτάθηκε για πρώτη φορά από τον εφευρέτη Douglas Malewicki το 1990 και βρίσκεται υπό ανάπτυξη από την Unimodal Inc. Κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο του οχήματος skyTran και ένα τμήμα της πίστας. Το πρώιμο σύστημα μαγνητικής αιώρησης Indutrack, το οποίο η SkyTran έχει αντικαταστήσει με παρόμοιο ιδιόκτητο σχέδιο, έχει δοκιμαστεί από την General Atomics με ένα μοντέλο πλήρους κλίμακας. Το 2010, η Unimodal υπέγραψε συμφωνία με τη NASA για τη δοκιμή και την ανάπτυξη του skyTran. Η skyTran έχει προτείνει πρόσθετα έργα στη Γαλλία, τη Γερμανία, την Ινδία, την Ινδονησία, τη Μαλαισία, το Ηνωμένο Βασίλειο και τις Ηνωμένες Πολιτείες.

Για να ελαχιστοποιηθεί η συντήρηση και να γίνει αποτελεσματική η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση των τροχιών σε υψηλές ταχύτητες, οι πρώτες εκδόσεις του συστήματος πρότειναν τη χρήση του συστήματος παθητικής μαγνητικής αιώρησης Inductrack αντί για τροχούς. Το παθητικό maglev δεν απαιτεί εξωτερική ισχύ για την ανύψωση οχημάτων. Μάλλον η μαγνητική απώθηση παράγεται από την κίνηση του οχήματος πάνω από βραχυκυκλωμένα πηνία σύρματος στην τροχιά. Τα αυτοκίνητα θα οδηγούνται από έναν γραμμικό κινητήρα στην πίστα. Επομένως το σύστημα θα έχει πολύ λίγα κινούμενα μέρη. Κυρίως μόνο το ίδιο το όχημα που θα κινείται κατά

μήκος της πίστας, οι τροχοί στάθμευσης, η πόρτα του και οι ανεμιστήρες στις μονάδες θέρμανσης και κλιματισμού.

Σε αυτήν την πρώτη έκδοση, τα παθητικά πηνία maglev περικλείονται και υποστηρίζονται από ένα ελαφρύ κέλυφος που αιχμαλωτίζει επίσης τα οχήματα μηχανικά για να αποτρέψει τον εκτροχιασμό. Ο Malewicki προτείνει ένα τρισδιάστατο σχέδιο πλέγματος που αποφεύγει τις, επιρρεπείς σε ατυχήματα, διασταυρώσεις με διαχωρισμό βαθμών, με οδηγούς και τις ράμπες εξόδου και εισόδου τους να διασχίζουν η μία πάνω ή κάτω από την άλλη. Οι πίστες θα υποστηρίζονται 20 ή 30 πόδια (6 ή 9 μέτρα) πάνω από το έδαφος από τυπικούς μεταλλικούς στύλους. Θα μπορούσαν επίσης να στερεωθούν στις πλευρές των κτιρίων. (βλ. [7])

1.7 Ανεμογεννήτριες

Η τεχνολογική έρευνα για την κατασκευή μη συμβατικών ανεμογεννητριών βρίσκεται σήμερα σε πιλοτική φάση με την κατασκευή πρωτοτύπων που ίσως μελλοντικά επιτρέψουν την επέκταση σε βιομηχανικές εφαρμογές. Η τεχνολογία Maglev, που στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής αιώρησης, δοκιμάζεται ήδη στην Κίνα και αν η έρευνα αποδώσει τα αναμενόμενα οι εξελίξεις θα είναι πολλές. Με την τεχνολογία αυτή οι τριβές σχεδόν μηδενίζονται, η απόδοση της ανεμογεννήτριας πολλαπλασιάζεται ενώ το κόστος παραγωγής γίνεται ασήμαντο. (βλ. [8])

1.8 Ανελκυστήρας μαγνητικής αιώρησης

Αντί για καλώδια, ο ανελκυστήρας μαγνητικής αιώρησης χρησιμοποιεί γραμμικούς κινητήρες πάνω σε ράγες, όπως αυτούς στα τραίνα μαγνητικής αιώρησης. Όταν η καμπίνα σταματήσει σε έναν όροφο, οι ράγες μπορούν να περιστραφούν, ώστε να κινηθεί δεξιά ή αριστερά. Αυτό μπορεί να επιτρέψει σε πολλές καμπίνες να χρησιμοποιούν το σύστημα ταυτόχρονα, χωρίς η μία να εμποδίζει την άλλη. Την ίδια στιγμή ένα λογισμικό θα μπορεί να σχεδιάζει τις διαδρομές κάθε καμπίνας, ώστε να μειώνεται ο χρόνος αναμονής και η «κίνηση» μέσα στο ασανσέρ. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να λύσει ένα μεγάλο πρόβλημα που μπορεί να βρει κανείς σε πολύ ψηλά κτίρια. Συνήθως στους ουρανοξύστες για να ανεβείτε στους τελευταίους ορόφους, πρέπει να πάρεις πάνω από ένα ασανσέρ. Γι'αυτό θα πρέπει να υπάρχουν περισσότερα συστήματα ανέλκυσης εγκατεστημένα. Το σύστημα αυτό με τους ανελκυστήρες maglev μπορεί με αυτόν τον τρόπο να εξοικονομήσει χώρο μέσα σε τέτοια κτίρια, αλλά και να συνδέσει δύο ή περισσότερους ουρανοξύστες μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να φέρει ριζικές αλλαγές στον τρόπο που σχεδιάζονται τα κτίρια, επιτρέποντας στους αρχιτέκτονες να τα σχεδιάζουν σε διάφορα σχήματα και στυλ. (βλ.[9])

1.9 Πλυντήριο ρούχων με τεχνολογία μαγνητικής αιώρησης

Το παραδοσιακό περιστρεφόμενο τύμπανο αντικαθίσταται από ένα σφαιρικό τύμπανο που συγκρατείται στη θέση του από μια σειρά ηλεκτρομαγνητών. Ένα σετ ηλεκτρομαγνητών διατηρεί το σφαιρικό τύμπανο να αιωρείται μέσα στο σώμα του μηχανήματος, ενώ ένα δεύτερο σετ προκαλεί κίνηση, επιτρέποντας στο τύμπανο να περιστρέφεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο πολύς θόρυβος μειώνεται καθώς το τύμπανο δεν έρχεται ποτέ σε επαφή με το σώμα. Έχει σχεδιαστεί με σκοπό τη δημιουργία ενός πλυντηρίου ρούχων που βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας πλύσης μειώνοντας παράλληλα την κατανάλωση νερού και σκόνης πλυσίματος.(βλ.[10])

1.11 3D κυτταροκαλλιέργειες

Η νέα αυτή διαδικασία χρησιμοποιεί μαγνητικές δυνάμεις για να αιωρούνται τα κύτταρα ενώ αυτά διαιρούνται και αναπτύσσονται για να σχηματίσουν ιστούς που μοιάζουν περισσότερο με αυτούς μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Οι 3D κυτταροκαλλιέργειες αντανakλούν τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών συστατικών που συνθέτουν τους ιστούς και ως εκ τούτου τους προσομοιάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι οι 2D κυτταροκαλλιέργειες. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα τεχνολογικό άλμα σε σχέση με την χρησιμοποίηση του τρυβλίου Petri και θα μπορούσε να υπάρχει λιγότερο κόστος όσον αφορά τον έλεγχο φαρμάκων. Υπάρχει μεγάλη ώθηση αυτή τη στιγμή για να βρεθούν τρόποι για την ανάπτυξη κυττάρων σε 3D, επειδή το σώμα είναι τρισδιάστατο και οι καλλιέργειες του μοιάζουν περισσότερο με τον εγγενή ιστό, αναμένεται να παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα για προκλινικές δοκιμές φαρμάκων. Η νέα αυτή τεχνική είναι ένα παράδειγμα της καινοτομίας που μπορεί να προκύψει όταν συγκεντρώνονται ειδικοί από διαφορετικούς τομείς. Οι ερευνητές ανέπτυξαν ένα τζελ που θα μπορούσε να απομακρύνει καρκινικά κύτταρα με μαγνητικά νανοσωματίδια. Μπορέσαν να χρησιμοποιήσουν μαγνητικά πεδία για να χειριστούν τα κύτταρα βάζοντας μαγνητικά νανοσωματίδια μέσα τους. Τα νανοσωματίδια σε αυτή την περίπτωση είναι μικροσκοπικά κομμάτια σιδήρου. Τα κύτταρα προστίθενται σε ένα πήκτωμα που περιέχει βακτηριοφάγο, ο οποίος προκαλεί την απορρόφηση των σωματιδίων στα κύτταρα σε λίγες ώρες. Οι ερευνητές έδειξαν ότι τοποθετώντας έναν μαγνήτη μεγέθους νομίσματος πάνω από το καπάκι του τρυβλίου, ανασηκώνουν τα κύτταρα από τον πάτο του πιάτου και έτσι συγκεντρώνοντας τα τους επιτρέπεται να αναπτυχθούν. (βλ [11])

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΕΣΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΜΕΣΩ ΕΛΕΓΚΤΗ PD

2.1 Εισαγωγή

Η μαγνητική αιώρηση έχει προσελκύσει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω της εφαρμογής της στη μηχανική μεταφορών, την περιβαλλοντική μηχανική, την αεροδιαστημική μηχανική, τις στρατιωτικές εφαρμογές κ.λπ., (βλ. [39] και τις αναφορές σε αυτές).

Για τη ρύθμιση των μεταβλητών απόδοσης των συστημάτων μαγνητικής αιώρησης, έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ελεγκτές τύπου PID (βλ. [16] έως [38]). Στην εργασία [16], προτείνεται ένας ασαφής ελεγκτής τύπου PD για ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Ο κύριος στόχος του είναι να επιτύχει τη σταθεροποίηση της ασταθούς δυναμικής του συστήματος. Στην εργασία [17], πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών δυναμικής απόκρισης και ευρωστίας των συμβατικών ελεγκτών PD και ασαφούς PD σε συστήματα μαγνητικής αιώρησης. Στην εργασία [18], παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση δύο σχημάτων ελέγχου ασαφούς λογικής που εφαρμόζονται σε ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Η βελτιστοποίηση του ελεγκτή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν υβριδικό αλγόριθμο που συνδυάζει τις τεχνικές των genetic algorithms και Bacterial Foraging Optimization algorithm. Εκτελούνται επίσης συγκρίσεις με ασαφείς ελεγκτές PD τύπου 1 και ασαφείς ελεγκτές PD τύπου 2. Στην εργασία [19], ένας ελεγκτής ασαφούς λογικής για ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας τη λειτουργία τριγωνικής ιδιότητας με κανόνες 7×7 και η απόδοσή του συγκρίνεται με έναν υπάρχοντα συμβατικό ελεγκτή PD. Στην εργασία [20], παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση στο σχεδιασμό ενός συστήματος ελέγχου ασαφούς λογικής για μια κατηγορία μη γραμμικών συστημάτων. Βασίζεται σε έναν ασαφή ελεγκτή PD μίας εξόδου δύο εισόδων. Η εγκυρότητα του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου ασαφούς PD επαληθεύεται μέσω δοκιμών σε ένα πειραματικό σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Στην εργασία [21], αναπτύσσεται ένας ασαφής λογικός ελεγκτής που βασίζεται σε συμβατικούς ελεγκτές PI και PD για συστήματα μαγνητικής αιώρησης. Ο ασαφής ελεγκτής έχει σχεδιαστεί για να διατηρεί ένα μαγνητικό αντικείμενο που κρέμεται στον αέρα εξουδετερώνοντας το βάρος του αντικειμένου. Στην εργασία [22], μελετάται το πρόβλημα της εφαρμογής ενός ασαφούς ελεγκτή PI/PD για ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Στην εργασία [23], διερευνάται μια συγκριτική μελέτη περίπτωσης που καλύπτει διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου μιας ασταθούς και μη γραμμικής διαδικασίας μαγνητικής αιώρησης. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται ένας ειδικός ρυθμιστής PD, ένας PID υβριδικής ασαφούς λογικής και ένας ρυθμιστής νευρικού δικτύου ανατροφοδότησης. Στην εργασία [24], για το σχεδιασμό και την επιλογή των παραμέτρων κλασματικών ρυθμιστών, προτείνονται δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος

βασίζεται στο κριτήριο σταθερότητας Nyquist και στα περιθώρια σταθερότητας, ενώ η δεύτερη βασίζεται στην παραμετρική βελτιστοποίηση μέσω προσομοιωμένης ανόπτησης πολλαπλών δεικτών απόδοσης. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται μέσω της εφαρμογής ενός ελεγκτή PID σε ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Στην εργασία [25], προτείνεται μια εφαρμογή του ελεγκτή PID κλασματικής τάξης για τη ρύθμιση της θέσης ενός μαγνητικά αιωρούμενου αντικειμένου. Για την υλοποίηση του ελεγκτή, ο διαφοριστής κλασματικής τάξης και ο ολοκληρωτής πραγματοποιούνται μέσω της προσέγγισης της ακέραιας τάξης. Στην εργασία [26], προτείνεται ένας PID ελεγκτής κλασματικής τάξης και ένας PID ελεγκτής ακέραιας τάξης για τη ρύθμιση της θέσης του αιωρούμενου αντικειμένου σε ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Οι παράμετροι του ελεγκτή ρυθμίζονται χρησιμοποιώντας την τεχνική Particle Swarm Optimization. Η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου επαληθεύεται με προσομοίωση και πειραματικά αποτελέσματα. Στην εργασία [27], ένας ελεγκτής PID έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί σε προσομοίωση και σε πραγματικό χρόνο για ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Το μη γραμμικό μοντέλο της μονάδας έχει γραμμικοποιηθεί γύρω από το σημείο ισορροπίας για να αποκτήσει τη γραμμικοποιημένη λειτουργία μεταφοράς. Οι παράμετροι του ελεγκτή έχουν ρυθμιστεί με ελαχιστοποίηση και αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Jaya. Επιπλέον, έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση ευρωστίας για να δείξει την δυνατή συμπεριφορά του ελεγκτή. Στην εργασία [28], προτείνεται ένας ελεγκτής θέσης PI-PD για ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Οι παράμετροι του ελεγκτή συντονίζονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Particle Swarm Optimization που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των κερδών του ελεγκτή PI-PD. Στην εργασία [29], προτείνεται ένα PIPD σύστημα ελέγχου με αντιστάθμιση ανατροφοδότησης για τον έλεγχο θέσης ενός συστήματος μαγνητικής αιώρησης. Στην εργασία [30], ένας ελεγκτής PD και ένας ελεγκτής PID για τον έλεγχο ενός συστήματος μαγνητικής αιώρησης συγκρίνονται πειραματικά, ενώ το δεύτερο σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή PID. Στην εργασία [31], εξετάζεται η απόδοση ενός ελεγκτή τύπου PD για τη ρύθμιση της εξόδου ενός συστήματος μαγνητικής αιώρησης. Στην εργασία [32], ένα σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιεί ανατροφοδότηση επιτάχυνσης χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος maglev, ειδικά σε περίπτωση εξασθένησης της διαταραχής. Αποδεικνύεται ότι το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου αυξάνει την εξασθένηση των διαταραχών χωρίς να μειώνεται η απόδοση. Στην εργασία [33], μελετάται το πρόβλημα του σχεδιασμού στο πεδίο της συχνότητας ενός εύρωστου ελεγκτή τύπου PID για ασταθή συστήματα μίας εισόδου – μίας εξόδου. Η προσέγγιση που εφαρμόζεται βασίζεται στις προδιαγραφές απόδοσης όσον αφορά τα περιθώρια φάσης και κέρδους. Τα αποτελέσματα έχουν εφαρμοστεί σε ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Στην εργασία [34], προτείνεται μια προσέγγιση σχεδιασμού κεντρικού ελέγχου για την αιώρηση μιας χαλύβδινης πλάκας κάτω από τετραπλούς ηλεκτρομαγνήτες διαμόρφωσης με 3 βαθμούς ελευθερίας. Ένας ελεγκτής IPD έχει

σχεδιαστεί για κάθε βαθμό ελευθερίας χρησιμοποιώντας την τεχνική του κανονικού πολυωνύμου. Στην εργασία [35], ένας ελεγκτής τύπου PD, ένας ελεγκτής τοποθέτηση πόλων και ένας ελεγκτής τύπου LQR συγκρίνονται τόσο χρησιμοποιώντας αποτελέσματα προσομοίωσης όσο και φυσικά πειράματα. Στην εργασία [36], προτείνεται ένας τροποποιημένος νόμος ελέγχου τύπου PID, για την αντιμετώπιση σφαλμάτων στον ολοκληρωτικό όρο του ελεγκτή. Στην εργασία [37], προτείνεται η χρήση μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης κριτηρίου απόδοσης για τον έλεγχο ενός συστήματος μαγνητικής αιώρησης. Οι παράμετροι ενός συστήματος ελέγχου PI-PD συντονίζονται χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Particle Swarm Optimization. Στην εργασία [38], μελετάται το πρόβλημα του σχεδιασμού ελεγκτών PID για ασταθή συστήματα SISO στον τομέα συχνοτήτων. Τα θεωρητικά αποτελέσματα εφαρμόζονται σε ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης.

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται το πρόβλημα του ελέγχου της θέσης μιας μαγνητικά αιωρούμενης μεταλλικής σφαίρα. Με βάση το μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος μαγνητικής αιώρησης, παράγεται η αντίστοιχη γραμμικοποιημένη προσέγγιση. Για τον έλεγχο της απόδοσης του συστήματος προτείνεται ένας ελεγκτής τύπου PD ο οποίος χρησιμοποιεί προσεγγιστική υλοποίηση του όρου της παραγώγου. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου στοχεύει στην επίτευξη ευστάθειας για το σύστημα κλειστού βρόχου, ασυμπτωτική ακολούθηση βηματικής εξωτερικής εντολής, φραγμένη ενεργοποιήσιμη είσοδο και την επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή ώστε το γραμμικοποιημένο σύστημα κλειστού βρόχου να προσεγγίζει την συμπεριφορά μιας συνάρτησης μεταφοράς μοντέλο. Οι παραπάνω στόχοι ικανοποιούνται επιλέγοντας τους βαθμούς ελευθερίας του ελεγκτή μέσω κατάλληλου μεταερευτικού αλγορίθμου. Αποδεικνύεται μέσω πλήθους υπολογιστικών πειραμάτων ότι παρά το γεγονός ότι ο ελεγκτής σχεδιάστηκε με βάση την γραμμικοποιημένη προσέγγιση του συστήματος, η απόδοσή του παραμένει ικανοποιητική όταν εφαρμόζεται στο αρχικό μη γραμμικό σύστημα, ακόμη και για μεγάλα πλάτη εξωτερικών εντολών.

2.2 Το μοντέλο των συστημάτων μαγνητικής αιώρησης

2.2.1 Μη γραμμική δυναμική του συστήματος

Ένα τυπικό σύστημα μαγνητικής αιώρησης, στην απλούστερη μορφή του, αποτελείται από μια σφαίρα κατασκευασμένη από σιδηρομαγνητικό υλικό, έναν ηλεκτρομαγνήτη και κατάλληλους αισθητήρες. Σύμφωνα με την εργασία [12], η μη γραμμική δυναμική ενός τέτοιου συστήματος (βλ. Σχήμα 1), σε μη γραμμική μορφή χώρου κατάστασης είναι:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (1a)$$

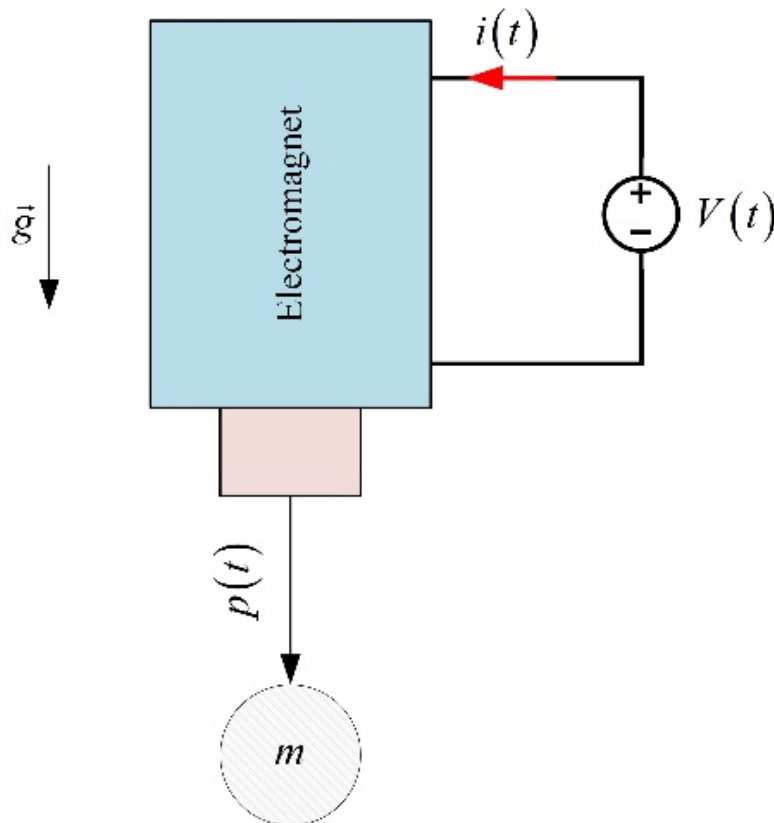
$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (1b)$$

όπου $x(t)$ είναι το διάνυσμα κατάστασης, $u(t)$ η είσοδος του συστήματος και $y(t)$ είναι η έξοδος / μεταβλητή απόδοσης αντίστοιχα, όπου

$$x(t) = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t)]^T = [p(t) \quad \dot{p}(t) \quad i(t)]^T$$

$$u(t) = V(t), y(t) = p(t).$$

και p , i , V είναι η θέση της σφαίρας (απόσταση από τον ηλεκτρομαγνήτη), το ρεύμα στο πηνίο του ηλεκτρομαγνήτη και η εφαρμοζόμενη τάση (ενεργοποιήσιμη είσοδος) αντίστοιχα.



Σχήμα 1. Σκίτσο μαγνητικών συστημάτων αιώρησης

Η μη γραμμική συνάρτηση $F(x, u)$ είναι της μορφής

$$F(x, u) = [f_1(x, u) \quad f_2(x, u) \quad f_3(x, u)]^T$$

όπου

$$f_1(x, u) = x_2(t), \quad f_2(x, u) = g - \frac{C_m}{m} \left(\frac{x_3(t)}{x_1(t)} \right)^2$$

$$f_3(x, u) = -\frac{R_m}{L_m} x_3(t) + \frac{2C_m x_2(t) x_3(t)}{L_m x_1(t)^2} + \frac{1}{L_m} u(t)$$

και όπου R_m είναι η αντίσταση του πηνίου, L_m είναι η επαγωγή του πηνίου, C_m είναι η σταθερά της μαγνητικής δύναμης, m είναι η μάζα της σφαίρας και g είναι το μέτρο του διανύσματος της

επιτάχυνσης της βαρύτητας. Όσον αφορά την έξοδο του συστήματος, προφανώς ισχύει ότι $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$.

2.2.2 Γραμμικοποιημένη προσέγγιση

Η γραμμικοποιημένη προσέγγιση του μη γραμμικού μοντέλου (1) θα παραχθεί γύρω από τα κατάλληλα ονομαστικά σημεία που αντιστοιχούν σε ένα σενάριο για την ακινησία της μπάλας. Έστω $\bar{u}$ η ονομαστική τιμή του u , $\bar{x}_i$ να είναι οι ονομαστικές τιμές των x_i ($i=1,2,3$) και $\bar{y}$ να είναι η ονομαστική τιμή του y . Επιπλέον έστω $\bar{x}$ το διάνυσμα των ονομαστικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης. Χρησιμοποιώντας το μη γραμμικό μαθηματικό μοντέλο (1), οι ονομαστικές τιμές μπορούν να εκφραστούν με βάση την ονομαστική τιμή της θέσης της σφαίρας με τη μορφή

$$\bar{x}_1 = p^*, \bar{x}_2 = 0, \bar{x}_3 = \sqrt{\frac{mg}{C_m}} p^*, \bar{y} = p^*, \bar{u} = R_m \sqrt{\frac{mg}{C_m}} p^*$$

όπου p^* είναι η ονομαστική θέση της μπάλας. Η γραμμικοποιημένη προσέγγιση του μοντέλου (1) είναι της μορφής

$$\delta \dot{x}(t) = A \delta x(t) + B \delta u(t) \quad (2a)$$

$$\delta y(t) = C \delta x(t) \quad (2b)$$

όπου $\delta u(t) = \Delta u(t) = u(t) - \bar{u}$, ενώ $\delta x(t)$ και $\delta y(t)$ είναι οι αποκρίσεις του γραμμικού μοντέλου (2) και οι οποίες προσεγγίζουν τις $\Delta x(t) = x(t) - \bar{x}$ και $\Delta y(t) = y(t) - \bar{y}$ αντίστοιχα. Η προσέγγιση είναι ακριβής γύρω από ένα σημείο λειτουργίας

$$o(t) = \bar{o}, \quad o(t) = (u(t), x(t), y(t)), \quad \bar{o} = (\bar{u}, \bar{x}, \bar{y})$$

Οι πίνακες του συστήματος στην εξίσωση (2a) προσδιορίζονται από τις σχέσεις

$$A = \left. \frac{\partial}{\partial x} F(x, u) \right|_{o=\bar{o}}, \quad B = \left. \frac{\partial}{\partial u} F(x, u) \right|_{o=\bar{o}}$$

Τα μη μηδενικά στοιχεία των πινάκων του συστήματος $A = [a_{i,j}] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ και $B = [b_i] \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ στην εξίσωση (2a) υπολογίζονται ως εξής:

$$a_{1,2} = 1, \quad a_{2,1} = \frac{2g}{\bar{x}_1}, \quad a_{2,3} = -\frac{2\sqrt{gC_m}}{\sqrt{m}\bar{x}_1}, \quad a_{3,2} = \frac{2\sqrt{mgC_m}}{L_m \bar{x}_1}, \quad a_{3,3} = -\frac{R_m}{L_m}, \quad b_3 = \frac{1}{L_m}.$$

2.3 Ένα μεταερευτικό σύστημα ελέγχου PD

2.3.1 Ο Ελεγκτής

Στη συνέχεια, θα υποτεθεί ότι υπάρχουν κατάλληλοι αισθητήρες που παρέχουν μετρήσεις όλων των μεταβλητών κατάστασης σε πραγματικό χρόνο. Ο ελεγκτής που θα σχεδιαστεί είναι τύπου PD. Όσον αφορά τους παράγωγους όρους του ελεγκτή, θα προσεγγιστούν χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο σύστημα πρώτης τάξης, ώστε να αποφευχθεί η παραγωγή πιθανών σημάτων θορύβου μέτρησης υψηλής συχνότητας που διαφορετικά αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου. Ο προτεινόμενος ελεγκτής (στο πεδίο της συχνότητας) έχει τη μορφή

$$\begin{aligned} \delta U(s) = & f_{p,1} \delta X_1(s) + \left(f_{p,2} + \frac{f_{d,2}s}{f_{d,2}\gamma_2^{-1}s + 1} \right) \delta X_2(s) + \\ & + \left(f_{p,3} + \frac{f_{d,3}s}{f_{d,3}\gamma_3^{-1}s + 1} \right) \delta X_3(s) + \kappa W(s) \end{aligned} \quad (3)$$

όπου $f_{p,i} \in \mathbb{R}$ ($i=1,2,3$), $f_{d,j}, \gamma_j \in \mathbb{R}$ ($j=2,3$), $\kappa \in \mathbb{R}$, $W(s) = \mathcal{L}\{w(t)\}$, $\delta X_j(s) = \mathcal{L}\{\delta x_j(t)\}$

($i=1,2,3$), $w(t)$ είναι η εξωτερική εντολή και όπου $\mathcal{L}\{\bullet\}$ υποδηλώνει το μετασχηματισμό

Laplace του σήματος ορίσματος $\bullet$. Ο στόχος του σχεδιασμού είναι να βρεθούν οι κατάλληλες

παράμετροι ελεγκτή $f_{p,i}$, $f_{d,j}$ και γ_j έτσι ώστε:

- i. ο ελεγκτής να είναι ευσταθής,
- ii. το σύστημα κλειστού βρόχου να είναι ευσταθές,
- iii. να επιτυγχάνεται ασυμπτωτική ακολούθηση βηματικής εξωτερικής εντολής για την έξοδο του συστήματος,
- iv. η ενεργοποιήσιμη είσοδος να παραμένει εντός κατάλληλων ορίων, και
- v. να απλοποιείται η συνάρτηση μεταφοράς του γραμμικοποιημένου συστήματος κλειστού βρόχου με την έννοια να μοιάζει με μια συνάρτηση μεταφοράς "μοντέλου", έστω $H_m(s)$ όπως αυτή ορίζεται από τον σχεδιαστή του ελεγκτή.

Όσον αφορά τον στόχο (i), από την σχέση (3) μπορεί να επαληθευτεί ότι ο ελεγκτής είναι ευσταθής εάν και μόνο εάν

$$f_{d,2}\gamma_2^{-1} > 0 \wedge f_{d,3}\gamma_3^{-1} > 0 \quad (4a)$$

Όσον αφορά τον στόχο σχεδιασμού (ii), εφαρμόζοντας τον ελεγκτή (3) στη γραμμική προσέγγιση (2) και εφαρμόζοντας σειρές υπολογισμών, μπορεί να παρατηρηθεί ότι το σύστημα κλειστού βρόχου είναι ευσταθές εάν και μόνο εάν

$$\operatorname{Re}\{\rho_q\} < 0; \quad q=1, \dots, 5 \quad (4b)$$

όπου ρ_q ($q=1, \dots, 5$) είναι οι ρίζες του πολυνύμου

$$p_c(s) = s^5 + \alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0$$

όπου

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= \frac{\gamma_2}{f_{d,2}} + \frac{\gamma_3}{f_{d,3}} - \frac{f_{p,3} - R_m + \gamma_3}{L_m}, \\ \alpha_3 &= \frac{4C_m g}{L_m \bar{x}_1^2} + \frac{2(f_{p,2} + \gamma_2)\lambda}{L_m \bar{x}_1} + \left\{ \left[f_{d,2} (R_m - f_{p,3}) \bar{x}_1 + L_m \bar{x}_1 \gamma_2 \right] \gamma_3 \right. \\ &\quad \left. - f_{d,3} \left[2f_{d,2} g L_m + \bar{x}_1 \gamma_2 (f_{p,3} - R_m + \gamma_3) \right] \right\} / (L_m \bar{x}_1 f_{d,2} f_{d,3}) \\ \alpha_2 &= \left(2f_{d,2} \left\{ g(2C_m - L_m \bar{x}_1) \gamma_3 + \bar{x}_1 (f_{p,2} + \gamma_2) \gamma_3 \lambda + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + f_{d,3} \bar{x}_1 \left[g(f_{p,3} - R_m + \gamma_3) + f_{p,1} \lambda \right] \right\} + \gamma_2 \left\{ 4C_m f_{d,3} g + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \bar{x}_1 \left[(R_m - f_{p,3}) \bar{x}_1 \gamma_3 - 2f_{d,3} g L_m + 2f_{d,3} f_{p,2} \lambda \right] \right\} \right) / (f_{d,2} f_{d,3} L_m \bar{x}_1^2) \\ \alpha_1 &= 2 \left\{ f_{d,2} \bar{x}_1 \gamma_3 \left[(f_{p,3} - R_m) g + f_{p,1} \lambda \right] + f_{d,3} \bar{x}_1 \gamma_2 \left[g(f_{p,3} - R_m \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \gamma_3) + f_{p,1} \lambda \right] + \gamma_2 \gamma_3 (2C_m g - g L_m \bar{x}_1 + f_{p,2} \bar{x}_1 \lambda) \right\} / (f_{d,2} f_{d,3} L_m \bar{x}_1^2) \\ \alpha_0 &= \frac{2\gamma_2 \gamma_3 (f_{p,3} g - g R_m + f_{p,1} \lambda)}{f_{d,2} f_{d,3} L_m \bar{x}_1} \end{aligned}$$

και όπου $\lambda = \sqrt{g C_m / m}$. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι η συνάρτηση μεταφοράς που αντιστοιχίζει την εξωτερική εντολή στην μεταβλητή απόδοσης είναι της μορφής

$$H_y(s) = \frac{\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0}{p_c(s)} \quad (5)$$

όπου

$$\beta_2 = -\frac{2\lambda\kappa}{L_m \bar{x}_1}, \quad \beta_1 = -\frac{2(f_{d,3}\gamma_2 + f_{d,2}\gamma_3)\kappa\lambda}{f_{d,2}f_{d,3}L_m \bar{x}_1}, \quad \beta_0 = -\frac{2\gamma_2\gamma_3\kappa\lambda}{f_{d,2}f_{d,3}L_m \bar{x}_1}$$

Εάν οι ανισότητες στις σχέσεις (4a) και (4b) ισχύουν, η απαίτηση σχεδιασμού στο σημείο (iii) μεταφράζεται στον περιορισμό

$$H_y(0) = 1 \quad (6)$$

Επιλέγοντας

$$\kappa = \sqrt{\frac{mg}{C_m}} (R_m - f_{p,3}) - f_{p,1}$$

η ισότητα που περιγράφεται στην σχέση (6) ικανοποιείται. Όσον αφορά το στόχο σχεδίασης (iv), μπορεί να επαληθευτεί ότι η συνάρτηση μεταφοράς που αντιστοιχίζει την εξωτερική εντολή στην ενεργοποιήσιμη είσοδο είναι της μορφής

$$H_u(s) = \frac{p_n(s)}{p_c(s)} \quad (7)$$

όπου

$$p_n(s) = \frac{K}{f_{d,2}f_{d,3}L_m\bar{x}_1^2} \left[4C_mgs + (R_m + L_ms)\bar{x}_1(\bar{x}_1s^2 - 2g) \right] \times (f_{d,2}s + \gamma_2)(f_{d,3}s + \gamma_3)$$

Ο στόχος σχεδιασμού της φραγμένης εισόδου μεταφράζεται στην εύρεση του κατάλληλου συνόλου παραμέτρων ελεγκτή έτσι ώστε

$$\|H_u(s)\|_\infty < \varepsilon_u \quad (8)$$

όπου ε_u είναι ένας θετικός πραγματικός αριθμός, που επιλέγεται από τον σχεδιαστή. Τέλος, σε ότι αφορά τον σχεδιαστικό στόχο (v), έστω το κριτήριο κόστους

$$J(f_{p,i}, f_{d,j}, \gamma_j) = \|H_y(s) - H_m(s)\|_2 \quad (9)$$

Το πρόβλημα της επιλογής των παραμέτρων του ελεγκτή ώστε να η συνάρτηση μεταφοράς $H_y(s)$ του συστήματος κλειστού βρόχου να προσεγγίζει την συμπεριφορά της συνάρτησης μεταφοράς «μοντέλο» $H_m(s)$, πραγματοποιείται μέσω της ελαχιστοποίησης του κριτηρίου κόστους (9).

2.3.2 Επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή

Η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου κόστους (9) υπό τους περιορισμούς των σχέσεων (4), (6) και (8) αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα επιλογής παραμέτρων. Λαμβάνοντας υπόψη τη δυσκολία στην παραγωγή μιας αναλυτικής λύσης και εμπνευσμένη από τους μεταερευνητικούς αλγόριθμους που παρουσιάζονται στις εργασίες [13] και [14], θα προταθεί ένας κατάλληλος μεταερευνητικός αλγόριθμος. Το βασικό σημείο του αλγορίθμου είναι να ορίσει μια αρχική περιοχή αναζήτησης για τις παραμέτρους του ελεγκτή και μετά από αρκετές επαναλήψεις αυτή συρρικνώνεται σε μια μη βέλτιστη λύση που ικανοποιεί την απαίτηση ομοιότητας (9), υπό τους περιορισμούς (4), (6) και (8). Ο μεταερευνητικός αλγόριθμος είναι:

Αρχικά δεδομένα και κριτήριο απόδοσης

1) Κεντρικές τιμές και πλάτη για την αρχική περιοχή αναζήτησης των παραμέτρων του ελεγκτή $(f_{p,i})_c$, $(f_{d,j})_c$, $(\gamma_j)_c$, $(f_{p,i})_w$, $(f_{d,j})_w$ και $(\gamma_j)_w$ ($i=1,2,3$, $j=2,3$).

2) Κριτήριο απόδοσης $J(f_{p,i}, f_{d,j}, \gamma_j)$.

3) Παράμετροι επανάληψης n_{loop} , n_{rep} , $n_{total} \in \mathbb{N}$.

5) Όριο αλγορίθμου αναζήτησης μ .

Αλγόριθμος

Βήμα 0: Ορίστε το ευρετήριο αρίθμησης $i_{\max} = 0$.

Βήμα 1: Προσδιορίστε μια περιοχή αναζήτησης για τις παραμέτρους του ελεγκτή σύμφωνα με τις ανισότητες

$$\begin{aligned} (f_{p,i})_c - (f_{p,i})_w \leq f_{p,i} \leq (f_{p,i})_c + (f_{p,i})_w & \quad (f_{d,j})_c - (f_{d,j})_w \leq f_{d,j} \leq (f_{d,j})_c + (f_{d,j})_w \\ (\gamma_j)_c - (\gamma_j)_w \leq \gamma_j \leq (\gamma_j)_c + (\gamma_j)_w \end{aligned}$$

Βήμα 2: Ορίστε τη μεταβλητή $i_1 = 0$.

Βήμα 3: Ορίστε τη μεταβλητή $i_1 = i_1 + 1$.

Βήμα 4: Ορίστε τη μεταβλητή $i_2 = 0$.

Βήμα 5: Ορίστε τη μεταβλητή $i_{\max} = i_{\max} + 1$. Εάν $i_{\max} > n_{total}$ μεταβείτε στο Βήμα 14.

Βήμα 6: Ορίστε τη μεταβλητή $i_2 = i_2 + 1$.

Βήμα 7: Επιλέξτε τυχαία ένα σύνολο παραμέτρων ελεγκτή στην περιοχή αναζήτησης, έστ $f_{p,i} = (f_{p,i})_{i_2}$, $f_{d,j} = (f_{d,j})_{i_2}$ και $\gamma_j = (\gamma_j)_{i_2}$. Ελέγξτε αν πληρούνται οι περιορισμοί στα σημεία (4)

και (8). Εάν ναι, προχωρήστε στο επόμενο βήμα. Εάν όχι, επαναλάβετε το βήμα 7.

Βήμα 8: Υπολογίστε $J_{i_2} = J\left((f_{p,i})_{i_2}, (f_{d,j})_{i_2}, (\gamma_j)_{i_2}\right)$

Βήμα 9: Εάν $i_2 < n_{loop}$, τότε μεταβείτε στο Βήμα 5.

Βήμα 10: Βρείτε το $J_{i_1, \min} = \min\{J_{i_2}, i_2 = 1, \dots, n_{loop}\}$ και τις αντίστοιχες παραμέτρους του ελεγκτή $(f_{p,i})_{i_1}$, $(f_{d,j})_{i_1}$ και $(\gamma_j)_{i_1}$.

Βήμα 11: Εάν $i_1 \geq n_{rep}$, στη συνέχεια, βρείτε τις παραμέτρους του ελεγκτή $(f_{p,i})_{\min}$, $(f_{d,j})_{\min}$, $(\gamma_j)_{\min}$ και $(f_{p,i})_{\max}$, $(f_{d,j})_{\max}$, $(\gamma_j)_{\max}$ που αντιστοιχούν στην τιμή του κριτηρίου $J_{\min} = \min\{J_{i_1, \min}, i_1 = 1, \dots, n_{rep}\}$ και $J_{\max} = \max\{J_{i_1, \min}, i_1 = 1, \dots, n_{rep}\}$.

Διαφορετικά, μεταβείτε στο Βήμα 3.

Βήμα 12: Ορίστε: $(f_{p,i})_c = (f_{p,i})_{\min}$, $(f_{d,j})_c = (f_{d,j})_{\min}$, $(\gamma_j)_c = (\gamma_j)_{\min}$

$$(f_{p,i})_w = \left| (f_{p,i})_{\max} - (f_{p,i})_{\min} \right|, (f_{d,j})_w = \left| (f_{d,j})_{\max} - (f_{d,j})_{\min} \right|, (\gamma_j)_w = \left| (\gamma_j)_{\max} - (\gamma_j)_{\min} \right|$$

Βήμα 13: Εάν $\max\left\{\left|\frac{(f_{p,i})_w}{(f_{p,i})_c}\right|, \left|\frac{(f_{d,j})_w}{(f_{d,j})_c}\right|, \left|\frac{(\gamma_j)_w}{(\gamma_j)_c}\right|\right\} > \mu$ και $i_{\max} < n_{total}$ μεταβείτε στο Βήμα 2.

Εάν $\max \left\{ \left| \frac{(f_{p,i})_w}{(f_{p,i})_c} \right|, \left| \frac{(f_{d,j})_w}{(f_{d,j})_c} \right|, \left| \frac{(\gamma_j)_w}{(\gamma_j)_c} \right| \right\} \leq \mu$ ή $i_{\max} \geq n_{total}$ μεταβείτε στο Βήμα 14.

Βήμα 14: Set $f_{p,i} = (f_{p,i})_{\min}$, $f_{d,j} = (f_{d,j})_{\min}$ and $\gamma_j = (\gamma_j)_{\min}$.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δεν εξαρτώνται από τη μορφή της εξωτερικής εντολής.

2.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Για να διερευνηθεί η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου, ο γραμμικός ελεγκτής, αφού προστεθεί η ονομαστική τιμή της εισόδου, θα εφαρμοστεί στο μη γραμμικό σύστημα (1). Έστω οι ακόλουθες τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος ανοικτού βρόχου (βλ. [12]):

$$R_m = 29.7[\Omega], L_m = 0.65[H], C_m = 1.24 \cdot 10^{-4} [Nm^2 A^2], m = 11.87[g], g = 9.81[m/s^2]$$

Επιπλέον έστω $p^* = 0.015[mm]$. Εφαρμόζοντας στοιχειώδεις υπολογισμούς, μπορεί να επαληθευτεί ότι

$$\bar{x}_1 = 0.015[mm], \bar{x}_2 = 0[mm/s], \bar{x}_3 = 0.4597[A], \bar{y} = 0.015[mm], \bar{u}_1 = 13.652[V]$$

Η συνάρτηση μεταφοράς «μοντέλο» επιλέγεται να είναι της μορφής

$$H_m(s) = 1 / (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1) \quad (10)$$

Όπου $T_1 = 0.1$, $T_2 = 0.2$ και $T_3 = 0.3$. Επιπλέον, θα υποτεθεί ότι

$$\begin{aligned} n_{loop} &= 50[-], n_{rep} = 10[-], n_{total} = 10^7[-], \mu = 10^{-3}[-], \varepsilon_u = 10^3, (f_{p,1})_c = 7000, (f_{p,2})_c = 2400, \\ (f_{p,3})_c &= -200, (f_{d,2})_c = 20, (f_{d,3})_c = -70, (\gamma_2)_c = 12000, (\gamma_3)_c = -20000, (f_{p,1})_w = 3300, \\ (f_{p,2})_w &= 1100, (f_{p,3})_w = 100, (f_{d,2})_w = 10, (f_{d,3})_w = 35, (\gamma_2)_w = 6000 \text{ και } (\gamma_3)_w = 10000. \end{aligned}$$

Οι παράμετροι του ελεγκτή που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του μεταερευτικού αλγορίθμου είναι

$$\begin{aligned} f_{p,1} &= 6,788.57, f_{p,2} = 2,307.571, f_{p,3} = -183.194, f_{d,2} = 15.6493, f_{d,3} = -69.487, \\ \gamma_2 &= 11,135.638, \gamma_3 = -17,852.807, \kappa = -264.5971 \text{ που αντιστοιχεί σε } J_{\min} = 0.0037 \text{ και} \end{aligned}$$

$$\|H_u(s)\|_{\infty} = 910.13.$$

Είναι σαφές ότι, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω παραμέτρους του ελεγκτή, το γραμμικοποιημένο σύστημα κλειστού βρόχου είναι ευσταθές και ο περιορισμός στην σχέση (8) ικανοποιείται. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα και εφαρμόζοντας στοιχειώδεις υπολογισμούς, μπορεί να επαληθευτεί ότι η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου που αντιστοιχίζει την εξωτερική εντολή στην έξοδο απόδοσης μπορεί να ξαναγραφεί ως

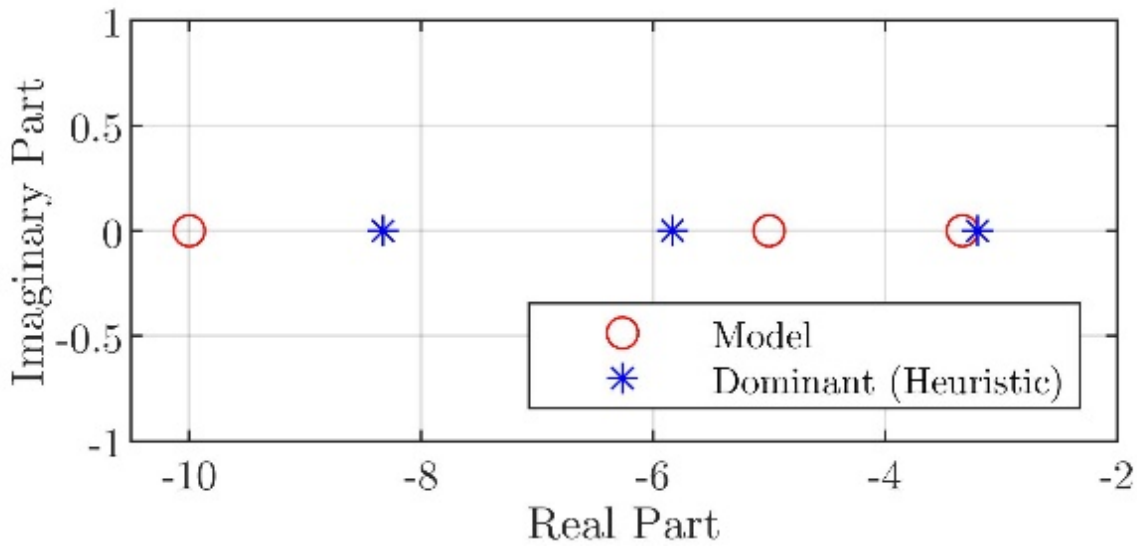
$$H_y(s) = \sum_{j=1}^5 \frac{\tilde{\beta}_j}{s + \tilde{\alpha}_j}$$

όπου

$$\tilde{\beta}_1 = 2.19626 \cdot 10^{-4}, \tilde{\beta}_2 = -1.3933 \cdot 10^{-5}, \tilde{\beta}_4 = -23.13188, \tilde{\beta}_5 = 11.3749$$

$$\tilde{\alpha}_1 = 28,015.409, \tilde{\alpha}_2 = 729.109, \tilde{\alpha}_3 = 8.329, \tilde{\alpha}_4 = 5.8334, \tilde{\alpha}_5 = 3.2007$$

Σαφώς, οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου μπορούν να χωριστούν σε ένα σύνολο κυρίαρχων και σε ένα σύνολο μη σημαντικών πόλων. Οι κυρίαρχοι πόλοι είναι οι $-\tilde{\alpha}_3$, $-\tilde{\alpha}_4$ και $-\tilde{\alpha}_5$ (βλ. Σχήμα 2) ενώ οι μη σημαντικοί πόλοι είναι $-\tilde{\alpha}_1$ and $-\tilde{\alpha}_2$.



Σχήμα 2. Διάγραμμα κυρίαρχων πόλων.

Ομοίως, η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη ως εξής:

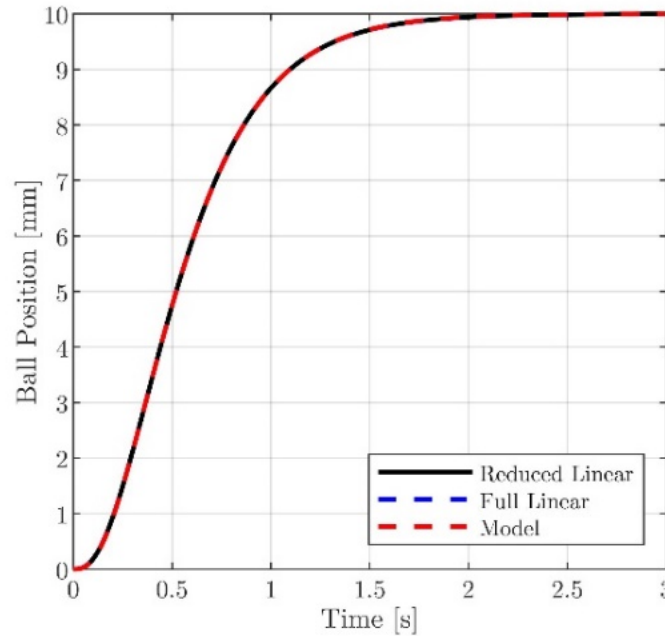
$$H_y(s) = H_{y,i}(s) + H_{y,d}(s) \quad (11)$$

όπου

$$H_{y,i}(s) = \sum_{j=1}^2 \frac{\tilde{\beta}_j}{s + \tilde{\alpha}_j}, H_{y,d}(s) = \sum_{j=3}^5 \frac{\tilde{\beta}_j}{s + \tilde{\alpha}_j}$$

Μπορεί εύκολα να επαληθευτεί ότι για μια δεδομένη εξωτερική εντολή η επίδραση του μη σημαντικού μέρους είναι ελάχιστη. Ενδεικτικά, για μια ενδεικτική βηματική εξωτερική εντολή στο σχήμα 3 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις του $H_m(s)$, $H_y(s)$ και $H_{y,d}(s)$. Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι όλες οι αποκρίσεις είναι οπτικά πανομοιότυπες, δηλαδή ότι το σύστημα κλειστού βρόχου παράγει αποκρίσεις εξαιρετικά κοντά στο ιδανικό μοντέλο και ότι μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω αποκλείοντας το μη σημαντικό τμήμα του. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ της απόκρισης του γραμμικοποιημένου συστήματος κλειστού βρόχου, χρησιμοποιώντας μόνο τους

κυρίαρχους πόλους, και του μοντέλου είναι μικρότερη από $0.01[\text{mm}]$. Επιπλέον η μέγιστη διαφορά μεταξύ της απόκρισης του πλήρους γραμμικοποιημένου συστήματος κλειστού βρόχου και της απόκρισης του γραμμικοποιημένου συστήματος κλειστού βρόχου, χρησιμοποιώντας μόνο τους κυρίαρχους πόλους είναι μικρότερη από $2 \cdot 10^{-7} [\text{mm}]$.



Σχήμα 3. Γραμμική προσέγγιση απόκριση συστήματος κλειστού βρόχου.

Προκειμένου να διερευνηθεί η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου όταν εφαρμόζεται στο αρχικό μη γραμμικό μοντέλο (1), θα επιλεγεί η εξωτερική εντολή της μορφής $w(t) = \tilde{w} + (\hat{w} - \tilde{w})u_s(t)$, όπου $\tilde{w}$ και $\hat{w}$ είναι η τιμή έναρξης και λήξης της εξωτερικής εντολής. Όσον αφορά τις αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης θα θεωρείται ότι αντιστοιχούν στις τιμές μόνιμης κατάστασης για την περίπτωση όπου $w(t) = \tilde{w}$. Εφαρμόζοντας στοιχειώδεις υπολογισμούς, μπορεί να επαληθευτεί ότι αυτές οι αρχικές τιμές είναι

$$\tilde{x}_1 = p^* + \tilde{w}, \quad \tilde{x}_2 = 0, \quad \tilde{x}_3 = \sqrt{\frac{mg}{C_m}}(p^* + \tilde{w}), \quad \tilde{u} = R_m \sqrt{\frac{mg}{C_m}}(p^* + \tilde{w})$$

ενώ παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν για τις τελικές τιμές που αντιστοιχούν σε $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t)$. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ασυμπτωτική ακολούθηση βηματικής εξωτερικής εντολής επιτυγχάνεται, εκτός από την περίπτωση του γραμμικοποιημένου συστήματος κλειστού βρόχου, και στην περίπτωση που ο ελεγκτής εφαρμόζεται στο αρχικό μη γραμμικό σύστημα. Για την ποσοτική αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου, θα χρησιμοποιηθεί ένα κριτήριο παρόμοιο με εκείνο που παρουσιάζεται στην εργασία [15]. Ειδικότερα, έστω οι συναρτήσεις κόστους

$$J_{\infty} = \frac{\|y(t) - \delta y(t) - \bar{y}\|_{\infty}}{\|\delta y(t) - \delta y(t_0) - \bar{y}\|_{\infty}} \times 100\% \quad (12a)$$

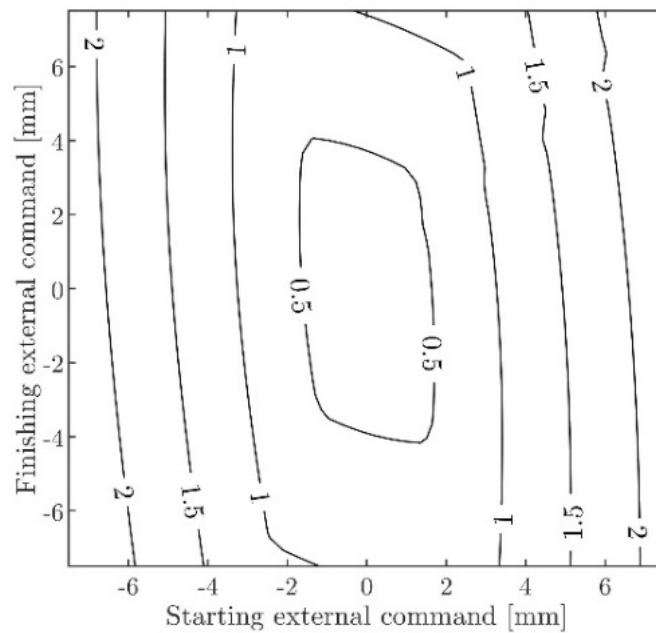
$$J_2 = \frac{\|y(t) - \delta y(t) - \bar{y}\|_2}{\|\delta y(t) - \delta y(t_0) - \bar{y}\|_2} \times 100\% \quad (12b)$$

όπου $\|f(t)\|_{\infty} = \sup_{t \in [t_0, T_{\max}]} |f(t)|$ και $\|f(t)\|_2^2 = \int_{t_0}^{T_{\max}} f(t)^2 dt$. Η παράμετρος $T_{\max}$ επιλέγεται ώστε να είναι

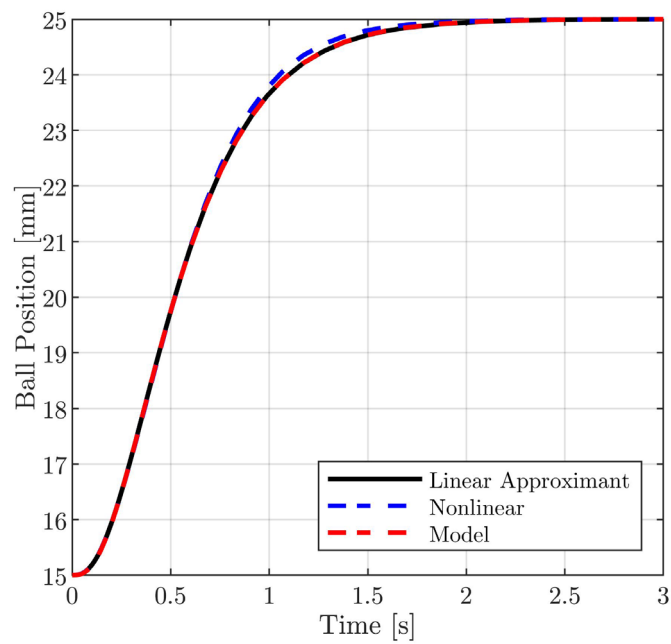
ίση με τον χρόνο που απαιτείται για να φθάσει η απόκριση του μοντέλου γύρω από την τιμή της σταθερής κατάστασης σε μια ζώνη μικρότερη κατά 1 % από το πλάτος βηματικής εξωτερικής εντολής. Εφαρμόζοντας στοιχειώδεις υπολογισμούς μπορεί να επαληθευτεί ότι $T_{\max} = 1.82[\text{sec}]$. Το συνολικό κριτήριο ορίζεται ως

$$\tilde{J} = (1 - \mu) J_{\infty} + \mu J_2 \quad (13)$$

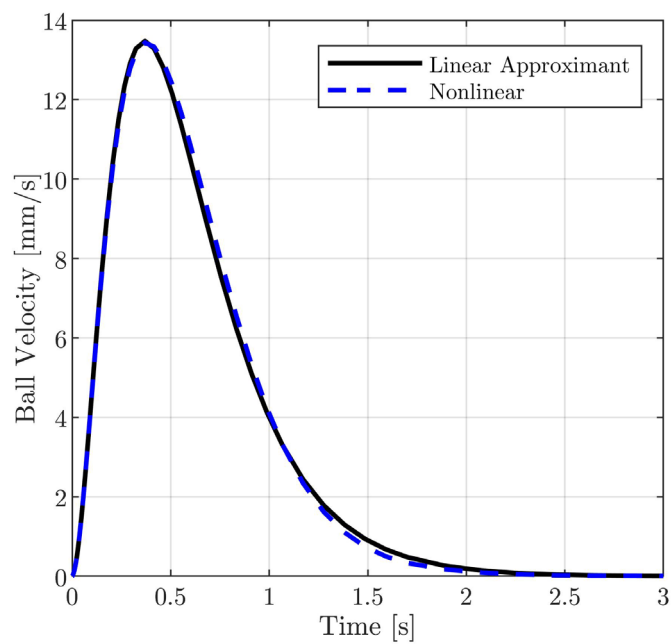
Επιλέγοντας $\mu = 0.3$ (βλέπε [15]) και εκτελώντας σειρές υπολογιστικών πειραμάτων, μπορεί να προκύψει το διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών του συνολικού κριτηρίου (13) (βλ. Σχήμα 4). Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι το σφάλμα μεταξύ της απόκρισης του μη γραμμικού συστήματος κλειστού βρόχου και της απόκρισης του γραμμικοποιημένου συστήματος κλειστού βρόχου είναι μικρό για ένα ευρύ φάσμα αρχικών και τελικών τιμών της εξωτερικής εντολής. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι όλες οι μεταβλητές κατάστασης και εισόδου παραμένουν κατάλληλα οριοθετημένες. Ενδεικτικά, στα Σχήματα 5 έως 8 παρουσιάζεται η απόκριση κλειστού βρόχου για $\tilde{w} = 0[\text{mm}]$ και $\hat{w} = 10[\text{mm}]$.



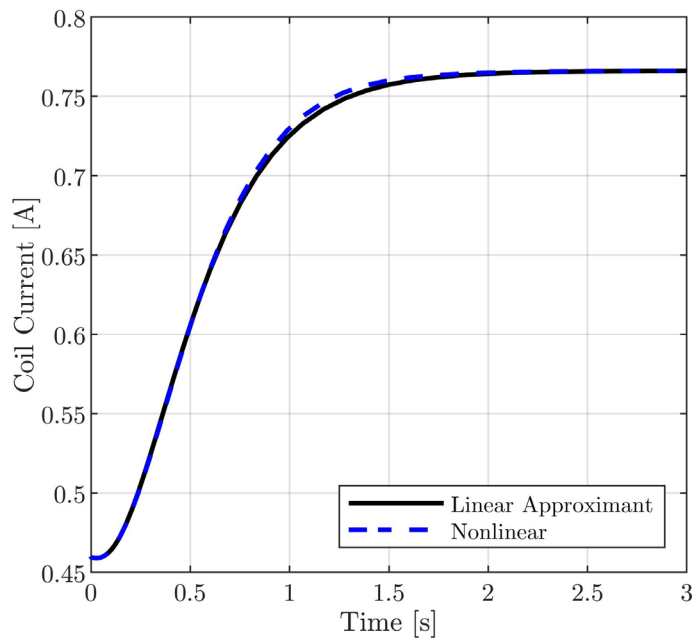
Σχήμα 4. Διάγραμμα περιγράμματος της μέτρησης απόδοσης.



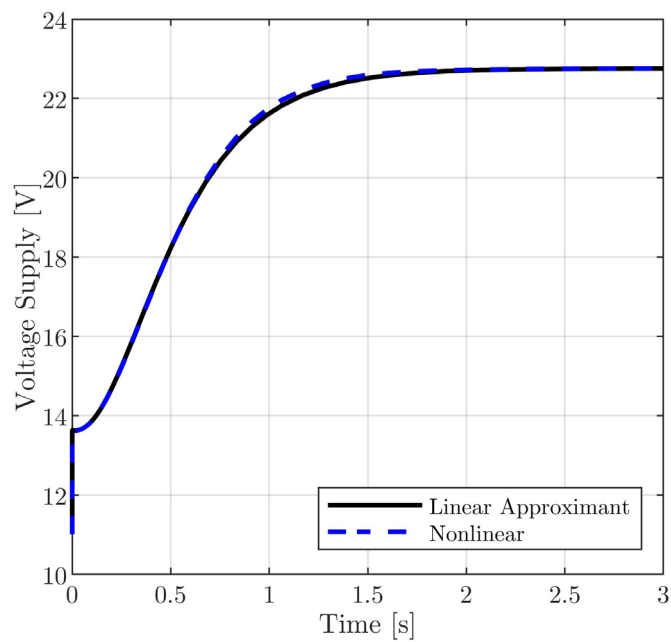
Σχήμα 5. Θέση μπάλας κλειστού βρόχου



Σχήμα. 6. Ταχύτητα μπάλας κλειστού βρόχου



Σχήμα 7. Ρεύμα πηνίου κλειστού βρόχου



Σχήμα 8. Τροφοδοσία τάσης κλειστού βρόχου

2.5 Συμπεράσματα

Το πρόβλημα του ελέγχου της θέσης μιας μαγνητικά αιωρούμενης σφαίρας μελετήθηκε μέσω ενός γραμμικού ελεγκτή ανατροφοδότησης κατάστασης τύπου PD και της ταυτόχρονης ικανοποίησης ενός συνόλου μεμονωμένων σχεδιαστικών απαιτήσεων, συμπεριλαμβανομένης της ευστάθειας, της ασυμπτωτικής ακολούθησης βηματικής εξωτερικής εντολής, της παραγωγής από τον ελεγκτή φραγμένων σημάτων εισόδου και του κατά προσέγγιση ταιριάσματος του γραμμικοποιημένου

συστήματος κλειστού βρόχου σε ένα επιθυμητό μοντέλο. Οι απαιτήσεις ορίστηκαν πάνω στην γραμμικοποιημένη προσέγγιση του συστήματος μαγνητικής αιώρησης. Επίσης, για την επίλυση του προβλήματος έχει προταθεί ένας μεταερευτικός αλγόριθμος, βασισμένος στη γραμμικοποιημένη προσέγγιση του συστήματος μαγνητικής αιώρησης. Παρόλο που ο ελεγκτής έχει σχεδιαστεί με βάση τη γραμμικοποιημένη προσέγγιση του συστήματος, η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου, όταν εφαρμόζεται στο αρχικό μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος, αποδείχθηκε μέσω πλήθους υπολογιστικών πειραμάτων ότι συμπεριφέρεται ικανοποιητικά, ακόμη και για μεγάλες εξωτερικές εντολές. Η επέκταση της προτεινόμενης εδώ προσέγγισης σε ένα μεγαλύτερο εύρος εξωτερικών εντολών με χρήση ελεγκτών ασφαλούς μεταγωγής ή κοινών ελεγκτών μεταξύ διαφορετικών ονομαστικών τιμών είναι υπό διερεύνηση (βλ. [40] [41]).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με το πρόβλημα του ελέγχου των μεταβλητών απόδοσης ενός συστήματος μαγνητικής αιώρησης. Ειδικότερα, η εργασία δομήθηκε σε τρία κεφάλαια.

- Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση εφαρμογών συστημάτων μαγνητικής αιώρησης. Τέτοιου τύπου εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν μεταξύ άλλων τραίνα μαγνητικής αιώρησης, συστήματα εκτόξευση πυραύλων, καρδιακές αντλίες, μαγνητικά ρουλεμάν, συστήματα ανάλυσης τροφίμων, ιπτάμενα αυτοκίνητα, ανεμογεννήτριες, ανελκυστήρες μαγνητικής αιώρησης, πλυντήριο ρούχων με τεχνολογία μαγνητικής αιώρησης και 3D κυτταροκαλλιέργειες.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετήθηκε το πρόβλημα του ελέγχου της θέσης μιας μαγνητικά αιωρούμενης μεταλλικής σφαίρα. Με βάση το μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος μαγνητικής αιώρησης, παρήχθη η αντίστοιχη γραμμικοποιημένη προσέγγιση. Για τον έλεγχο της απόδοσης του συστήματος προτάθηκε ένας ελεγκτής τύπου PD ο οποίος χρησιμοποιούσε προσεγγιστική υλοποίηση του όρου της παραγώγου. Η σκοπιμότητα της χρήσης του όρου της παραγώγου ήταν η αποφυγή προβλημάτων που πιθανώς να δημιουργούνταν από την παρουσία θορύβου υψηλών συχνοτήτων στις μετρήσιμες μεταβλητές. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου στόχευε στην επίτευξη ευστάθειας για το σύστημα κλειστού βρόχου, ασυμπτωτικής ακολούθησης βηματικής εξωτερικής εντολής, φραγμένης ενεργοποιήσιμης εισόδου και την επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή ώστε το γραμμικοποιημένο σύστημα κλειστού βρόχου να προσεγγίζει την συμπεριφορά μιας συνάρτησης μεταφοράς μοντέλο. Οι παραπάνω στόχοι ικανοποιήθηκαν επιλέγοντας τους βαθμούς ελευθερίας του ελεγκτή μέσω κατάλληλου μεταευρετικού αλγορίθμου. Αποδείχθηκε μέσω πλήθους υπολογιστικών πειραμάτων ότι παρά το γεγονός ότι ο ελεγκτής σχεδιάστηκε με βάση την γραμμικοποιημένη προσέγγιση του συστήματος, η απόδοσή του παρέμεινε ικανοποιητική όταν εφαρμόστηκε στο αρχικό μη γραμμικό σύστημα, ακόμη και για μεγάλα πλάτη εξωτερικών εντολών.
- Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε σύνοψη των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Wikipedia.
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B1%CE%B9%CF%8E%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B7
- [2] The 1st International Conference on railway Engineering, High speed Railway, Heavy Haul Railway and Urban Rail Transit, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, China Railway Publishing House. Behbahani H. & Yaghoubi H.
- [3] Analysis of levitational systems for a superconducting launch ring. Applied Superconductivity Conference, Seattle. Hull J. R. & Fiskie J. & Ricci K. & M.
- [4] Sensorless measurement of pulsatile flow rate using a disturbance force observer in a magnetically levitated centrifugal blood pump during ventricular assistance. Flow Measurement and Instrumentation. Pai C.N., Shishi T., Shimokohbe A.
- [5] Special Issue on Magnetic Bearing Control, IEEE Trans. Control System Technology.
- [6] Magnetic levitation in the analysis of foods and water. Journal of Agricultural and food chemistry. Mirica K.A., Philips S. T., Mace C. R., Whitesides G. M.
- [7] Wikipedia
<https://en.wikipedia.org/wiki/SkyTran>
- [8] Modeling and decoupling control for rotor system in magnetic levitation wind turbine. School of Electrical and Information Engineering. Yanjun Y., Xiaodong S. Weiyu Z.
- [9] Magnetically levitated space elevator to low earth orbit. Nagano, Japan. Hull J.R., Mulcahy T.m.
- [10] Comparison of Dynamic Responses for IPM and SPM Motors by Considering Mechanical and Magnetic Coupling. IEEE Transactions on magnetic, vol 37, No 4, Kim T. J., Hwang S.M., Jung W.
- [11] Biofabrication of in situ self assembled 3D cell cultures in a weightlessness environment generated using magnetic levitation, Muge A.I., Yaman S., Yildiz A.A., Mese G.
- [12] W. Barie and J. Chiasson, "Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation," International Journal of Systems Science, vol. 27, no. 11, pp. 1153-1163, 1996.
- [13] G. L. Giannaris, N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis and D. Vouyioukas, "Towards Remote Control of Planar Redundant Robotic Manipulators," Proceedings of the IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES 2017), pp. 231-236, Larnaca, Cyprus, October 20-23, 2017.

- [14] F. N. Koumboulis and N. D. Kouvakas, "A three term controller for ride comfort improvement, Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), pp. 114-119, Corfu, Greece, June 20-23, 2011.
- [15] G. L. Giannaris, N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis and D. Vouyioukas, "Switching wireless control for longitudinal quadrotor maneuvers," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 102:42, 2021.
- [16] J. H. Li, "Fuzzy PD type control of magnetic levitation system," *Proceedings of the 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 2052-2057, Taichung, Taiwan, June 15-17, 2010.
- [17] A. M. Benomair and M. O. Tokhi, "Control of single axis magnetic levitation system using fuzzy logic control," *Proceedings of the 2015 Science and Information Conference (SAI)*, pp. 514-518, London, UK, July 28-30, 2015.
- [18] J. S. de León, R. G. Hernández and M. Á. L. Leal, "BFO-GA Interval Type-2 Fuzzy PD Control applied to a Magnetic Levitation System," *Proceedings of the 2020 17th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, Mexico City, Mexico, November 11-13, 2020.
- [19] D.S Shuaibu, H. Rabiou and N. Shehu, "Efficient fuzzy logic controller for magnetic levitation systems," vol. 13, no. 2, pp. 50-57, 2016.
- [20] T.-E. Lee, J.-P. Su and K.-W. Yu, "A practical design of fuzzy PD controller and its application to magnetic levitation system," *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 2018-2023, Singapore, October 12-15, 2008.
- [21] N. Magaji and J. L. Sumaila, "Fuzzy logic controller for magnetic levitation system," *Proceedings of the 2014 IEEE 6th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, Ota, Nigeria, October 29-31, 2014.
- [22] D. Sain and B. M. Mohan, "Simulation and real-time implementation of a nonlinear fuzzy PI/PD controller," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 1, pp. 673-678, 2020.
- [23] P. Majewski, D. Pawuś, K. Szurpicki and W. P. Hunek, "Toward Optimal Control of a Multivariable Magnetic Levitation System," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 1-14, 2022.
- [24] W. Bauer and J. Baranowski, "Fractional PI λ D Controller Design for a Magnetic Levitation System," *Electronics*, vol. 9, no. 20, pp. 1-15, 2020.
- [25] A. S. Chopade, J. Laldingliana, A. S. Junghare and M. V. Aware, "Hardware in Loop, real time implementation of Fractional Order PID controller on Magnetic Levitation System,"

Proceedings of the Symposium on Advances in Control & Instrumentation (SACI-2014), Mumbai, India, November 24-26, 2014.

- [26] A. S. Chopade, S. W. Khubalkar, A. S. Junghare, M. V. Aware and S. Das, "Design and implementation of digital fractional order PID controller using optimal pole-zero approximation method for magnetic levitation system," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5, no. 5, pp. 977-989, 2018.
- [27] D. Sain, S. K. Swain and S. K. Mishra, "Real time implementation of optimized I-PD controller for the magnetic levitation system using Jaya algorithm," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 1, pp. 106-111, 2018.
- [28] H. I. Ali, "Robust PI-PD controller design for magnetic levitation system," *Engineering and Technology Journal*, vol. 32, no. 3, pp. 667-680, 2014.
- [29] A. S. C. Roong, C. Shin-Homg and M. A. B. Said, "Position control of a magnetic levitation system via a PI-PD control with feedforward compensation," *Proceedings of the 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, pp. 73-78, Kanazawa, Japan, September 19-22, 2017.
- [30] A. R. Moreno and C. Cuevas-Condor, "PD and PID control of a maglev system an experimental comparative study," *Proceedings of the 2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Cusco, Peru, August 15-18, 2017.
- [31] K. A. Alia and M. Abdelatib, "Magnetic levitation of iron sphere using analog PD controller," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1107, pp. 329-333, 2009.
- [32] F. Tian, K. Craig and M. Nagurka, "Disturbance attenuation in a magnetic levitation system with acceleration feedback," *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 59-63, Auburn, USA, March 14-16, 2011.
- [33] M. Hypiusová and A. Kozáková, "Robust PID controller design for the magnetic levitation system: Frequency domain approach," *Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, pp. 274-279, Strbske Pleso, Slovakia, June 6-9, 2017.
- [34] Ö. F. Güney, A. F. Bozkurt and K. Erkan, "3-DOF Centralized I-PD Control of Nonlinear Magnetic Levitation System," *Proceedings of the XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, Valencia, Spain, September 10-12, 2015.
- [35] J. E. Martínez and C. L. Bedoya, "Simulation and control design of an uniaxial magnetic levitation system," *Proceedings of the 2012 IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS)*, Barranquilla, Colombia, November 1-2, 2012.

- [36] S. Pandey, A. Junghare, P. Dwivedi and N. K. Soni, "Experimental demonstration of anti-windup controller for non-linear magnetic levitation system," Proceedings of the 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), Indore, India, August 17-19, 2017.
- [37] M. Irshad and A. Ali, "Robust PI-PD controller design for integrating and unstable processes," IFAC-PapersOnLine, vol. 53, no. 1, pp. 135-140, 2020.
- [38] M. Hypiusová and J. Osuský, "PID Controller Design for Magnetic Levitation Model," Proceedings of the International Conference Cybernetics and Informatics, Vyšná Boca, Slovak Republic, February 10-13, 2010.
- [39] H. Yaghoubi, "The Most Important Maglev Applications," Journal of Engineering, vol. 2013, Article ID 537986, 2013.
- [40] F. N. Koumboulis, On the heuristic design of common PI controllers for multi-model plants, Proceedings of the 2005 IEEE Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 975-982, Catania, Italy, September 19-22, 2005.
- [41] F. N. Koumboulis, R. E. King and A. Stathaki, "Logic-Based Switching Controllers – A Stepwise Safe Switching Approach," Information Sciences, vol. 177, no. 13, pp. 2736–2755, 2007.