



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

---

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ  
ΑΙΩΡΗΣΗΣ

---

υπό

**ΜΠΕΚΗΡ ΡΙΤΒΑΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για  
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2020

© 2020 ΜΠΕΚΗΡ ΡΙΤΒΑΝ

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής  
(Επιβλέπων)

Δρ. Αμπουντώλας Κωνσταντίνος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Παντελής Δημήτριος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Σαχαρίδης Γεώργιος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αμπουντώλα Κωνσταντίνο, για την παρότρυνσή του να ασχοληθώ με το θέμα και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Πάνω απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου , Μπεκήρ Ομέρ και Βιντηνλή Σεβτσάν καθώς και τον αδερφό μου Μπεκήρ Ενές για την ολόψυχη αγάπη και την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον Ιωάννη Γιουρέλη για την καθοριστική του βοήθεια, ο οποίος στάθηκε πάντα δίπλα μου σε όλες μου τις προσπάθειες και με υποστήριξε σε κάθε φάση της ζωής μου. Ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης, αφιερώνω την διπλωματική μου εργασία σε αυτόν.



ΜΠΕΚΗΡ ΡΙΤΒΑΝ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2020

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αμπουντώλας Κωνσταντίνος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Περίληψη

Η τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης, αποτελεί μια προηγμένη και ενδιαφέρουσα τεχνολογία παρέχοντας εφαρμογές σε διάφορα πεδία. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της αιώρησης κάποιου αντικειμένου χωρίς καμία υποστήριξη, πέραν των μαγνητικών πεδίων. Το κοινό σημείο σε όλες τις εφαρμογές είναι η έλλειψη της μηχανικής επαφής, που καθιστά δυνατή την εξάλειψη της τριβής. Είναι γνωστό ότι οι δυνάμεις τριβής μεταξύ των επιφανιών αποτελούν βασική αιτία φθοράς και απώλειας ενέργειας, μειώνοντας σημαντικά την απόδοση των μηχανικών συστημάτων.

Μια από τις εφαρμογές της μαγνητικής αιώρησης που θα μελετηθεί σε αυτή την διπλωματική, είναι η χρήση της τεχνολογίας στα τρένα Maglev. Τα τρένα αυτά, γνωστά και ως τρένα μαγνητικής αιώρησης, έχουν τη δυνατότητα να κινούνται κατά μήκος μαγνητικών πεδίων, χωρίς να εφάπτονται με τις ράγες. Η απουσία επαφής, εξαλείφει την τριβή, καθιστώντας το ένα από τα ταχύτερα μεταφορικά μέσα.

Για την διατήρηση του κενού μεταξύ επιφανειών, τα συστήματα μαγνητικής αιώρησης βασίζονται στους ελεγκτές ανατροφοδότησης. Ο σχεδιασμός τέτοιων ελεγκτών είναι πολύ απαιτητικός, καθώς από την φύση τους τα συστήματα αυτά είναι μη γραμμικά και ασταθή. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η γραμμικοποίηση του μη γραμμικού μοντέλου γύρω από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας, η σχεδίαση και η βελτιστοποίηση ενός ελεγκτή που θα εγγυάται σταθερότητα και την επιθυμητή απόδοση του συστήματος παρά τις εξωτερικές διαταραχές.

**Λέξεις-κλειδιά:** Μαγνητική αιώρηση, Αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής, Μαγνήτες, Τρένα, Hyperloop, Υπολογιστική Νοημοσύνη.





BEKIR RIDVAN

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2020

Supervisor: Dr Konstantinos Ampountolas  
Associate Professor, Department of Mechanical Engineering,  
University of Thessaly

## Abstract

Magnetic levitation is an advanced and interesting technology which provides applications in various fields. This method is based on the natural phenomenon of lifting an object without any support, except from magnetic fields. The common point in all applications is the lack of mechanical contact, which makes it possible to eliminate friction. It is known that frictional forces between surfaces are the main cause of wear and energy loss, significantly reducing the efficiency of mechanical systems.

One of the applications of magnetic levitation which will be studied in this thesis, is the use of technology in Maglev trains. These trains, also known as magnetically levitated trains, have the ability to move along magnetic fields without touching the rails. The absence of contact eliminates friction, making it one of the fastest means of transport.

To maintain the gap between surfaces, magnetic suspension systems rely on feedback controllers. The design of such controllers is very demanding, as by their nature these systems are non-linear and unstable. The purpose of this thesis is to linearize the non-linear model around the nominal operating point, design and optimize a controller that will guarantee stability and the desired performance of the system despite external disturbances.

**Key words:** Magnetic levitation (Maglev), PID Controller, Magnets, Trains, Hyperloop, Computational Intelligence.



# Πίνακας περιεχομένων

---

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	17
1.1 Γενική ανασκόπηση.....	17
1.2 Η έννοια του μαγνητισμού.....	18
1.3 Η τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης .....	18
1.4 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας .....	19
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση .....	21
2.1 Τρένα μαγνητικής αιώρησης.....	21
2.1.1 Σύστημα αναρτήσεων.....	22
2.1.2 Προώθηση .....	27
2.1.3 Προσανατολισμός.....	28
2.1.4 Μαγνήτες.....	28
2.1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του τρένου Maglev .....	29
2.2 Hyperloop.....	30
2.2.1 Η τεχνολογία Hyperloop .....	30
2.2.2 Τα βασικότερα τμήματα του συστήματος .....	32
2.2.3 Εκτίμηση κόστους της διαδρομής Σαν Φρανσίσκο-ΛΑ .....	34
2.2.4 Διαγωνισμός Hyperloop Pod .....	38
2.3 Σύνοψη και συμπεράσματα .....	40
Κεφάλαιο 3. Πείραμα μαγνητικής αιώρησης .....	41
3.1 Περιγραφή του συστήματος μαγνητικής αιώρησης .....	41
3.2 Γραμμικοποίηση του συστήματος μαγνητική αιώρησης .....	43
3.3 Σύνοψη και συμπεράσματα .....	49
Κεφάλαιο 4. Έλεγχος μαγνητικής αιώρησης .....	51
4.1 Εισαγωγή στους ελεγκτές.....	51
4.2 Τα είδη ελεγκτών και η λειτουργία τους.....	51
4.3 Έλεγχος συστήματος μαγνητικής αιώρησης .....	54
4.4 Ανάπτυξη γραμμικού μοντέλου του μαγνήτη .....	55
4.5 Γραμμικοποίηση και ανάπτυξη της δυναμικής του συστήματος .....	57
4.6 Έλεγχος ευστάθειας του γραμμικού μοντέλου .....	59
4.6.1 Αντικατάσταση προδιαγραφών και των μετρήσεων στο σύστημα ελέγχου.....	61

4.7 Η τελική μορφή μοντελοποίησης.....	66
4.8 Μοντέλο του πραγματικού συστήματος.....	72
4.9 Αποτελέσματα.....	76
Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες.....	82
5.1 Σύνοψη της διπλωματικής εργασίας.....	82
5.2 Συμπεράσματα.....	82
5.3 Μελλοντικές εργασίες.....	84
Παράρτημα.....	85
Βιβλιογραφία.....	91

# Κατάλογος Σχημάτων

---

Σχήμα 1.1: Μονάδα μαγνητικής αιώρησης.....	19
Σχήμα 2.1: Τα κύρια τμήματα του τρένου μαγνητικής αιώρησης. ....	21
Σχήμα 2.2: Η λειτουργία του τρένου με ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση.....	22
Σχήμα 2.3: Η λειτουργία του τρένου με ηλεκτροδυναμικές αναρτήσεις. ....	23
Σχήμα 2.4: Η λειτουργία του τρένου με μόνιμους μαγνήτες.....	25
Σχήμα 2.5: Γραμμικά σύγχρονος κινητήρας.....	27
Σχήμα 2.6: Πρωτότυπο μοντέλο τεχνολογίας Hyperloop. ....	31
Σχήμα 2.7: Θερμοδυναμικός κύκλος του συμπιεστή.....	32
Σχήμα 2.8: Χαλύβδινοι σωλήνες και οι πυλώνες. ....	34
Σχήμα 2.9: Ο Διαγωνισμός Hyperloop Pod. ....	38
Σχήμα 2.10: Πρωτότυπο σχέδιο της TUM για τον διαγωνισμό Hyperloop Pod.....	39
Σχήμα 3.1: Μηχανική μονάδα του πειράματος.....	41
Σχήμα 3.2: Σχηματική παράσταση της μονάδας μαγνητικής αιώρησης. ....	43
Σχήμα 3.3: Οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς με είσοδο του ρεύματος. ....	47
Σχήμα 3.4: Οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς με είσοδο την τάση του πηνίου. ....	48
Σχήμα 3.5: Γραμμικοποιημένο μοντέλο του συστήματος. ....	48
Σχήμα 4.1: Το διάγραμμα block του αναλογικού όρου. ....	52
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα block του ολοκληρωτικού όρου.....	52
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα block του PID ελεγκτή. ....	53
Σχήμα 4.5: Μαγνήτης ανύψωσης.....	55
Σχήμα 4.6: Οι πόλοι και τα μηδενικά του αρχικού μοντέλου.....	59
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα block του γραμμικού ελεγκτή.....	62
Σχήμα 4.8: Απλοποιημένο διάγραμμα block του γραμμικού ελεγκτή.....	63
Σχήμα 4.10: Μοντέλο του συστήματος Simulink. ....	69
Σχήμα 4.11: Συμπεριφορά του συστήματος στις διαταραχές. ....	70
Σχήμα 4.12: Μεγέθυνση του σχήματος 4.11. ....	70
Σχήμα 4.13: Σήμα εισόδου της κλίσης. ....	71
Σχήμα 4.14: Γεωμετρία του συνολικού συστήματος Maglev.....	72
Σχήμα 4.15: Έλεγχος του συνολικού συστήματος στις διαταραχές.....	79
Σχήμα 4.16: Ανταπόκριση του συστήματος στην δύναμη ανέμου.....	79
Σχήμα 4.17: Η συμπεριφορά της ανύψωσης στην κλίση της ράγας.....	80

## Κατάλογος Πινάκων

---

Πίνακας 2.1: Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών αιώρησης.....	25
Πίνακας 2.2: Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τριών μεθόδων αιώρησης.....	26
Πίνακας 2.3: Ιδιότητες μαγνητών.....	28
Πίνακας 2.4: Εκτίμηση κόστους μεταφοράς επιβατών Hyperloop.....	35
Πίνακας 2.5: Εκτίμηση κόστους μεταφοράς εμπορευμάτων Hyperloop. ....	37
Πίνακας 3.1: Παράμετροι του πειράματος. ....	42
Πίνακας 3.2: Μεταβλητές εξισώσεων του πειράματος. ....	46
Πίνακας 4.1: Παράμετροι του αρχικού μοντέλου.....	58
Πίνακας 4.2: Παράμετροι του συστήματος. ....	66

## Πίνακας Συντομεύσεων

---

- MAGLEV – Magnetic Levitation – Μαγνητική Αιώρηση.
- EMS – Electromagnetic Suspension – Ηλεκτρομαγνητική Ανάρτηση.
- EDS – Electrodynamic Suspension – Ηλεκτροδυναμική Ανάρτηση.
- PM – Permanent Magnets – Μόνιμοι Μαγνήτες.
- LIM – Linear Induction Motor – Γραμμικά Επαγωγικός Κινητήρας.
- LSM – Linear Synchronous Motor – Γραμμικά Σύγχρονος Κινητήρας.
- ALNICO – Aluminum Nickel Cobalt – Αλουμίνιο Νικέλιο Κοβάλτιο.
- P control – Proportional Control – Αναλογικός Έλεγχος.
- I control – Integral Control – Ολοκληρωτικός Έλεγχος.
- D control – Differential Control – Διαφορικός Έλεγχος.
- PID control – Three Term Controller – Ελεγκτής Τριών Μεθόδων.
- HTS – High Temperature Superconductors – Υπεραγωγοί Υψηλής Θερμοκρασίας.
- K – Magnetic Constant – Μαγνητική Σταθερά.
- MIMO – Multiple Input Multiple Output – Πολλαπλή Είσοδο Πολλαπλή Έξοδο.





# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενική ανασκόπηση

Η πληρέστερη κατανόηση του θέματος της εργασίας, απαιτεί, αρχικά, την παροχή γνώσεων σχετικά με την αρχή λειτουργίας και με τα βασικά τμήματα από τα οποία απαρτίζεται ένα τρένο τύπου “Maglev”. Η έλλειψη της μηχανικής επαφής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα, διότι με αυτό τον τρόπο πολλά προβλήματα των σημερινών συμβατικών τρένων εξαλείφονται. Παρόλο που οι εφαρμογές της τεχνολογίας βρίσκονται ακόμα σε αρχικό στάδιο, η ταχύτητα, η ποιότητα και η ασφάλεια μεταφοράς, το καθιστούν πολύ ανταγωνιστικό. Έτσι λοιπόν, η τεχνολογία αυτή γίνεται όλο ένα πιο δημοφιλής και προσελκύει το ενδιαφέρον πολλών εταιρειών. Εκτός από την εφαρμογή της στα τρένα, η τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης έχει πολλές άλλες εφαρμογές, όπως είναι οι ανεμοστρόβιλοι, τα μαγνητικά ρουλεμάν, ενώ εφαρμόζεται ακόμα και στον τομέα της διαστημικής.

Από το 2015 έως και σήμερα, διοργανώνεται ο διαγωνισμός Hyperloop Pod που χρηματοδοτείται από την εταιρεία SpaceX. Ο διαγωνισμός αυτός πραγματοποιείται κάθε χρόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, με συμμετέχοντες από όλο το κόσμο, έχοντας ως στόχο την κατασκευή ενός πρωτότυπου οχήματος μεταφοράς. Βασιζόμενοι στις υπάρχουσες έννοιες, οι ομάδες μπορούν να φτάσουν σε ένα υψηλότερο τεχνολογικό επίπεδο, εφαρμόζοντας καινοτομίες που μια μέρα πιθανόν να χρησιμοποιηθούν σε hyperloop πλήρους κλίμακας. Ευελπιστούμε στο άμεσο μέλλον το Πανεπιστήμιο μας να αδράξει την ευκαιρία και να συμμετάσχει στο διαγωνισμό, εκπροσωπώντας μας παγκοσμίως με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής, επιτεύχθηκε ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός ελεγκτή για να καθοδηγήσει ένα πραγματικό σύστημα τρένου μαγνητικής αιώρησης. Στην αρχή, αναλύθηκε η δυναμική των μαγνητών και καθορίστηκαν οι αντίστοιχες εξισώσεις του συστήματος. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ο ελεγκτής PID με ανάδραση επιτάχυνσης, έτσι ώστε να διατηρηθεί το διάκενο στις επιθυμητές τιμές. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό Matlab, παρατηρείται ότι ο σχεδιαζόμενος ελεγκτής είναι στη θέση να διορθώσει το σφάλμα, το οποίο προκύπτει από τις εξωτερικές διαταραχές.

## 1.2 Η έννοια του μαγνητισμού

Ο μαγνητισμός αποτελεί έναν από τους βασικότερους κλάδους της φυσικής που μελετά τις δυνάμεις των κινούμενων ηλεκτρικών φορτίων. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να είναι ελκτικές ή απωστικές και οφείλονται στη σχετική κίνηση δύο ή περισσότερων ηλεκτρικών φορτίων. Ειδικότερα, ένας μαγνήτης έχει δύο πόλους, το βόρειο και το νότιο, οι οποίοι εμφανίζουν το χαρακτηριστικό απώθησης των ίδιων πόλων και την έλξη των αντίθετων, όπως γίνεται και στα ηλεκτρικά φορτία. Έτσι, λοιπόν δημιουργούν γύρω τους ένα μαγνητικό πεδίο, μια περιοχή, στην οποία ο μαγνήτης μπορεί να ασκεί τις δυνάμεις αυτές.

Τα υλικά που επηρεάζονται ελάχιστα ή και καθόλου από το μαγνητικό πεδίο θεωρούνται μη μαγνητικά υλικά, όπως είναι ο χαλκός, το πλαστικό και το αλουμίνιο. Αντίθετα, τα πιο γνωστά υλικά με μαγνητικές ιδιότητες είναι ο σίδηρος και το νικέλιο. Η αυξομείωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο υλικό, ορίζεται ως μαγνητική διαπερατότητα. Πρόκειται για ένα διακριτικό χαρακτηριστικό, αφού παίρνει διαφορετικές τιμές και συμβολίζεται με «μ».

Από τα αρχαία κίολας χρόνια, οι Έλληνες και οι Ρωμαίοι γνώριζαν ότι η σιδερένια πέτρα, ένα ορυκτό πλούσιο σε σίδηρο, θα μπορούσε να προσελκύσει άλλα σιδερένια κομμάτια, ενώ οι αρχαίοι Κινέζοι έκαναν μαγνητικές πυξίδες ενσωματωμένες σε περίπλοκους ξύλινους καπλαμάδες για εφαρμογές έργων τέχνης Feng Shui. Στις μέρες μας, ο μαγνητισμός χρησιμοποιείται σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές όπως είναι η αιώρηση, στην οποία θα αναφερθεί η διπλωματική αυτή.

## 1.3 Η τεχνολογία της μαγνητικής αιώρησης

Η μαγνητική αιώρηση είναι μια μέθοδος που αποτελεί την αιώρηση ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας μαγνητικά πεδία, χωρίς καμία άλλη υποστήριξη. Η χρήση των μαγνητικών δυνάμεων έχει στόχο την εξάλειψη των επιδράσεων της επιτάχυνσης της βαρύτητας και τυχόν άλλων επιταχύνσεων. Τα βασικότερα ζητήματα της τεχνολογίας είναι οι ανυψωτικές δυνάμεις και η σταθερότητα του συστήματος, έτσι ώστε να παρέχονται οι αντίστοιχες δυνάμεις και να εξασφαλίζεται η μη-ολίσθηση και η αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Αποτελεί μία προηγμένη και ενδιαφέρουσα τεχνολογία παρέχοντας εφαρμογές σε διάφορα πεδία. Το κοινό σημείο σε όλες τις εφαρμογές είναι η έλλειψη της επαφής, που σημαίνει ότι δεν θα υπάρχουν τριβές και φθορές. Η έλλειψη αυτή έχει σαν αποτέλεσμα να αυξήσει την απόδοση του συστήματος και ταυτόχρονα να μειώσει το κόστος συντήρησης. Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον από πολλές χώρες και βιομηχανίες για την χρήση και βελτίωση της τεχνολογίας μαγνητικής αιώρησης, διότι μπορεί να θεωρηθεί ως λύση σε διάφορα προβλήματα και να καλύψει τις μελλοντικές ανάγκες της μηχανικής.



Σχήμα 1.1: Μονάδα μαγνητικής αιώρησης.

## 1.4 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Τα επόμενα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας έχουν ως εξής :

- Κεφάλαιο 2: γίνεται μια γενική ανάλυση της λειτουργίας του τρένου Maglev και ορίζονται τα βασικά τμήματα που αποτελούν ένα τέτοιο τρένο. Έπειτα, παρουσιάζεται αναλυτικά η τεχνολογία και ο διαγωνισμός Hyperloop.
- Κεφάλαιο 3: Θα ακολουθήσει η περιγραφή του συστήματος μαγνητικής αιώρησης, με αφορμή ένα πείραμα, στο οποίο το αιωρούμενο αντικείμενο είναι μια ατσάλινη σφαίρα. Λόγω της φύσης του προβλήματος το σύστημα είναι μη γραμμικό και ασταθές, για αυτό το λόγω αρχικά το σύστημα θα γραμμικοποιηθεί και στη συνέχεια θα ελεγχθεί η ευστάθειά του.
- Κεφάλαιο 4: Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά θα σχεδιαστεί ένας ελεγκτής PID με ανάδραση επιτάχυνσης και θα μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος στις εξωτερικές διαταραχές. Θα γίνει η περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του περιβάλλοντος Matlab-Simulink. Συγκεκριμένα, αναλύονται δύο περιπτώσεις,

η πρώτη αφορά τη συμπεριφορά του συστήματος για ένα απλό μαγνήτη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση θα μελετήσουμε ένα πραγματικό σύστημα με 12 ομάδες μαγνητών.

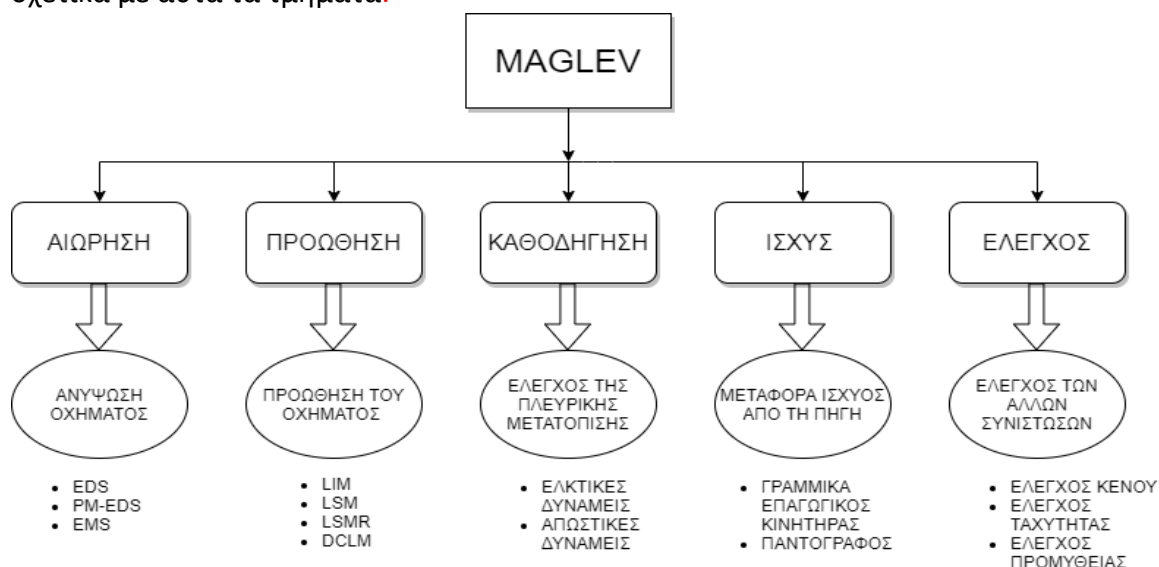
- Κεφάλαιο 5: γίνεται ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση και εξάγονται τα συμπεράσματα σχετικά με τα αποτελέσματα αυτά. Τέλος , διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

# Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

## 2.1 Τρένα μαγνητικής αιώρησης

Τα πρώτα βήματα της τεχνολογίας της μαγνητικής αιώρησης ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Η εξέλιξη της καινοτόμου τεχνολογίας αυτής πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία, στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ. Στις πρώτες δεκαετίες υπερίσχυαν δύο τροποποιήσεις του συστήματος, οι οποίες στηρίζονταν στην ανύψωση και στη προώθηση. Οι κύριες διαφορές των δύο αυτών φαινομένων είναι περισσότερο σχεδιαστικές, αλλά διακρίνονται επίσης και διαφορές τοποθέτησης των μαγνητικών δυνάμεων.

Μία από τις σημαντικότερες χρήσεις της μαγνητικής αιώρησης, είναι η εφαρμογή της στα τρένα. Για την επίτευξη μικρότερου χρόνου μεταφοράς έναντι των άλλων μεταφορικών μέσων, οι εταιρείες σιδηροδρόμων οδηγούνται στην υιοθέτηση και αξιοποίηση της τεχνολογίας μαγνητικής αιώρησης. Το σύστημα αυτό πραγματοποιεί αιώρηση και προώθηση, χωρίς να υπάρχουν ρόδες χρησιμοποιώντας μαγνητισμό με σκοπό να δημιουργήσει το διάκενο. Η κύρια διαφορά ανάμεσα στα συμβατικά τρένα και στα τρένα μαγνητικής αιώρησης, είναι η μη ύπαρξη μηχανικής επαφής, διότι έτσι επιτυγχάνονται υψηλότερες ταχύτητες, λόγω της απουσίας τριβών. Πολλές βιομηχανίες έχουν δείξει μεγάλο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της, διότι μπορεί να θεωρηθεί ως λύση για τις μελλοντικές ανάγκες των μεταφορών. Στο παρακάτω διάγραμμα αναφέρονται τα κυριότερα τμήματα που αποτελούν ένα τέτοιο τρένο. Οι ακόλουθες υπό ενότητες [1] περιλαμβάνουν λεπτομερείς συζητήσεις σχετικά με αυτά τα τμήματα.

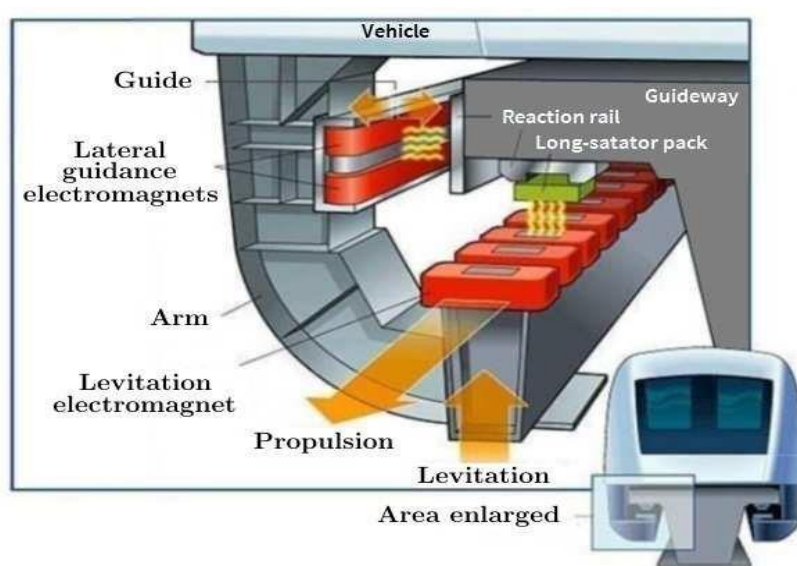


Σχήμα 2.1: Τα κύρια τμήματα του τρένου μαγνητικής αιώρησης.

### 2.1.1 Σύστημα αναρτήσεων

#### Ηλεκτρομαγνητικές αναρτήσεις (EMS)

Μία πρώτη περίπτωση ηλεκτρομαγνητικής αιώρησης αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στην Γερμανία, με το μαγνητικό τρένο «Transrapid» [2]. Το όχημα ήταν διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να περιβάλλει τις ράγες, αφού έφερε στο κάτω μέρος του μόνιμους μαγνήτες. Χάρη στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργούταν, το τρένο μπορούσε να ανυψωθεί πάνω από τις σιδηροτροχιές, που ήταν συνθηθέστερα κατασκευασμένες από μπετόν και σίδηρο, σε σχήμα T.



Σχήμα 2.2: Η λειτουργία του τρένου με ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση.

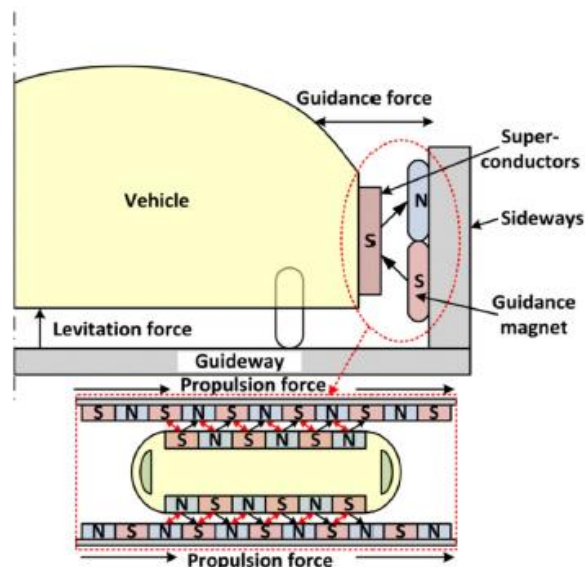
Η λειτουργία της ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης επιτυγχάνεται με την χρήση των ελκτικών δυνάμεων του μαγνήτη. Σύμφωνα με την θεωρία του Earnshaw [3], ένα παραμαγνητισμένο σώμα δεν μπορεί να διατηρήσει την σταθερότητα του όταν βρίσκεται σε ένα συνδυασμό βαρυτικών και μαγνητοστατικών πεδίων. Τα τρένα με ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση πετυχαίνουν την σταθερότητα σε αυτά τα στατικά πεδία, αλλάζοντας το ρεύμα των ηλεκτρομαγνητών, ώστε να μεταβάλλει τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται. Για αυτό το λόγο, λοιπόν, οι αναρτήσεις αυτές απαιτούν την χρήση ισχυρών και αποτελεσματικών ελεγκτών για να επιτευχθεί η σταθερότητα. Ο σκοπός του ελεγκτή είναι να εμποδίσει την επαφή του τρένου με την ράγα διατηρώντας σταθερό το διάκενο που εμφανίζεται μεταξύ τους, ανεξάρτητα από τις εξωτερικές διαταραχές. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει η αναλυτική μελέτη ενός τέτοιου ελεγκτή και θα εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος.

Το Γερμανικό τρένο με ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση είναι διαμορφωμένο για να ταιριάζει σε διάφορες απαιτήσεις που μπορούν να υπάρξουν. Τα τμήματα του έχουν τέσσερα πλαίσια αφαίρεσης που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά των δυνάμεων πρόωσης, φρεναρίσματος, υποστήριξης και προσανατολισμού. Όλα τα μηχανικά στοιχεία του τρένου είναι τοποθετημένα σε ελαστικά και μεταλλικά στοιχεία που εκπέμπουν κραδασμούς.

Η ράγα του συστήματος αποτελείται από μεμονωμένους δοκούς από χάλυβα ή σκυρόδεμα σε στάνταρ μήκη από 6,2 έως 62,3 m. Η απόσταση στο κέντρο του τροχού του οδηγού διπλών γραμμών είναι 4,4 m έως 300 km / h ή 5,1 m έως 500 km / h (14,4 ft έως 185 mph ή 16,7 ft έως 310 mph). Το εύρος τροχιάς είναι 2,8 μ. (9,2 πόδια).

### Ηλεκτροδυναμικές αναρτήσεις (EDS)

Το σύστημα ηλεκτροδυναμικής ανάρτησης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία. Στη παραλλαγή αυτή χρησιμοποιήθηκαν υπεραγώγιμοι μαγνήτες προκειμένου να δημιουργήσουν τέλεια αντίγραφα σταθερών μαγνητικών πόλων. Η ιδέα αυτή βασίζεται στο φαινόμενο Meissner, η οποία για την αιώρηση προμηθεύει το μαγνήτη με μια σταθερή απώθηση. Με την ψύξη του αγωγού από υγρό άζωτο επιτυγχάνεται μηδενική ηλεκτρική αντίσταση, για να έχει την ικανότητα να αντιγράψει το μαγνήτη. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο μαγνήτης αποκτάει τη δυνατότητα κίνησης και αναπήδησης, χωρίς να έρχεται σε επαφή με τη ράγα. Σαν υλικό κατασκευής χρησιμοποιούνται κράμματα Νιοβίου - Κασσίτερου και Νιοβίου - Τιτανίου.



Σχήμα 2.3: Η λειτουργία του τρένου με ηλεκτροδυναμικές αναρτήσεις.

Ερευνητική ομάδα maglev στα Εθνικά Εργαστήρια Argonne [4]. Πάνω από μια κρίσιμη ταχύτητα η δυναμική του συστήματος καθίσταται ασταθές διότι παράγει αρνητική απόσβεση. Μια δεύτερη αβεβαιότητα σχετίζεται με τις διαταραχές που εμφανίζονται από το περιβάλλον. Η ομάδα αυτή δημοσιεύει άρθρα σχετικά με την σταθερότητα του συστήματος, στην οποία αξιολογούνται και προσομοιώνονται οι ασταθείς αναστολές του συστήματος. Τα αποτελέσματα τα δείχνουν την σημασία της σύζευξης μεταξύ των έξι DOF και την ύπαρξη των ασταθειών [5].

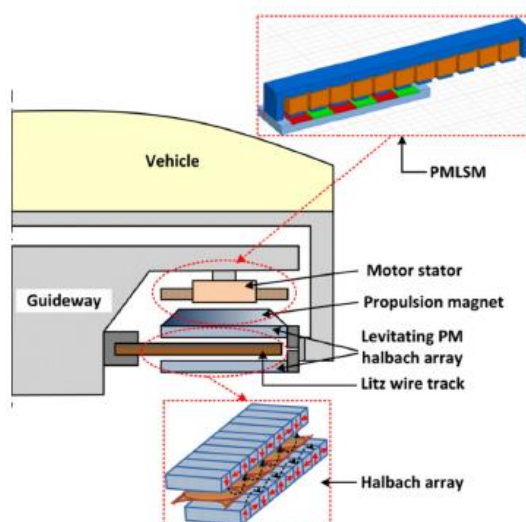
Οι Yamada κ.α. [6] δημιούργησαν μια πειραματική εγκατάσταση για να δοκιμαστεί η δυναμική των ηλεκτροδυναμικών αναρτήσεων το 1973. Παρατηρήθηκε η συμπεριφορά απόσβεσης του συστήματος σε διάφορες τιμές ταχυτήτων και διαπιστώθηκε η ύπαρξη αρνητικών αποσβέσεων για ταχύτητες πάνω από μια κρίσιμη τιμή.

### Ηλεκτροδυναμική Αιώρηση με Μόνιμους Μαγνήτες (PM-EDS)

Μια δεύτερη παραλλαγή του ηλεκτροδυναμικού συστήματος είναι η αιώρηση με μόνιμους μαγνήτες [7]. Ουσιαστικά, είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιεί παθητική αιώρηση, γνωστό και ως σύστημα επαγωγικού σύρματος, βασισμένο στην αρχή της μαγνητικής απόρριψης. Χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες σε θερμοκρασία δωματίου, διατεταγμένους με τη μορφή συστοιχίας Halbach, όπως φαίνεται στην Σχήμα[2.4]. Εν αντίθεσή με το σύστημα EDS δεν απαιτείται η χρήση υπεραγωγίων μαγνήτων.

Για την επιτάχυνση του τρένου χρειάζονται επιταχυνόμενοι τροχοί. Συγκριτικά με το σύστημα EDS ο σχεδιασμός απαιτεί λιγότερο κόστος, εφόσον δεν χρησιμοποιεί υπεραγωγούς. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται δεν είναι καθαρά ημιτονοειδές, διότι η διάταξη Halbach δεν είναι ιδανική. Έτσι, για μικρότερα κενά αέρος διεύρυνσης, η ανωμαλία στο μαγνητικό πεδίο παράγει αρμονικές ταλαντώσεις ανώτερης τάξης. Αυτές οι αρμονίες έχουν ως αποτέλεσμα να προκαλούν ταλαντώσεις στο σύστημα, χωρίς εξωτερικές διαταραχές.





Σχήμα 2.4: Η λειτουργία του τρένου με μόνιμους μαγνήτες.

	Χαρακτηριστικά	EDS	PM-EDS	EMS
1	Κενό Αέρα(mm)	80-150	80-150	8-12
2	Ταχύτητα(km/h)	>500	500	100-500
3	Πρώθηση	LSM	LSM	LIM/LSM
4	Μαγνήτες	Υπεραγωγίμες	PM Halbach	Ηλεκτρομαγνήτες
5	Χώρες που το χρυσ.	Ιαπωνία	Αμερική	Ιαπωνία/Γερμανία
6	Κατάσταση	Σε Χρήση	Υπό Δοκιμή	Σε Χρήση

Πίνακας 2.1: Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών αιώρησης.

Όπως σε όλες τις τεχνολογικές προσπάθειες, έτσι και εδώ εκτός από τα πλεονεκτήματα υπάρχουν και μειονεκτήματα. Το γεγονός αυτό όμως, δεν αναιρεί την σπουδαιότητα της τεχνολογίας αυτής. Παρακάτω στον πίνακα [2.2] ορίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τριών μεθόδων αιώρησης του ηλεκτρομαγνητικού τρένου maglev.

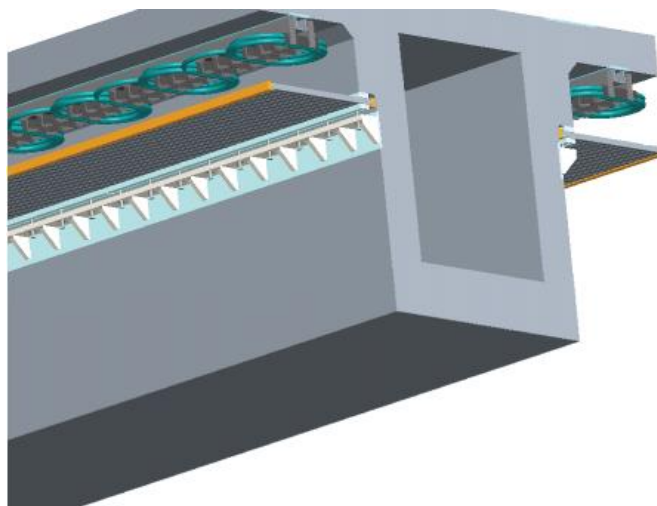
<i>Τεχνολογία Αιώρησης</i>	<i>Πλεονεκτήματα</i>	<i>Μειονεκτήματα</i>
Ηλεκτρομαγνητική Ανάρτηση (EMS)	Συγκριτικά με το σύστημα ηλεκτροδυναμικής ανάρτησης τα μαγνητικά πεδία που παράγονται είναι λιγότερα. Αποτελεί ένα πολύ γρήγορο σύστημα που έχει αποδειχθεί ότι ξεπερνάει τα 500 km/h. Το βασικότερο του πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτείται στο σύστημα αυτό η χρήση τροχών ή κάποιον άλλων συστημάτων πρόωσης.	Εξ αιτίας της ασταθής φύσης των μαγνητικών πεδίων θα πρέπει να υπάρχει συχνή παρακολούθηση του τρένου και της σιδηροτροχιάς για την αποφυγή ατυχημάτων. Ο έλεγχος αυτός απαιτεί εξωτερικά συστήματα που κοστίζουν αρκετά χρήματα.
Ηλεκτροδυναμική Ανάρτηση (EDS)	Παρέχεται η δυνατότητα ανάπτυξης πολύ υψηλών ταχυτήτων ακόμα και όταν μεταφέρουν πολλούς επιβάτες. Δημιουργούν επίσης υψηλά μαγνητικά πεδία με χαμηλές απώλειες και αποτελούν αξιόπιστη ευστάθεια στο σύστημα.	Σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση τα συστήματα αυτά απαιτούν την χρήση τροχών για τις χαμηλές ταχύτητες. Επίσης ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι λόγω των ισχυρών μαγνητικών πεδίων τα μαγνητικά αντικείμενα των επιβατών αχρηστεύονται.
Αιώρηση με μόνιμους μαγνήτες (Inductrack)	Παρέχουν υψηλότερη ασφάλεια συγκριτικά με τα άλλα συστήματα διότι ακόμα και στην περίπτωση βραχυκύκλωσης το τρένο επιβραδύνεται με ασφάλεια. Οι μαγνήτες δεν απαιτούν ρεύμα για την λειτουργία τους. Και γενικότερα η χρήση των μόνιμων μαγνητών είναι πολύ πιο φτηνά συγκριτικά με τα άλλα συστήματα.	Απαιτεί τροχούς στις χαμηλές ταχύτητες. Η χρήση των μόνιμων μαγνητών είναι πιο σύγχρονη τεχνολογία και έτσι αποτελεί μειονέκτημα διότι κατά την ανάπτυξη του μπορεί να δημιουργηθούν άλλα προβλήματα.

*Πίνακας 2.2: Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τριών μεθόδων αιώρησης.*

### 2.1.2 Προώθηση

Τα τρένα Maglev απαιτούν έναν μηχανισμό προώθησης δίχως επαφή. Οι γραμμικοί κινητήρες αποτελούν την πιο κατάλληλη επιλογή καθώς τηρούν την προϋπόθεση αυτή. Οι πιο δημοφιλείς κινητήρες που χρησιμοποιούνται είναι ο γραμμικά επαγωγικός κινητήρας “LIM” [8] και ο γραμμικά σύγχρονος κινητήρας “LSM”.

Είναι σκόπιμο αρχικά να κατανοήσουμε τη λειτουργία ενός απλού ηλεκτρικού κινητήρα, προτού οριστούν οι γραμμικοί κινητήρες. Ένας απλός ηλεκτρικός κινητήρας αποτελείται από το στάτορα, ο οποίος περικλείει ένα περιστρεφόμενο κομμάτι, τον ρότορα, με στόχο τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου, έτσι ώστε να αναπτύξει ροπή και να περιστρέψει τον άξονα. Ο γραμμικά επαγωγικός κινητήρας είναι μια ξετυλιγμένη εκδοχή του απλού ηλεκτρικού κινητήρα. Η τοποθέτηση του στάτορα γίνεται επίπεδα πάνω στον οποίο στηρίζεται ο ρότορας και παράγει ένα μαγνητικό πεδίο που κινείται προς τα κάτω αντί να περιστρέφεται. Προσφέρει χαρακτηριστικά όπως είναι η απλότητα, η αξιοπιστία και ο χαμηλός κόστος συντήρησης. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή ο ρότορας πάντοτε υστερεί πίσω από το κινούμενο πεδίο του στάτορα. Η υστέρηση αυτή, δημιουργεί σημαντικές απώλειες στην ταχύτητα. Ένας δεύτερος τρόπος προώθησης γίνεται με την χρήση του γραμμικά σύγχρονου κινητήρα “LSM”, η οποία αφαιρεί την υστέρηση συνδέοντας στον ρότορα μια άλλη μαγνητική πηγή. Το μαγνητικό πεδίο, μπορεί να παρέχεται από ηλεκτρομαγνήτες DC ή από μόνιμους μαγνήτες “PM-LSM” [9].



Σχήμα 2.5: Γραμμικά σύγχρονος κινητήρας.

### 2.1.3 Προσανατολισμός

Ο προσανατολισμός χρησιμοποιείται για να κρατήσει το τρένο στο κέντρο της ράγας. Για μαγνήτες υψηλής ταχύτητας, χρησιμοποιούνται απωστικές μαγνητικές δυνάμεις. Στο γερμανικό maglev “TransRapid”, διακρίνουμε δύο ηλεκτρομαγνητικές ράγες τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο ώστε να βλέπουν τις δύο πλευρές του τοίχου. Εν αντιθέσει στο MLX, ο προσανατολισμός είναι συνδυασμένος με το σύστημα αιώρησης. Οι ράγες από κάθε πλευρά του τρένου συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε στην περίπτωση που το τρένο κινηθεί πιο κοντά σε μία πλευρά να υπάρχει μια δύναμη η οποία το ωθεί πίσω προς το κέντρο. Με αυτό τον τρόπο το MLX αιωρείται και προσανατολίζεται ταυτόχρονα.

### 2.1.4 Μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά. Οι μαγνήτες νεοδυμίου είναι πλέον φθηνότεροι και έχουν πιο επιθυμητές ιδιότητες από τους παλιούς μαγνήτες όπως το φερρίτη και αλνίκο. Η τιμή του μαγνήτη είναι περίπου γραμμική με τον όγκο του μαγνητικού υλικού. Οι τιμές για τους μόνιμους μαγνήτες αυξήθηκαν δραματικά τα τελευταία χρόνια με μεγαλύτερη ζήτηση για σπάνια μέταλλα στην παγκόσμια αγορά [10].

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει μερικές προσεγγιστικές τιμές που συγκρίνουν τις ιδιότητες των διάφορων μαγνητών που διατίθενται. Οι μαγνήτες νεοδυμίου είναι ικανοί να παράγουν πολύ μεγαλύτερη ενέργεια και η υψηλή αντίσταση στις αλλαγές μαγνητισμού μέσω φυσικής πρόσκρουσης. Το κύριο μειονέκτημα των μαγνητών νεοδυμίου είναι οι χαμηλές μέγιστες λειτουργικές τους θερμοκρασίες. Ειδικότερα, αυτό θα μπορούσε να είναι πρόβλημα όταν χρησιμοποιούνται αυτοί οι μαγνήτες για υβριδικούς ηλεκτρομαγνήτες, στους οποίους ένα πηνίο που φέρει πλέγμα χρησιμοποιεί έναν πυρήνα μόνιμου μαγνήτη για να αυξήσει το μέγεθος και την πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Σε υψηλά φορτία το πηνίο θα μπορούσε ενδεχομένως να υπερθερμάνει το μαγνήτη πέρα από τη μέγιστη λειτουργική θερμοκρασία και να το απομαγνητίσει.

Ιδιότητα	Φερρίτης	Al-Ni-Co	Νεοδύμιο
Μέγιστη Θερμοκρ.(°C)	400-500	800-900	80-200
Παραμονή (T)	0.2-0.4	0.5-1.3	1-1.3
Συνεργατικότητα (kA/m)	100-200	50-160	800-900
Παραγωγή Μέγιστης Ενέργειας (kJ/m <sup>3</sup> )	6-33	10-80	200-300

Πίνακας 2.3: Ιδιότητες μαγνητών.

### 2.1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του τρένου Maglev

Όπως σε όλα τα τεχνολογικά επιτεύγματα, έτσι και εδώ μαζί με τα πλεονεκτήματα εφαρμογής του συστήματος υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Παρακάτω αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του τρένου μαγνητικής αιώρησης, συγκριτικά με τα απλά συμβατικά τρένα.

#### Πλεονεκτήματα

- **Αποδοτικότητα:** Απαιτεί λιγότερη ενέργεια για την μεταφορά περισσότερων επιβατών ή και αντικειμένων, λόγω της έλλειψης φυσικής επαφής, η οποία οδηγεί στην απουσία της αντίστασης στην κύλιση.
- **Συντήρηση:** Τα συμβατικά τρένα υφίστανται υψηλές τάσεις και αυτό καθιστά αναγκαία την συντήρηση για να μπορέσουν να παραμείνουν λειτουργικά, χωρίς τις μηχανικές φθορές. Από οικονομικής άποψης, αυτό είναι ένα αρκετά μεγάλο πλεονέκτημα, καθώς η επισκευή και η συντήρηση είναι δαπανηρές και χρονοβόρες διαδικασίες.
- **Ταχύτητα:** Η ταχύτητα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την σύγκριση με τα συμβατικά τρένα. Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, τα τρένα αυτά μπορούν να φτάσουν σε πολύ υψηλές ταχύτητες, παρόλο που η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμα σε ένα πρώιμο στάδιο.
- **Θόρυβος:** Τα τρένα με την τεχνολογία μαγνητικής αιώρησης παράγουν πολύ λιγότερο θόρυβο σε αντιδιαστολή με ένα απλό συμβατικό τρένο σε ισοδύναμες ταχύτητες. Η κύρια πηγή θορύβου προέρχεται συνήθως από τους τροχούς που έρχονται σε επαφή με τις ράγες.
- **Καιρικές Συνθήκες:** Τα τρένα μαγνητικής αιώρησης επηρεάζονται λιγότερα από τις διάφορες καιρικές συνθήκες, όπως είναι το χιόνι και η βροχή. Μπορούν να επιταχύνουν και να επιβραδύνουν ανεξάρτητα από αυτά, εφόσον δεν υπάρχει φυσική επαφή του τρένου με την ράγα.

## Μειονεκτήματα

- **Κόστος:** Η σημερινή σιδηροδρομική υποδομή δεν ταιριάζει με τα μαγνητικά τρένα, και ως εκ τούτου θα πρέπει, είτε να αντικατασταθεί με το κατάλληλο σύστημα, είτε να δημιουργηθεί μια εντελώς καινούρια εγκατάσταση. Και τα δύο σενάρια απαιτούν υψηλά κεφάλαια στο πλαίσιο της αρχικής επένδυσης.
- **Ασφάλεια:** Σε γενικές γραμμές τα συστήματα αυτά παρέχουν ένα υψηλό επίπεδο ασφάλειας, αλλά σε τυχόν ατύχημα το αποτέλεσμα θα είναι πιο καταστροφικό.

## 2.2 Hyperloop

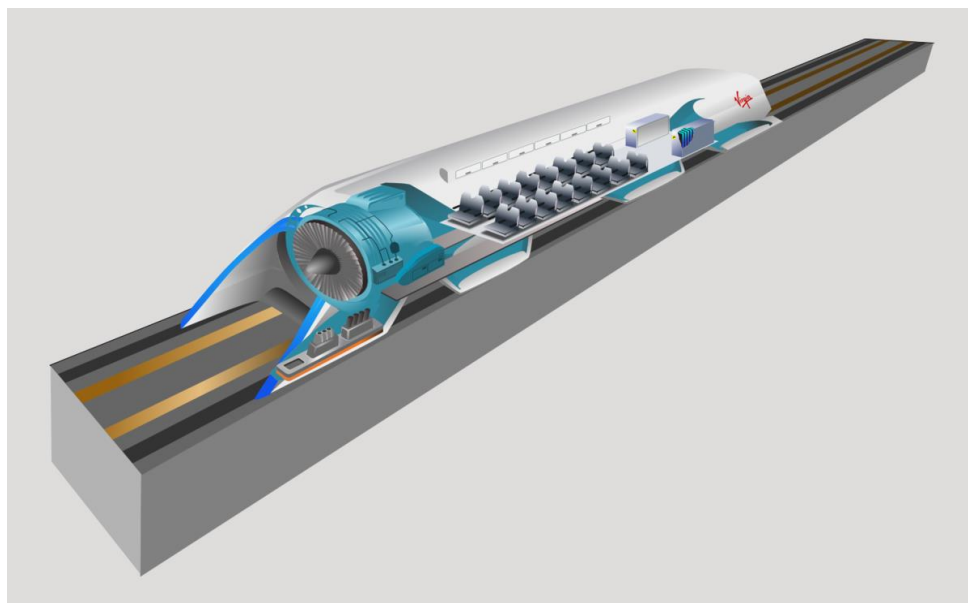
Η τεχνολογία του τρένου μαγνητικής αιώρησης υπόσχεται πολλά για το μέλλον, καθώς είναι οικονομικότερη, ασφαλέστερη, ταχύτερη και πολύ πιο φιλική προς το περιβάλλον συγκριτικά με τα απλά συμβατικά τρένα. Επομένως, οι παραπάνω παράγοντες καθιστούν την συγκεκριμένη τεχνολογία αρκετά ενδιαφέρουσα επιλογή, τόσο για τη δημόσια υπεραστική μεταφορά, όσο και για ιδιωτικές ταξιδιωτικές εταιρείες. Αυτή η δημοτικότητα ωθεί πολλούς στην αναζήτηση καινοτόμων αλλαγών, με σκοπό την βελτίωση του.

Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία χρειάζεται αρκετό χρόνο προκειμένου να καθιερωθεί, τα πλεονεκτήματά της είναι τόσο ισχυρά, που καθιστούν απαραίτητη την υλοποίησή της. Με το πέρασμα του χρόνου οι απαιτήσεις στην ποιότητα της μεταφοράς αυξάνονται, για αυτό λοιπόν οι καινούριες τεχνολογικές προσπάθειες μπορούν να οδηγήσουν στην επανάσταση των μεταφορών.

### 2.2.1 Η τεχνολογία Hyperloop

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένας σταθερός ανταγωνισμός ανάμεσα στα διάφορα μεταφορικά μέσα, με αισθητή την κυριαρχία του αεροπλάνου έναντι των υπολοίπων. Οι αρνητικές επιπτώσεις των μετακινήσεων στο περιβάλλον, οι υψηλές τιμές εισιτηρίων και οι μεγάλοι χρόνοι ταξιδιών, οδήγησαν στην αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων μεταφοράς, πιο φιλικών προς το περιβάλλον. Παρότι έχουν σημειωθεί αρκετές αλλαγές για τη βελτίωση των εν λόγω τεχνολογιών, βρισκόμαστε ακόμα μακριά από ριζικές καινοτομίες.

Ο Elon Musk (Ιδρυτής και Διευθύνων Σύμβουλος της Tesla&SpaceX) δημοσίευσε το 2013 την μελέτη για ένα εναλλακτικό σύστημα μεταφοράς, το Hyperloop [11]. Η καινούρια μορφή μεταφοράς αυτή αποτελεί σημαντικό βήμα στην αλλαγή των μεταφορών, και βρίσκεται στην λίστα πολλών εταιρειών με σκοπό την βελτίωση και την εφαρμογή της.



Σχήμα 2.6: Πρωτότυπο μοντέλο τεχνολογίας Hyperloop.

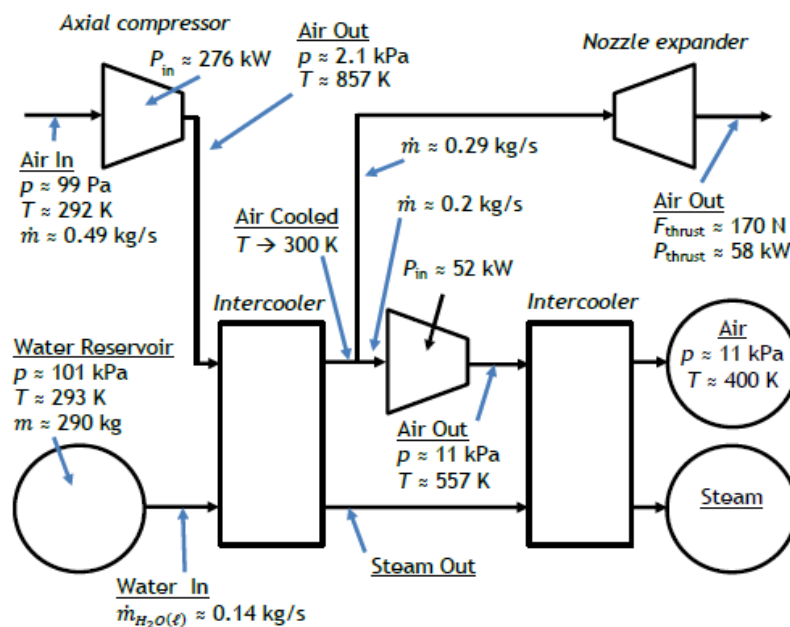
Η ιδέα αποτελεί την προώθηση της ειδικής κάψουλας μέσα στους σωλήνες χαμηλής πίεσης αφαιρώντας τους δύο βασικούς παράγοντες που επιβραδύνουν τα οχήματα, την τριβή επαφής και την αντίσταση του αέρα. Για την εξάλειψη της τριβής επαφής αρχικά ο Elon είχε προτείνει την χρήση πεπιεσμένου αέρα με ρουλεμάν αέρα, σήμερα όμως οι πλειονότητα των μηχανικών προτείνουν την χρήση των μόνιμων μαγνητών. Όπως έχει αναλυθεί και στην προηγούμενη ενότητα, η δημιουργία μαγνητικού πεδίου δεν απαιτεί ρεύμα, πράγμα το οποίο επιφέρει αρκετά πλεονέκτημα και σημαντική ανταγωνιστικότητα συγκριτικά με άλλα συστήματα.

Στο σύστημα που προτείνει ο Elon, χρησιμοποιούνται αντλίες για την δημιουργία περιβάλλοντος χαμηλής πίεσης, έτσι ώστε να επιτευχθούν πολύ υψηλές ταχύτητες. Οι σωλήνες τοποθετούνται πάνω στους πυλώνες, και θα διαθέτουν στην κορυφή τους ηλιακά πάνελ για να παρέχουν τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος.

### 2.2.2 Τα βασικότερα τμήματα του συστήματος

Στο “Alpha Paper” έχει γίνει αναλυτική μελέτη του ταξιδιού από το Σαν Φρανσίσκο μέχρι το Λος Άντζελες. Τα βασικότερα τμήματα που αποτελούν το σύστημα αυτό αναφέρονται παρακάτω.

- **Κάψουλα:** Στηρίζονται σε ένα στρώμα πεπιεσμένου αέρα με στόχο την ασφαλέστερη και ποιοτικότερη μεταφορά επιβατών. Θα έχει μέγιστο πλάτος 1.35 μέτρα , μέγιστο ύψος 1.10 μέτρα και το συνολικό βάρος θα είναι περίπου 3100 κιλά.
- **Συμπιεστής:** Το σύστημα του συμπιεστή αποτελεί κρίσιμο μέρος του σχεδιασμού και πρέπει να μελετηθεί με μεγάλη λεπτομέρεια. Οι αναλυτικές τιμές του θερμοδυναμικού κύκλου παρουσιάζονται στο σχήμα [2.7]. Η πτερωτή του συμπιεστή είναι τοποθετημένη στην μπροστινή μεριά της κάψουλας, διότι η μάζα του αέρα συσσωρεύεται εκεί αυξάνοντας την οπισθέλκουσα δύναμη. Μια δεύτερη λειτουργία του συμπιεστή είναι να προσφέρει την επιθυμητή παροχή του αέρα στα ρουλεμάν έτσι ώστε να στηρίξει το βάρος της κάψουλας καθ’ όλη τη διάρκεια του ταξιδιού.

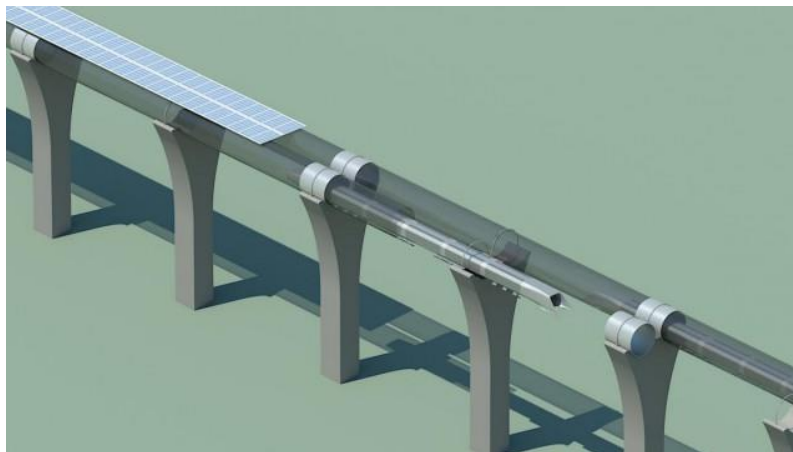


Σχήμα 2.7: Θερμοδυναμικός κύκλος του συμπιεστή.



1. Αρχικά ο αέρας που εισέρχεται συμπιέζεται με λόγο συμπίεσης 20:1 μέσω του αξονικού συμπιεστή.
  2. Περίπου το 60% του αέρα παρακάμπτεται. Ο αέρας εισέρχεται από την πτερωτή και ταξιδεύει προς την ούρα του οχήματος. Στην ουρά βρίσκεται ένα ακροφύσιο για να αυξήσει την ώση με σκοπό να μετριάσει κάποιες ποσότητες της έλξης και της αεροδυναμικής.
  3. Παροχή μάζας 0,2 kg/s του αέρα ψύχεται και συμπιέζεται ξανά με λόγο συμπίεσης 5,2:1 και αποθηκεύεται σε δοχεία πίεσης. Τα δοχεία αυτά καταναλώνονται από τα ρουλεμάν αέρα για την αιώρηση του οχήματος.
  4. Για την ψύξη του αέρα χρησιμοποιούνται δεξαμενές νερού. Η άντληση του νερού γίνεται στα 0,14 kg/s ανάμεσα σε δύο ενδιάμεσους ψυκτήρες. Σε κάθε στάση οι δεξαμενές αλλάζουν αυτόματα.
  5. Η τροφοδοσία του συμπιεστή γίνεται με την χρήση ηλεκτρικού κινητήρα 436 ίππων. Ο κινητήρας αυτός ζυγίζει περίπου 170 κιλά. Οι μπαταρίες έχουν την δυνατότητα να παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια του συμπιεστή για 45 λεπτά.
- **Ρουλεμάν αέρα:** Το επόμενο βασικό τμήμα της κάψουλας Hyperloop είναι το σύστημα αιωρήματος μέσω του ρουλεμάν αέρα. Ο σκοπός είναι να παραχθεί μια μεμβράνη υπό υψηλή πίεση για να επιπλέει την κάψουλα με σταθερό διάκενο. Η μέθοδος ανάρτησης αυτή αποτελεί εξαιρετικό πλεονέκτημα σταθερότητας και αξιοπιστίας. Αποτελείται συνολικά από 28 ρουλεμάν με μήκος 1.5 m και το πλάτος 0.9 m, το διάκενο που δημιουργείται αλλάζει από 0.5 έως 1,3 mm. Στην ταχύτητα 1100 km/h η συνολική αντίσταση τους είναι 140 N, με αποτέλεσμα να υπάρχει απώλεια ισχύος 48 kW. Το συνολικό σύστημα αποτελείται από αεροσυμπιεστές, δοχεία, υδραυλικές εγκαταστάσεις και τα ρουλεμάν. Το βάρος του συστήματος είναι περίπου 2800 κιλά και κοστίζει περίπου 450.000 δολάρια
  - **Σωλήνες:** Οι προκατασκευασμένοι χαλύβδινη σωλήνες θα συγκολληθούν μαζί με τους πυλώνες. Το υλικό κατασκευής θα είναι χάλυβας λόγω του χαμηλού κόστους και της δυνατότητας συγκόλλησης. Οι πυλώνες θα κατασκευαστούν από κράμα σκυροδέματος και θα είναι βελτιωμένες με ειδικούς σχεδιασμούς ολίσθησης για να αυξηθεί η αντοχή ως προς την θερμική διαστολή. Εσωτερικά ο σωλήνας θα διατηρηθεί σε 100 Pa. Αρχικά η διάμετρος είχε καθοριστεί στα 3,3 μέτρα, ο επιστήμονας Chin και οι συνεργάτες του [12] στην μελέτη του

διαπίστωσε ότι η διάμετρος θα πρέπει να είναι σχεδόν διπλάσια από 3,3 m προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα ροών όπως είναι ο πνιγμός. Η κατασκευή σύμφωνα με αυτή την μοντελοποίηση θα κοστίζει πολλά περισσότερα χρήματα αλλά ταυτόχρονα θα υπάρχει καλύτερη απόδοση και ασφάλεια ταξιδιού.



Σχήμα 2.8: Χαλύβδινοι σωλήνες και οι πυλώνες.

- **Πρώθηση:** Η προώθηση της κάψουλας για το συγκεκριμένο ταξίδι προβλέπεται να καταναλώσει 21 MW ισχύος. Ο σκοπός είναι να επιταχύνεται έως 480 km/h σε αστικές περιοχές και 480-1.220 km/h στην επαρχία. Για την απαίτηση αυτή θα εγκατασταθούν ηλιακά πάνελ που θα παράγουν περίπου 57 MW κατά μέσο όρο. Για την περίπτωση ανεπάρκειας από τα ηλιακά πάνελ, θα υπάρχει τροφοδοσία από το δίκτυο. Ο κινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί για την επιτάχυνση και επιβράδυνση του οχήματος θα είναι ένας γραμμικός επαγωγικός κινητήρας.

### 2.2.3 Εκτίμηση κόστους της διαδρομής Σαν Φρανσίσκο-ΛΑ

Σύμφωνα με όλα αυτά που έχουν ειπωθεί παραπάνω ο συγκεκριμένος τρόπος μεταφοράς παρέχει πολλά πλεονεκτήματα προσφέροντας μικρότερη διάρκεια ταξιδιού, μειώνοντας τις εκπομπές άνθρακα και τις τιμές εισιτηρίων. Στην μελέτη της ομάδας του Elon Musk [7], έχει γίνει η εκτίμηση κόστους του δρομολογίου μεταξύ του Λος Άντζελες και του Σαν Φρανσίσκο.

Η σωστή πρόβλεψη του κόστους είναι πάρα πολύ δύσκολη να υπολογιστεί, καθώς πολλές τεχνικές προδιαγραφές δεν έχουν προσδιοριστεί ακόμα. Ωστόσο, στην μελέτη αυτή έχει γίνει μια ανάλυση και εκτίμηση του κόστους. Στους παρακάτω

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

---

πίνακες εμφανίζονται τα κόστη για δύο διαφορετικά σενάρια. Θα δούμε αρχικά το συνολικό κόστος κατασκευής για ένα όχημα που μεταφέρει επιβάτες και αντίστοιχα θα δούμε και την περίπτωση στην οποία το όχημα μεταφέρει εμπορεύματα.

<b>Τμήματα</b>	<b>Κόστος(million USD)</b>
Κάψουλα	54
Δομή Κάψουλας	9,8
Εσωτερικό	10,2
Συμπιεστής & Υδραυλικές εγκατ.	11
Μπαταρίες & Ηλεκτρονικά	6
Προώθηση	5
Ανάρτηση & Ρουλεμάν	8
Συναρμολόγηση Εξαρτημάτων	4
Σωλήνες	5410
Δομή Σωλήνα	650
Δομή Πυλώνα	2550
Δομή Τούνελ	600
Προώθηση	140
Φωτοβολταϊκά & Μπαταρίες	210
Αντλίες	260
Άδειες & Εδάφη	1000
Προκαταβολή ως Εγγύηση Δανείου	536
<b><u>Σύνολο</u></b>	<b>6000</b>

Πίνακας 2.4: Εκτίμηση συνολικού κόστους του συστήματος μεταφοράς επιβατών Hyperloop.

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

---

Η αναμενομένη διάρκεια του ταξιδιού θα είναι περίπου 35 λεπτά. Οι εκτιμήσεις του κόστους γίνονται λαμβάνοντας υπόψιν τις προδιαγραφές και τους υπολογισμούς της απόδοσης του Hyperloop. Απαιτείται επίσης, η βελτιστοποίηση της διαδρομής για να αποφευχθούν οι διαταραχές, όπως είναι οι αδρανειακές επιταχύνσεις, με σκοπό να παρέχουν την καλύτερη ποιότητα ταξιδιού.

Εν αντιθέσει, με άλλους τρόπους μεταφοράς, το σύστημα Hyperloop παρέχει υψηλή ασφάλεια στους επιβάτες. Το ταξίδι γίνεται σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον σωληνώσεων καθιστώντας το σύστημα ανεξάρτητο από διάφορες καιρικές συνθήκες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ασφάλεια του. Η επιτάχυνση και η επιβράδυνση γίνεται με το σωστότερο τρόπο, υπολογίζοντας τις βέλτιστες τιμές για την καλύτερη ποιότητα μεταφοράς. Σε γενικότερες γραμμές, η ιδέα δημιουργίας του δικτύου είναι εγγενώς ασφαλέστερη από τους σημερινούς τρόπους μεταφοράς.

<b>Τμήματα</b>	<b>Κόστος(million USD)</b>
Κάψουλα Φορτίων	30,5(20 κάψουλες)
Δομή Κάψουλας	5,5
Εσωτερικό	3,7
Συμπιεστής & Υδραυλικές εγκατ.	6
Μπαταρίες & Ηλεκτρονικά	4
Προώθηση	3
Ανάρτηση & Ρουλεμάν	5,3
Συναρμολόγηση Εξαρτημάτων	3
Κάψουλα Επιβατών	40,5 (30 κάψουλες)
Δομή Κάψουλας	7,4
Εσωτερικό	7,6
Συμπιεστής & Υδραυλικές εγκατ.	8,2
Μπαταρίες & Ηλεκτρονικά	4,5
Προώθηση	3,8

## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

---

Ανάρτηση & Ρουλεμάν	6
Συναρμολόγηση Εξαρτημάτων	3
<u>Σωλήνες</u>	7000
Δομή Σωλήνα	1200
Δομή Πυλώνα	3150
Δομή Τούνελ	700
Πρώθηση	200
Φωτοβολταικά & Μπαταρίες	490
Αντλίες	260
Άδειες & Εδάφη	1000
Προκαταβολή ως Εγγύηση Δανείου	429
<u><b>Σύνολο</b></u>	7,500

Πίνακας 2.5: Εκτίμηση συνολικού κόστους του συστήματος μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων μέσω Hyperloop.

Το συνολικό κόστος της έκδοσης μεταφοράς επιβατών ανέρχεται στα 6 δισεκατομμύρια δολάρια. Η δυνατότητα μεταφοράς επιβατών σε ένα χρόνο είναι περίπου 7.4 εκατομμύρια άτομα, και η απόσβεση του συνολικού κόστους για 20 χρόνια δίνει την τιμή εισιτηρίου 20\$ για ένα δρομολόγιο. Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με τις προ υπάρχουσες μεταφορές, πράγμα το οποίο καθιστά υψηλή ανταγωνιστικότητα. Η άλλη έκδοση είναι 25% περισσότερη από την έκδοση επιβατών, αλλά φτάνει σε σημαντικές τιμές κέρδους. Καθώς βελτιώνεται η τεχνολογία αυτή η περαιτέρω βελτιστοποίηση μπορεί να μειώσει αρκετά την τιμή.

### 2.2.4 Διαγωνισμός Hyperloop Pod

Έχει αναφερθεί στο (2.2.3) η έννοια και η τεχνολογία του Hyperloop. Δύο χρόνια μετά τη δημοσίευση της ιδέας Hyperloop Alpha Paper, η εταιρεία SpaceX ανακοίνωσε τον πανεπιστημιακό διαγωνισμό Hyperloop [12] για να προωθήσει τις υπάρχουσες έννοιες σε ένα υψηλότερο επίπεδο, εξερευνώντας τεχνολογίες που μια μέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε hyperloop πλήρους κλίμακας. Οι διαγωνισμοί πραγματοποιούνται από το 2015 μέχρι και σήμερα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με συμμετέχοντες απ' όλο τον κόσμο. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται εκθετική αύξηση ενδιαφέροντος για το διαγωνισμό. Το σύστημα σωληνώσεων όπως φαίνεται στο σχήμα (2.9) αποτελείται από μήκος 1 χλμ. και διάμετρο 1,8288 μέτρα που βρίσκεται στην έδρα του SpaceX στο Hawthorne της Καλιφόρνιας. Ο σωλήνας είναι επενδυμένος με βάση από μπετόν πάνω στην οποία στερεώνονται οι πλάκες αλουμινίου (Al 6101). Για το 2020 ο διαγωνισμός ανακοινώθηκε ότι θα πραγματοποιηθεί για μια διαδρομή μήκους 10 χλμ., δηλαδή δέκα φορές περισσότερο από τη διαδρομή που χρησιμοποιήθηκε τα πρώτα χρόνια του διαγωνισμού.



Σχήμα 2.9: Ο Διαγωνισμός Hyperloop Pod.

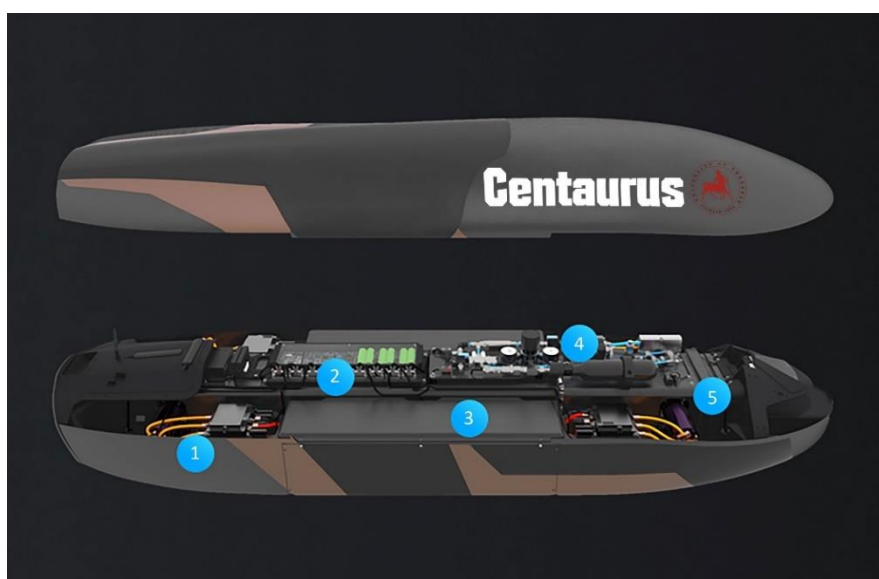
Το πιο βασικό κριτήριο βαθμολόγησης στο διαγωνισμό είναι ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης, συνεπώς ο κύριος στόχος των ομάδων είναι η επίτευξη της μέγιστης ταχύτητας του οχήματος, αλλά και η επιτυχής επιβράδυνση τηρώντας τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Για την επιτυχία των παραπάνω κριτηρίων, καθίσταται απαραίτητη η συνεισφορά διαφόρων κλάδων μηχανικής, όπως είναι η αντοχή υλικών, η στατική, η δυναμική και η τριβολογία.

Για την αιώρηση του οχήματος, επιτρέπονται τρεις παραλλαγές σχεδιασμού. Η πρώτη επιλογή είναι η χρήση ρουλεμάν αέρα. Ο σχεδιασμός αυτός βασίζεται στη δημιουργία ενός στρώματος αέρα έτσι ώστε να γλιστρήσει το όχημα. Η δεύτερη

παραλλαγή στηρίζεται στην ιδέα της μαγνητικής αιώρησης, η οποία έχει αναλυθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.2. Ένας άλλος σχεδιασμός εφαρμόζει δύο διαφορετικούς τρόπους, αρχικά για ταχύτητες μικρότερες των 100 m/h χρησιμοποιούνται τροχοί, ενώ για υψηλότερες ταχύτητες χρησιμοποιούνται ρουλεμάν αέρα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα πρόχειρο μοντέλο και επισημαίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος Hyperloop [13]. Επιπροσθέτως, τα χαρακτηριστικά αυτά αναλύονται με βάση τις απαιτήσεις του διαγωνισμού.

1. Μονάδα προώθησης υψηλής ταχύτητας.
2. Τηλεμετρία και πίνακας ελέγχου.
3. Θάλαμος Μπαταριών.
4. Πνευματικό σύστημα πέδησης.
5. Σασί καλυμμένο με ανθρακόνημα.



Σχήμα 2.10: Πρωτότυπο σχέδιο της TUM για τον διαγωνισμό Hyperloop Pod.

Παρακάτω περιγράφονται οι απαιτήσεις του διαγωνισμού.

- **Μάζα:** Οι μάζα του hyperloop πρέπει να είναι λιγότερο από 5.000 κιλά
- **Διαστάσεις:** Το όχημα πρέπει να έχει μήκος μικρότερο από 14 πόδια δηλαδή 4,572 μέτρα με οποιοδήποτε σχήμα υπό την απαίτηση να χωράνε μέσα στον σωλήνα. Οι διαστάσεις μπορούν να αλλάξουν κάθε χρόνο για αυτό λοιπόν προτού κυκλοφορήσουν οι ακριβείς διαστάσεις για να έχουμε μια εικόνα μπορούμε να εκτιμήσουμε πως οι πλάκες θα πρέπει να έχουν πλάτος

μικρότερο από 1,066 μέτρα στη βάση, μέγιστο πλάτος μικρότερο από 1,3716 μέτρα και ύψος μικρότερο από 1,143 μέτρα.

- Πρώθηση: Η κίνηση του οχήματος θα πρέπει να είναι σε χαμηλές ταχύτητες όταν βρίσκεται εκτός λειτουργίας το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση τροχών ή με τον έλεγχο από απόσταση (τηλεχειριστήριο).
- Ανύψωση: Ο μηχανισμός ανύψωσης μπορεί να είναι μία από τις παραλλαγές που περιεγράφηκαν παραπάνω, δηλαδή με ρουλεμάν αέρα, με μαγνητική αιώρηση ή με τροχούς.
- Φρενάρισμα: Είναι απαραίτητο κάθε όχημα να μπορεί να ελέγχει την ταχύτητα του με οποιονδήποτε τρόπο. Το SpaceX μπορεί να παρέχει μόνιμες μαγνήτες στο τέλος του σωλήνα έτσι ώστε να επιτρέψει το φρενάρισμα ανέπαφα με τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.
- Επικοινωνίες: Παρέχεται ένα δίκτυο 2,4 GHz για τις επικοινωνίες δεδομένων και εντολών μέσα στο σωλήνα. Οι αποστολές και οι λήψεις θα πρέπει να αποδεικνύονται κατά την διάρκεια δοκιμών.
- Ταλαντώσεις: Τα οχήματα θα πρέπει να εγκαταστήσουν μια αυτόνομη συσκευή για την εγγραφή των δεδομένων έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης του δυναμικού περιβάλλοντος, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση.

### 2.3 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην ενότητα 2, παρουσιάστηκε η δομή, καθώς και η αρχή λειτουργίας του τρένου Maglev. Διάφορες μέθοδοι αιώρησης αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Εκτός από τα τρένα Maglev, έγινε μια εισαγωγή στην τεχνολογία Hyperloop. Εν συνεχεία, μελετήθηκαν και υπολογίστηκαν τα κόστη εφαρμογής μιας τέτοιας τεχνολογίας για ένα ταξίδι μεταξύ Λος Άντζελες και Σαν Φρανσίσκο. Επιπλέον, δόθηκαν πληροφορίες και παρουσιάστηκαν οι απαιτήσεις του διαγωνισμού Hyperloop Pod.

Στην επόμενη ενότητα, θα δούμε την εφαρμογή της μαγνητικής αιώρησης που βασίζεται σε ένα πείραμα, με σκοπό τη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου στο οποίο θα αιωρείται και θα ελέγχεται η τροχιά μιας ατσάλινης σφαίρας. Καθώς από τη φύση του το σύστημα είναι μη γραμμικό και ασταθές, η επίτευξη της δυναμικής ανάλυσης, απαιτεί αρχικά η γραμμικοποίηση του συστήματος.



# Κεφάλαιο 3. Πείραμα μαγνητικής αιώρησης

## 3.1 Περιγραφή του συστήματος μαγνητικής αιώρησης

Την παραπάνω τεχνολογία δεν την συναντάμε μόνον στην προαναφερθείσα περίπτωση, αλλά ούτε αποτελεί καινούρια τεχνολογική προσπάθεια. Διάφορες ερευνητικές ομάδες έχουν εργασθεί για την βελτίωση, ανάπτυξη και εύρεση εναλλακτικών μοντέλων βασιζόμενοι στην τεχνολογία αυτή.

Θα κάνουμε μία περιγραφή του συστήματος μαγνητικής αιώρησης, σύμφωνα με ένα πείραμα [14]. Ο στόχος του πειράματος είναι η αιώρηση και ο έλεγχος της τροχιάς μιας χαλύβδινης σφαίρας με τη χρήση της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, που παρέχεται από έναν ηλεκτρομαγνήτη. Η μονάδα του σχήματος [3.1] αποτελείται από μία βάση στην οποία τοποθετούμε την σφαίρα, έναν αισθητήρα θέσεως και την χαλύβδινη σφαίρα. Έχουμε τη σφαίρα μέσα σε ένα κουτί αποτελούμενο από τρεις θαλάμους. Στον πάνω θάλαμο τοποθετούμε τον ηλεκτρομαγνήτη με τέτοιο τρόπο ώστε ο πόλος του να βρίσκεται επάνω από την σφαίρα, δηλαδή στο μεσαίο θάλαμο. Η βάση κατασκευάζεται προκειμένου να απέχει η σφαίρα 14mm από τον ηλεκτρομαγνήτη. Ο τελευταίος θάλαμος περιέχει το ποτενσιόμετρο και τον αισθητήρα της θέσης.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο βασικά υποσυστήματα, το μηχανικό και το ηλεκτρικό υποσύστημα. Μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος μπορούμε να ελέγχουμε την θέση στην οποία θα βρίσκεται η σφαίρα. Για να μεταβληθεί η ένταση αυτή θα πρέπει να εφαρμοστεί η κατάλληλη τάση στο ηλεκτρικό υποσύστημα.



Σχήμα 3.1: Μηχανική μονάδα του πειράματος.

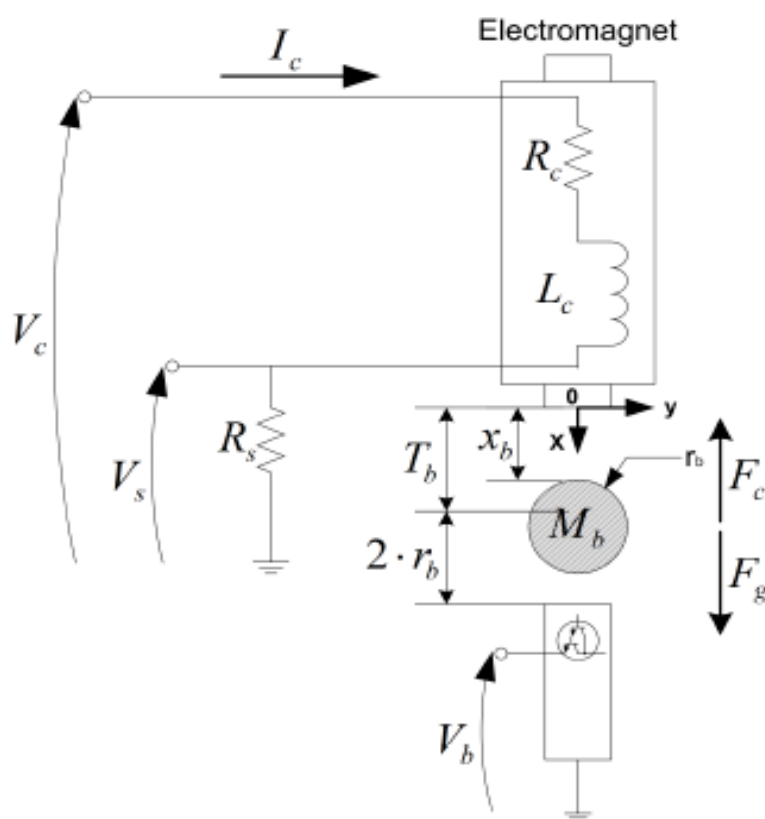
<b>Σύμβολα</b>	<b>Ορισμοί</b>	<b>Τιμές</b>
$L_c$	Επαγωγή της σπείρας	412.5 mH
$R_c$	Αντίσταση του πηνίου	10 Ω
$K_m$	Δύναμη σταθεράς του ηλεκτρομαγνήτη	$6.5308 \times 10^{-5} \text{ Nm}^2/\text{A}^2$
$K_b$	Ευαισθησία του αισθητήρα	0.0028
$m_b$	Μάζα της μπάλας	0.068 kg
$N_c$	Αριθμός περιστροφών του σύρματος	2450
$g$	Επιτάχυνση βαρύτητας	$9.81 \text{ m/s}^2$
$R_s$	Αντίσταση αίσθησης της έντασης	1 Ω
$r_c$	Ακτίνα πηνίου	0.008 m
$r_b$	Ακτίνα της μπάλας	0.0127 m
$I_c$	Ρεύμα του πηνίου	0.0825

Πίνακας 3.1: Παράμετροι του πειράματος.

### 3.2 Γραμμικοποίηση του συστήματος μαγνητική αιώρησης

Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο σχήμα [3.2]. Για να προσδιοριστεί το ρεύμα του πηνίου, χρησιμοποιείται η αντίσταση  $R_s$  η οποία είναι τοποθετημένη σε σειρά με το πηνίο προκειμένου να μετρηθεί η τάση με την χρήση A/D μετατροπέα.

- Ηλεκτρικό Υποσύστημα



Σχήμα 3.2: Σχηματική παράσταση της μονάδας μαγνητικής αιώρησης.

Το πηνίο που χρησιμοποιείται στον ηλεκτρομαγνήτη έχει επαγωγικότητα  $L_c$  (Henry) και αντίσταση  $R_c$  (Ohm). Η τάση  $V_c$  (Volt) που εφαρμόζεται στο πηνίο έχει ως αποτέλεσμα ένα ρεύμα  $I_c$  που διέπτετε από τη διαφορική εξίσωση :

$$V_c = I_c R_c + L_c \frac{dI_c}{dt} \quad (3.1)$$

Το πλήρες σύστημα όμως περιέχει και την αντίσταση  $R_s$  η οποία όπως είπαμε είναι απαραίτητη για την μέτρηση της τάσης από το μετατροπέα. Έτσι λοιπόν η ολική τάση δίνεται από :

$$V = I_c (R_c + R_s) + L_c \frac{dI_c}{dt} \quad (3.2)$$

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό La Place η συνάρτηση μεταφοράς του ηλεκτρικού υποσυστήματος γίνεται :

$$G_e(s) \triangleq \frac{I_c(s)}{V(s)} = \frac{1}{L_c s + (R_c + R_s)} \quad (3.3)$$

- Μηχανικό Υποσύστημα

Το πιο απλό μη γραμμικό μοντέλο για το Maglev, που να συσχετίζει τη θέση της μπάλας  $x_b$  (χιλιοστά) με το ρεύμα του πηνίου  $I_c$  (Αμπέρ), δίνεται από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ως

$$F = m_b g - K \left( \frac{I_c^2}{x_b^2} \right) \quad (3.4)$$

Το δεξιό μέλος προκύπτει από το νόμο του Coulomb, όπου το  $k$  είναι η σταθερά η οποία εξαρτάται από τις ηλεκτρομαγνητικές παραμέτρους του πηνίου. Παρατηρούμε επίσης ότι η μη γραμμικότητα εμφανίζεται τόσο στο ρεύμα του πηνίου όσο και στη θέση της σφαίρας.

$$m_b \ddot{x}_b = m_b g - K \frac{I_c^2}{x_b^2} \quad (3.5)$$

Για να γίνει δυναμική ανάλυση και η σχεδίαση ελέγχου, θα πρέπει πρώτα το σύστημα να γραμμικοποιηθεί. Η γραμμικοποίηση γίνεται στο σημείο ισορροπίας ( $x_0$ ,  $i_0$ ). Οι καταστάσεις του συστήματος είναι  $x_1 = x_b$  και  $x_2 = \dot{x}$  για την θέση και την ταχύτητα αντίστοιχα, και ως είσοδος το ρεύμα  $I_c$ .

Το άνωμα κατάστασης είναι:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

Παραγωγίζεται το άνωσμα κατάστασης και γίνεται:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{x} & \dot{x}_1 &= f_1(x_b, I_c) = x_2 \\ \dot{x}_2 &= \ddot{x} & \Rightarrow & \dot{x}_2 = f_2(x_b, I_c) = g - K \frac{I_c^2}{x_b^2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι Ιακωβιανές του συστήματος:

$$\begin{aligned} f_x[x_0, i_0] &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}_{\substack{x=x_0 \\ i=i_0}} & \& & f_i[x_0, i_0] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial i} \\ \frac{\partial f_2}{\partial i} \end{bmatrix}_{\substack{x=x_0 \\ i=i_0}} \\ \Rightarrow f_x[x_0, I_0] &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2KI_c^2}{m_b x_1^3} & 0 \end{bmatrix}_{\substack{x=x_0 \\ I_c=I_0}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2KI_0^2}{m_b x_0^3} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow f_i[x_0, I_0] = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-2KI_c}{m_b x_1^2} \end{bmatrix}_{\substack{x=x_0 \\ I_c=I_0}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-2KI_0}{m_b x_0^2} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Εφαρμόζοντας το γραμμικοποιημένο σύστημα στο σημείο ισορροπίας έχουμε:

$$\dot{X} = f_x[x_0, I_0] \cdot (X - X_0) + f_i[x_0, I_0] \cdot (I_c - I_0) \Rightarrow \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-2KI_0^2}{m_b x_0^3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_{1_0} \\ x_2 - x_{2_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-2KI_0}{m_b x_0^2} \end{bmatrix} (I_c - I_0) \Rightarrow \quad (3.10)$$

Αντικαθιστώντας τα  $x_{1_0}=x_0$  και  $x_{2_0}=0$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{2KI_0^2}{m_b x_0^3} (x_1 - x_0) - \frac{2KI_0}{m_b x_0^2} (I_c - I_0) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Λύνουμε ως προς την επιτάχυνση βαρύτητας και έχουμε  $g = \frac{KI_0^2}{m_b x_0^2}$

Η αντικατάσταση της επιτάχυνσης βαρύτητας προκύπτει:

$$\dot{x}_2 = \frac{2g}{x_0} x_1 - 2g - \frac{2g}{I_0} I_c + 2g \Rightarrow \quad \dot{x}_2 = \frac{2g}{x_0} x_1 - \frac{2g}{i_0} I_c \quad (3.12)$$

Επομένως η περιγραφή του γραμμικού συστήματος γίνεται από την εξίσωση:

$$\ddot{x} = \frac{2g}{x_0} x - \frac{2g}{i_0} I_c \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} K_i &= 2g / I_0 \\ K_x &= 2g / x_0 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \ddot{x} = K_x x - K_{I_c} I_c \quad (3.14)$$

Εφαρμόζω το μετασχηματισμό La Place,

$$s^2 x = K_x x - K_{I_c} I_c$$

$$(s^2 - K_x) x = -K_{I_c} I_c$$

$$\frac{x}{I_c} = -\frac{K_{I_c}}{(s^2 - K_x)}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι :

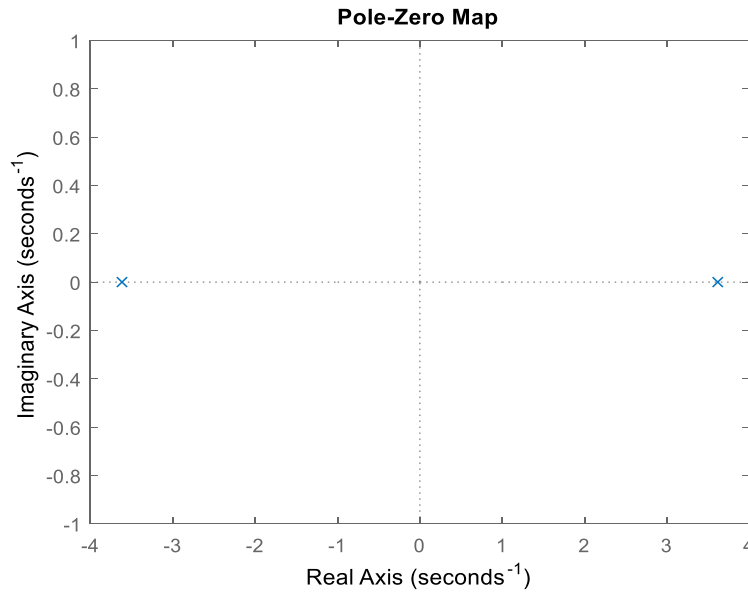
$$G_m(s) \triangleq \frac{x(s)}{I_c(s)} = -\frac{K_{I_c}}{(s^2 - K_x)} \quad (3.15)$$

$$\text{Όπου } K_{I_c} = \frac{2KI_0}{x_0^2 m_b} \quad \text{και} \quad K_x = \frac{2KI_0^2}{x_0^3 m_b} \quad (3.16)$$

Παίρνοντας λοιπόν ως είσοδος το ρεύμα του πηνίου και ως έξοδο τη θέση, η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι η (3.15). Από αυτή την συνάρτηση μεταφοράς είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι εμφανίζεται ένας πόλος στον δεξιό-ημιπίεδο, οδηγώντας το σύστημα στην αστάθεια. Το διάγραμμα πόλων και μηδενικών εμφανίζεται στο σχήμα [3.3].

Μεταβλητές	Περιγραφή	Μονάδες Μέτρησης	Τιμές
m	Μάζα της σφαίρας	( kg )	0,05
k	Σταθερά	( Nm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup> )	2,403 · 10 <sup>-5</sup>
i <sub>0</sub>	Ρεύμα ισορροπίας	( A )	0,8
x <sub>0</sub>	Θέση ισορροπίας	( V )	-1.5
g	Επιτάχυνση Βαρύτ.	( N/m <sup>2</sup> )	9,81
x	Κάθετη μετατόπιση	( m )	-
F <sub>m</sub>	Μαγνητική δύναμη	( N )	-

Πίνακας 3.2: Μεταβλητές εξισώσεων του πειράματος.



Σχήμα 3.3: Οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς με είσοδο του ρεύματος.

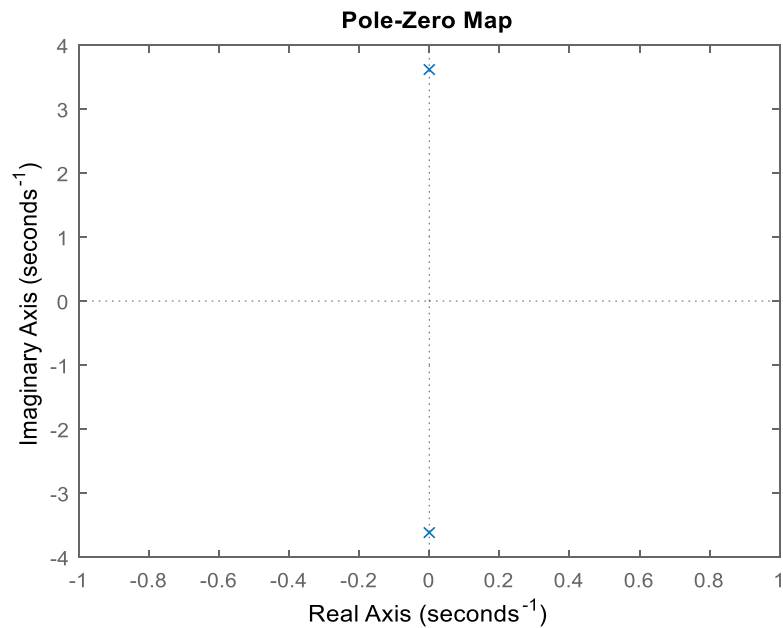
Η συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης [3.15] έχει σαν είσοδο το ρεύμα του πηνίου, για να αποφευχθεί η αστάθεια μπορεί να θεωρηθεί ως είσοδος η τάση του πηνίου στην οποία υπάρχει απευθείας πρόσβαση. Μετά από αυτή την θεώρηση η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται:

$$G(s) = \frac{-k_1 \cdot K_i}{s^2 + K_x} \quad (3.17)$$

Αντίστοιχα η διαφορική εξίσωση της παραπάνω συνάρτησης μεταφοράς είναι :

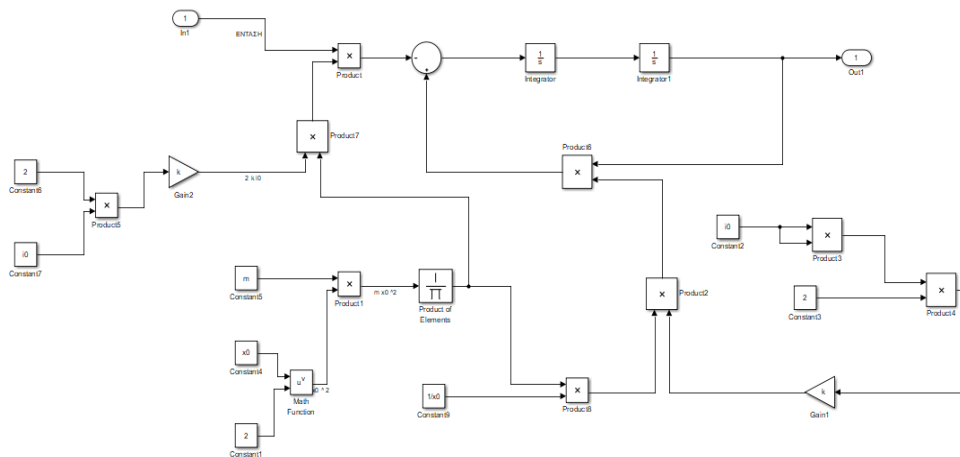
$$\ddot{x} = \frac{2g}{x_0} \cdot x - \frac{2g}{u_0} \cdot u \quad (3.18)$$

Παρατηρείται ότι πλέον υπάρχουν δύο πόλοι στον φανταστικό ημιάξονα διότι μηδενίζοντας τον παρονομαστή, το  $s^2$  γίνεται ίσο με την αρνητική τιμή  $K_x$ . Με αποτέλεσμα η συνάρτηση μεταφοράς να είναι σύστημα δεύτερης τάξης με δύο συζυγείς πόλους στον φανταστικό άξονα. Από τις αρχές ευστάθειας συστημάτων γνωρίζουμε ότι αυτό το σύστημα είναι οριακά ευσταθές. Το διάγραμμα πόλων και μηδενικών της συνάρτησης μεταφοράς (3.17) δίνεται στο σχήμα [3.4].



Σχήμα 3.4: Οι πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς με είσοδο την τάση του πηνίου.

Για τιμές σημείου ισορροπίας  $(x_0, I_0) = (-1.5, 0.8)$  οι παραπάνω τιμές προκύπτουν  $K_{Ic} = 24.525$  και  $K_x = 13.08$ . Στη συνάρτηση μεταφοράς, υπάρχει ένας όρος με αρνητικό πρόσημο, αυτό σημαίνει πως για μία θετική τιμή εισόδου θα έχουμε αρνητική τιμή εξόδου. Εισάγοντας το μοντέλο στο λογισμικό Simulink, για τις ανάγκες των προσομοιώσεων, το μοντέλο που προκύπτει είναι στην παρακάτω μορφή:



Σχήμα 3.5: Γραμμικοποιημένο μοντέλο του συστήματος.



### 3.3 Σύνοψη και συμπεράσματα

Συνοψίζοντας την ενότητα αυτή, δουλέψαμε σε ένα πείραμα μαγνητικής αιώρησης με σκοπό την αιώρηση μιας σφαίρας. Είδαμε αρχικά ότι χρειάστηκε η γραμμικοποίηση του συστήματος διότι από την φύση του ήταν ένα μη γραμμικό σύστημα. Για την μετατόπιση της θέσης, θεωρήσαμε ως σήμα εισόδου το ρεύμα του πηνίου, από τα αποτελέσματα του λογισμικού Matlab/Simulink είδαμε ότι εμφανιζόταν ένας πόλος στο δεξιό ημιεπίπεδο, που οδηγούσε το σύστημα σε αστάθεια. Έτσι λοιπόν θεωρήσαμε ως είσοδο την τάση ελέγχου, οι πόλοι του συστήματος μεταφέρθηκαν πάνω στον φανταστικό άξονα, τροποποιώντας το σύστημα σε οριακά ευσταθές.

Στην ενότητα που ακολουθεί, αρχικά θα δούμε την έννοια των ελεγκτών και στη συνέχεια θα περάσουμε στο υπολογιστικό μέρος ενός πραγματικού τρένου που χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση. Όπως και στην ενότητα αυτή, θα χρειαστεί να γραμμικοποιηθεί το σύστημα με σκοπό να σχεδιαστεί ένας PID ελεγκτής με ανάδραση ταχύτητας. Θα δούμε την συμπεριφορά του συστήματος που αποτελείται από ένα μαγνήτη και ύστερα θα δούμε την εφαρμογή σε ένα πραγματικό μοντέλο με 12 ομάδες μαγνητών.



## Κεφάλαιο 4. Έλεγχος μαγνητικής αιώρησης

### 4.1 Εισαγωγή στους ελεγκτές

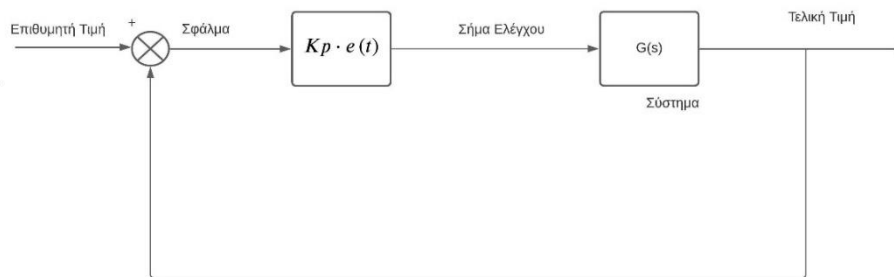
Ο ελεγκτής είναι ένας μηχανισμός που ελέγχει και καθορίζει την λειτουργία διάφορων συστημάτων, έτσι ώστε η τιμή της μεταβλητής εξόδου να βρίσκεται μέσα στις επιθυμητές τιμές. Η αρχική, επιθυμητή τιμή σε ένα σύστημα ελέγχου λέγεται σήμα εισόδου. Από την στιγμή που το σύστημα λαμβάνει αυτό το σήμα, ενεργεί και εκτελεί μια πράξη, με αποτέλεσμα να μας δίνει το σήμα εξόδου. Η διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές λέγεται σήμα σφάλματος. Αποτελείται από έναν ανιχνευτή σφάλματος και μια μονάδα που εκτελεί τις διάφορες μορφές ελέγχου. Αυτό που κάνει ο ανιχνευτής είναι να υπολογίζει το σφάλμα αφαιρώντας την μετρούμενη τιμή του σήματος εξόδου από την επιθυμητή τιμή του σήματος εισόδου. Οι πιο βασικές μορφές ελέγχου είναι ο αναλογικός (proportional P), ο ολοκληρωτικός (integral I), και ο διαφορικός (derivative D).

### 4.2 Τα είδη ελεγκτών και η λειτουργία τους

**Αναλογικός Έλεγχος** : αποτελεί την απλούστερη μορφή ελέγχου. Εκτελεί μια πράξη η οποία είναι ανάλογη ως προς την τρέχουσα τιμή σφάλματος. Στο σχήμα [4.1] παρουσιάζεται το διάγραμμα μπλοκ με αναλογικό ελεγκτή που παράγει το σήμα διέγερσης για το ελεγχόμενο σύστημα  $G(s)$ . Ουσιαστικά είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου στην οποία η τιμή της ανάδρασης αφαιρείται από την επιθυμητή τιμή για να μετρηθεί το σφάλμα. Έπειτα, η τιμή του σφάλματος πολλαπλασιάζεται με την αναλογική σταθερά κέρδους  $K_p$ . Συνεπώς ο αναλογικός όρος δίνεται από τη σχέση:

$$P_{out} = K_p \cdot e(t) \quad (4.1)$$

Έτσι λοιπόν, για μια μικρή τιμή σφάλματος ο ελεγκτής θα εκτελεί μια μικρή πράξη και αντίστοιχα για μια μεγάλη τιμή σφάλματος η πράξη θα είναι μεγαλύτερη. Η πολύ μεγάλη τιμή όμως μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια. Συνήθως απαιτείται ο συνδυασμός του αναλογικού όρου με κάποιο άλλο, διότι πολλές φορές δεν αρκεί για να αντιμετωπίσει τις πιθανές διαταραχές.

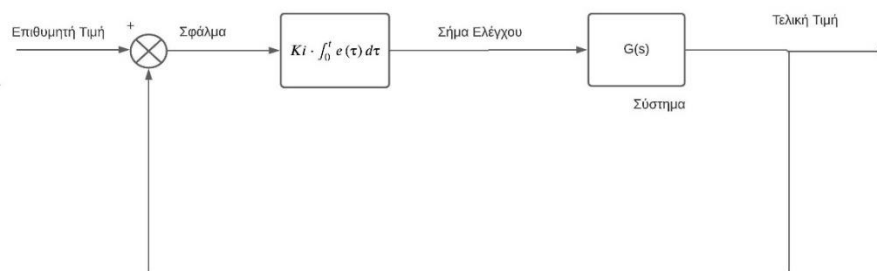


Σχήμα 4.1: Το διάγραμμα block του αναλογικού όρου.

**Ολοκληρωτικός Έλεγχος :** Η συμβολή του όρου είναι ανάλογη με το μέγεθος του σφάλματος και με την διάρκεια του. Ο ολοκληρωτικός όρος αθροίζει το στιγμιαίο σφάλμα με την πάροδο του χρόνου και δίνει την συνολική μετατόπιση που έπρεπε να διορθωθεί προηγούμενος. Το ολικό σφάλμα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με το σταθερό ολοκληρωτικό κέρδος  $K_i$ . Ο ολοκληρωτικός όρος δίνεται από τη σχέση:

$$I_{out} = K_i \cdot \int_0^t e(\tau) \quad (4.2)$$

Για μικρές τιμές σφάλματος η διορθωτική επίδραση του όρου γίνεται αργά, αντίστοιχα για μεγάλες τιμές, η επίδραση γίνεται πιο γρήγορα. Το σφάλμα εξαρτάται από τον χρόνο  $\tau$ , όπου  $\tau$  είναι η μεταβλητή ολοκλήρωσης και παίρνει τιμές από 0 έως την τρέχουσα χρονική στιγμή  $t$ . Επομένως, αν η εφαρμοσμένη δράση δεν αρκεί για να μηδενίσει το σφάλμα, αυτή η δράση θα αυξηθεί με την πάροδο του χρόνου για να μηδενιστεί το σφάλμα.

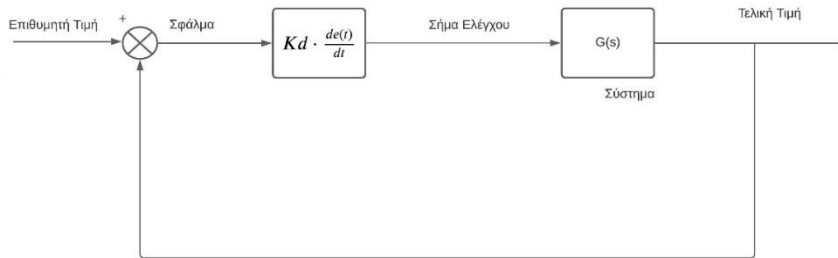


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα block του ολοκληρωτικού όρου.

**Διαφορικός Έλεγχος :** για τον υπολογισμό του καθορίζεται η κλίση του σφάλματος με την πάροδο του χρόνου. Η συμβολή του διαφορικού όρου στη συνολική δράση του ελέγχου λέγεται διαφορικό κέρδος και συμβολίζεται με  $K_d$  και δίνεται από τη σχέση :

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Η πράξη ελέγχου είναι ανάλογη με τον ρυθμό αλλαγής του σφάλματος. Ο σκοπός του διαφορικού ελέγχου είναι να κρατήσει την τροχιά του σφάλματος σε μια οριζόντια γραμμή. Προβλέποντας την συμπεριφορά του συστήματος, βελτιώνει το απαιτούμενο χρόνο ηρεμίας (settling time).

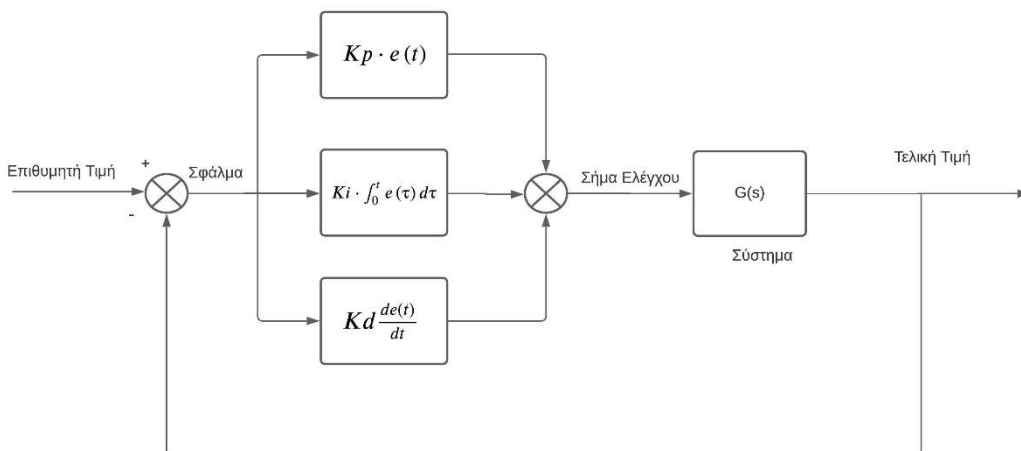


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα μπλοκ του διαφορικού όρου.

**Ελεγκτής τριών όρων :** Ο συνδυασμός των παραπάνω όρων που αναλύθηκαν, αποτελούν τον PID ελεγκτή. Αθροίζοντας τις τρεις εξισώσεις αυτές το σήμα εξόδου του ελεγκτή δίνεται από την εξίσωση:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4.4)$$

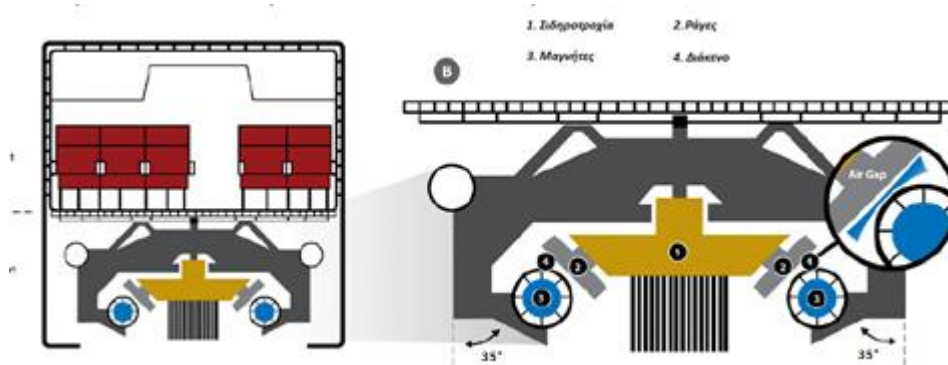
Το διάγραμμα block της παραπάνω εξίσωσης δίνεται στο σχήμα [4.4]. Είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου. Χρησιμοποιώντας την επιθυμητή τιμή εισόδου, αξιολογεί την μεταβλητή ανάδρασης για την δημιουργία του σφάλματος. Έχοντας την τιμή του σφάλματος τροφοδοτεί τον αλγόριθμο PID και αλλάζει την έξοδο του συστήματος έως ότου να μηδενίσει το σφάλμα. Ο αλγόριθμος έχει επαρκή ευελιξία για να αποφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα για διάφορες εφαρμογές. Πολλές πρακτικές εφαρμογές όμως δεν απαιτούν και τους τρεις όρους ελέγχου, χρησιμοποιούνται συχνά και οι ελεγκτές PI και PD.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα block του PID ελεγκτή.

### 4.3 Έλεγχος συστήματος μαγνητικής αιώρησης

Όπως περιγράφεται στις προηγούμενες ενότητες, ο προσανατολισμός του τρένου Maglev αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τμήματα αυτού του τεχνολογικού επιτεύγματος. Η βασικότερη προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία του τρένου βασίζεται στους ισχυρούς και αποτελεσματικούς ελεγκτές οι οποίοι εμποδίζουν την σύγκρουση του τρένου με την ράγα, κρατώντας ένα σταθερό διάκενο αέρα μεταξύ τους. Ένα πολύ ενδιαφέρον κομμάτι αποτελεί η αντίδραση αυτών των ελεγκτών στις εξωτερικές διαταραχές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθούν δύο είδη εξωτερικών διαταραχών. Αρχικά θα δούμε την αντίδραση του συστήματος όταν ασκείται μια ισχυρή δύναμη ανέμου και στη συνέχεια θα εξετάσουμε την περίπτωση που εμφανίζεται μια κλίση στη ράγα.



Σχήμα 4.5: Γεωμετρία του τρένου με ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση

Ο έλεγχος του τρένου επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό ενεργών και παθητικών τεχνικών [14]. Η ενεργή τεχνική της περίπτωσης μας είναι το ενεργό σύστημα ελέγχου, και παθητική τεχνική είναι ο προσανατολισμός των μαγνητών. Τα μαγνητικά πηνία έχουν ανεξάρτητο σύστημα ελέγχου για την επίτευξη του ελέγχου της περιστροφής εμπρός και πίσω. Λόγω της ανεξαρτησίας συστημάτων, το διάκενο αέρα μπορεί να διατηρηθεί στις επιθυμητές τιμές εφόσον οι μαγνήτες που βρίσκονται στο μπροστινό σημείο του τρένου ενεργούν διαφορετικά από τους μαγνήτες που είναι τοποθετημένες πίσω. Από την γεωμετρία του συστήματος οι μαγνήτες θα έχουν κλίση  $35^\circ$ , συνεπώς οι κινήσεις εκτροπής και οι πλευρικές κινήσεις θα ελέγχονται αυτόματα όταν τα κενά διατηρούνται στις ονομαστικές τιμές 2 ίντσες. Για παράδειγμα, μια εξωτερική δύναμη ισχυρού ανέμου εφαρμόζεται από την αριστερή μεριά μετατοπίζοντας το τρένο προς τα δεξιά, το κενό που υπάρχει από την δεξιά πλευρά θα μικραίνει και αντίστοιχα από την αριστερή μεριά θα μεγαλώνει. Έτσι λοιπόν, το σύστημα ελέγχου ανταποκρίνεται σε αυτή την αλλαγή δίνοντας την κατάλληλη τιμή ρεύματος στο μαγνητικό πηνίο, για να διορθώσει την κίνηση επιστρέφοντας το τρένο στην αρχική του θέση.

Μια δεύτερη πολύ σημαντική κίνηση είναι η κίνηση της αιώρησης (πάνω και κάτω). Η μετατόπιση στο διάκενο εμφανίζεται όταν υπάρχει κλίση στη ράγα. Για παράδειγμα, όταν το τρένο κινείται σε μια κατηφόρα αυξάνεται η τιμή του διακένου.

Έπειτα, το σύστημα ελέγχου εκτελεί την σωστή πράξη μειώνοντας το ρεύμα στην κατάλληλη τιμή για να επιστρέψει το κενό στην επιθυμητή τιμή 2 ιντσών.

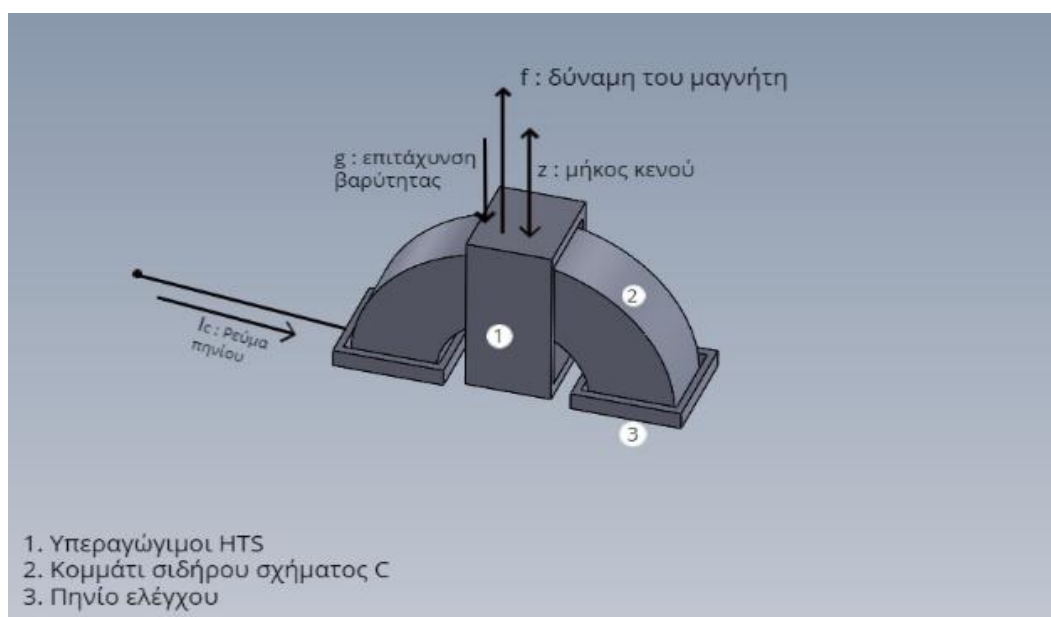
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστεί η σχεδίαση ενός ισχυρού και αποτελεσματικού ελεγκτή ανατροφοδότησης για να ελέγχει το διάκενο της αιώρησης του τρένου Maglev υπό τις ηλεκτρομαγνητικές αναρτήσεις.

### 4.4 Ανάπτυξη γραμμικού μοντέλου του μαγνήτη

Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη  $f$  που ασκείται από το μαγνήτη είναι συνάρτηση του ρεύματος του πηνίου ( $I_c$ ) και του μήκους του κενού ( $z$ ). Ο όρος ( $K$ ) είναι η ηλεκτρομαγνητική σταθερά, η οποία εξαρτάται από τις ηλεκτρομαγνητικές παραμέτρους του πηνίου. Όπως βλέπουμε παρακάτω, η δύναμη αυτή, είναι ανάλογη με το ρεύμα του μαγνητικού πηνίου και αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος του κενού:

$$f = (z, I_c) \rightarrow K \cdot \frac{1}{z^2} I_c^2 \quad (4.5)$$

Η εξίσωση (4.5) αποτελεί την βασική εξίσωση για την ανάπτυξη του μοντέλου, προκύπτει από το νόμο του Coulomb, η οποία μας λέει ότι ανάμεσα σε φορτισμένα σωματίδια που βρίσκονται σε ακινησία, αναπτύσσονται ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Ονομάζουμε λοιπόν τη μάζα του τρένου ως ( $m$ ) και την επιτάχυνση βαρύτητας ως ( $g$ ), έτσι λοιπόν είμαστε πλέον στη θέση να ορίσουμε τις διαφορικές εξισώσεις του απλού δυναμικού μοντέλου.



Σχήμα 4.6: Μαγνήτης ανύψωσης.

Το μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος προέρχεται από την εφαρμογή της θεμελιώδους αρχής της δυναμικής. Επομένως, από την γεωμετρία της ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης προκύπτει η εξίσωση:

$$F = f(z(t), Ic(t)) + Fd(t) - mg \quad (4.6)$$

Η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο σύστημα απαρτίζεται από την ηλεκτρομαγνητική δύναμη  $f(z(t), Ic(t))$ , την δύναμη διαταραχής  $Fd(t)$  και το βάρος  $W=mg$  το οποίο εφαρμόζεται στην αντίθετη κατεύθυνση και έτσι παίρνει αρνητικό πρόσημο. Εφαρμόζοντας τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα στην παραπάνω εξίσωση έχουμε:

$$m \left( \frac{d}{dt} v(t) \right) = f(z(t), Ic(t)) + Fd(t) - mg \quad (4.7)$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} v(t) + g = \frac{f(z(t), Ic(t))}{m} + \frac{Fd(t)}{m} \quad (4.8)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 4.5 στην 4.8 έχουμε:

$$\frac{d}{dt} v(t) + g = \frac{K Ic(t)^2}{z(t)^2 m} + \frac{Fd(t)}{m} \quad (4.9)$$

Ο όρος της ταχύτητας  $v(t)$  στην παραπάνω εξίσωση είναι η παράγωγος του μήκους κενού  $z(t)$  ανάμεσα στην ράγα και στο τρένο.

$$\frac{d}{dt} z(t) = v(t) \quad (4.10)$$

Η δυναμική του συστήματος μαγνητικής αιώρησης είναι γενικά ασταθής και περίπλοκη. Υπόκεινται σε διάφορες πολυπλοκότητες όπως είναι η εγγενείς μη γραμμικότητες εντός του μοντέλου και η αστάθειες του ανοιχτού βρόγχου. Ως εκ τούτου, για να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια, απαιτείται ο σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού και εφικτού ελεγκτή. Για να αποκτήσουμε ακριβές αποτελέσματα του μοντέλου θα πρέπει αρχικά να μοντελοποιήσουμε σωστά την δυναμική του συστήματος. Λόγω της μη γραμμικότητας, εμφανίζονται μεγάλες δυσκολίες στο σχεδιασμό του ελεγκτή, για αυτό είναι απαραίτητο να γραμμικοποιηθεί το σύστημα. Αντικαθιστώντας τις σταθερές τιμές  $g=32.2\text{ft/s}^2$  και  $m=50500$  pounds στην εξίσωση (4.9) έχουμε:

$$\frac{d}{dt} v(t) + 32.2 = \frac{0.000019802 \cdot Ic(t)^2}{z(t)^2} + 0.000019802 \cdot Fd(t) \quad (4.11)$$

Το δυναμικό σύστημα της παραπάνω εξίσωσης έχει δύο εισόδους την ένταση  $Ic(t)$  και τις διαταραχές  $Fd(t)$  ενώ ως έξοδος έχει την θέση  $z(t)$  και την ταχύτητα  $v(t)$ . Συγκεντρώνοντας όλα τα παραπάνω δεδομένα, μπορούμε να πούμε ότι το σύστημα ενός μαγνήτη περιγράφεται από τα παρακάτω δεδομένα :



Σύστημα με δύο εισόδους και δύο εξόδους

Μεταβλητές εισόδου : [  $I_c(t), F_d(t)$  ]

Μεταβλητές εξόδου : [  $z(t), v(t)$  ]

Διαφορική Εξίσωση :

$$\dot{v}(t) + 32.2 = \frac{0.000019802 \cdot I_c(t)^2}{z(t)^2} + 0.000019802 \cdot F_d(t)$$

$$\dot{z}(t) = v(t)$$

## 4.5 Γραμμικοποίηση και ανάπτυξη της δυναμικής του συστήματος

Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η φύση του προβλήματος έτσι ώστε να μοντελοποιηθεί σωστά το σύστημα και ο ελεγκτής. Η έλλειψη του ρεύματος των πηνίων θα προκαλέσει πρόσκρουση του τρένου με την ράγα λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, ομοίως η υπερβολική ποσότητα ρεύματος θα προκαλέσει και πάλι πρόσκρουση διότι ο μαγνήτης θα έλκεται στη ράγα και θα την χτυπήσει. Συνεπώς, αναμένεται η δυναμική του συστήματος να είναι ασταθής κατά την ανάλυση της μη γραμμικής διαφορική εξίσωσης.

Για να διευρυνθεί η δυναμική του συστήματος, ο όρος της δύναμης (4.5) θα πρέπει να γραμμικοποιηθεί. Αρχικά θα επεξεργαστούμε μόνο έναν μαγνήτη και στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση για ένα πραγματικό σύστημα maglev με 12 μαγνήτες. Ο βασικός μαγνήτης σχεδιάζεται για να έχει ονομαστική τιμή N·I 50,000 στροφές αμπέρ. Τα πηνία που παράγουν ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτρέπουν 15.000 στροφές αμπέρ. Επίσης, η ονομαστική τιμή του διάκενου αέρα είναι 2 ίντσες. Τα δεδομένα αυτά καθορίζουν την τιμή που θα πάρει η δύναμη και η μαγνητική σταθερά K. Χρησιμοποιώντας την επέκταση της σειράς Taylor στο σημείο λειτουργίας με 2 ίντσες διάκενο και 50,000 στροφές αμπέρ του ρεύματος, μπορούμε να βρούμε την γραμμικοποιημένη μορφή του μη γραμμικού όρου της δύναμης. Έτσι λοιπόν εφαρμόζοντας την επέκταση της σειράς Taylor έχουμε:

$$f(z, Ic) = f(z_0, Ic_0) + \frac{\partial}{\partial z} f(z_0, Ic_0) \cdot (z - z_0) + \frac{\partial}{\partial Ic} f(z_0, Ic_0) \cdot (Ic - Ic_0) \quad (4.12)$$

Η γραμμική προσέγγιση της συνάρτησης είναι η πρώτη σειρά επέκτασης Taylor γύρω από το σημείο ισορροπίας του συστήματος.

$$f(z, Ic) - f(z_0, Ic_0) = \frac{-2KIc_0^2}{z_0^3} \cdot (z - z_0) + \frac{2KIc_0}{z_0^2} \cdot (Ic - Ic_0) \quad (4.13)$$

Οι όροι με δείκτη μηδέν συμβολίζουν τις ονομαστικές τιμές των αντίστοιχων μεταβλητών.

$$\delta f(z, Ic) = -\frac{2KIc_0^2}{z_0^3} z + \frac{2KIc_0}{z_0^2} Ic \quad (4.14)$$

$$\delta f(z, Ic) = Kz \cdot z + KI \cdot Ic \quad (4.15)$$

Όπου  $Kz = \frac{-2KIc_0^2}{z_0^3}$  και  $KI = \frac{2KIc_0}{z_0^2}$

Οι ονομαστικές τιμές του  $Kz$  και του  $KI$  είναι 281.000 pounds/ft και 3372000 pounds/kA-turn. Από την εξίσωση (4.11) και από το γραμμικοποιημένο μοντέλο, η τελική εξίσωση του συστήματος γίνεται:

$$\frac{d}{dt} v(t) = \frac{Kz \cdot z(t)}{m} + \frac{KI \cdot Ic(t)}{m} + \frac{Fd(t)}{m} \quad (4.16)$$

Παράμετροι	Τιμές
$K$	1
$m$	50500
$g$	32.2
$Kz$	281000
$KI$	3372000

Πίνακας 4.1: Παράμετροι του αρχικού μοντέλου.

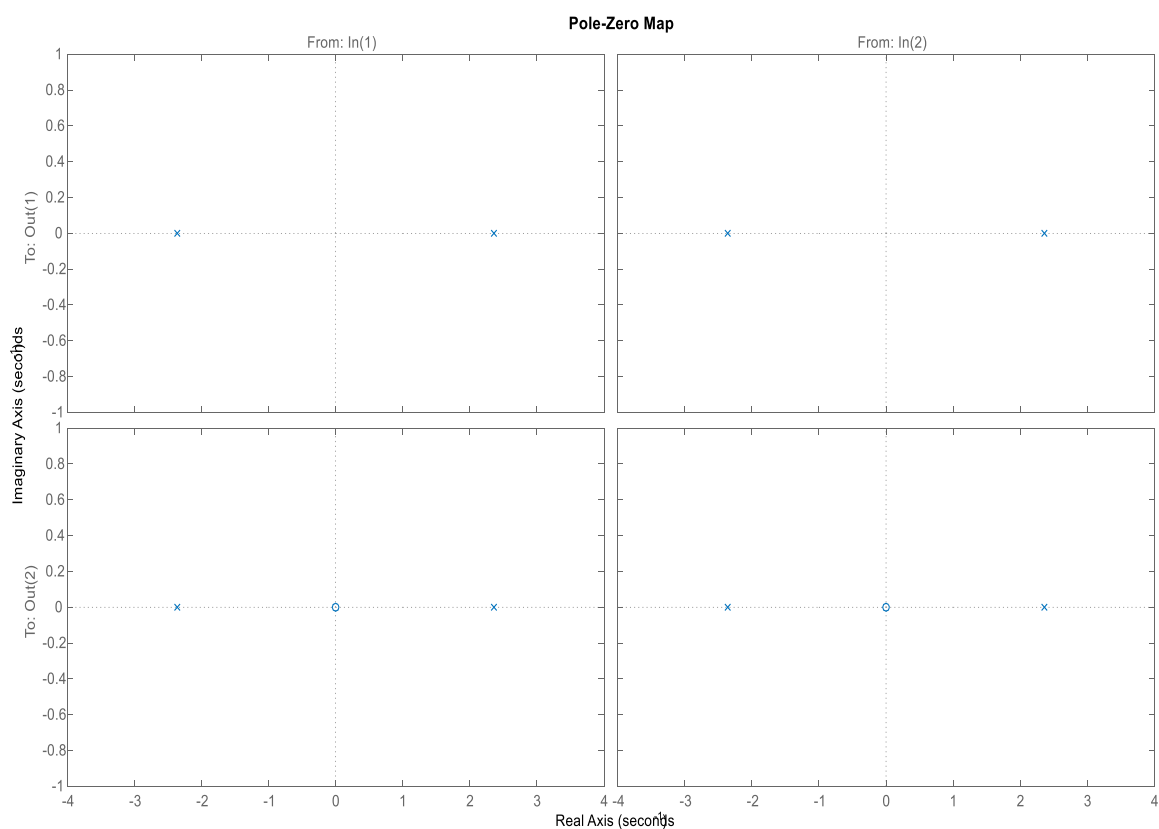
Αντικαθιστώντας τις παραμέτρους του πίνακα στην γραμμικοποιημένη διαφορική εξίσωση (4.16) του σημείου ισορροπίας έχουμε :

$$\frac{d}{dt} v(t) = \frac{562}{101} z(t) + \frac{6744}{101} Ic(t) + \frac{1}{50500} Fd(t) \quad (4.17)$$

## 4.6 Έλεγχος ευστάθειας του γραμμικού μοντέλου

Όπως έχει συζητηθεί, για την καλύτερη κατανόηση και επεξεργασία του ελεγκτή θα πρέπει πρώτα να γίνει κατανοητή η δυναμική του συστήματος. Κάνοντας τις αναλύσεις και υποθέσεις στην προηγούμενη ενότητα, έχουμε βγάλει τις βασικότερες διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την δυναμική του συστήματος, και είμαστε πλέον στη θέση να ξεκινήσουμε την ανάπτυξη του συστήματος ελέγχου. Χρησιμοποιώντας τις διαφορικές εξισώσεις αυτές θα σχεδιάσουμε έναν ελεγκτή ο οποίος θα ελέγχει την συμπεριφορά του συστήματος σε τυχόν διαταραχές. Οι διαταραχές αυτές μπορούν να είναι φυσικές διαταραχές όπως είναι η δύναμη που ασκείται στο τρένο από τον άνεμο ή μεταβολές στον προσανατολισμό του τρένου λόγω της εμφάνισης μιας κλίσης στη ράγα.

Σχεδιάζοντας το σύστημα ελέγχου είναι πολύ σημαντικό να βρούμε αρχικά τους πόλους και τα μηδενικά των συναρτήσεων μεταφοράς, έτσι ώστε να ελέγχουμε την ευστάθεια του συστήματος. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab βρίσκουμε πρώτα τις συναρτήσεις μεταφοράς που περιγράφουν την διαφορική εξίσωση του συστήματος και στην συνέχεια εκτελούμε τον κώδικα για την εύρεση των πόλων και μηδενικών.



Σχήμα 4.7: Οι πόλοι και τα μηδενικά του αρχικού μοντέλου.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας. Τα αποτελέσματα του κώδικα μας δίνουν τις παρακάτω συναρτήσεις μεταφοράς:

$$\begin{aligned} G_{11} &= \frac{6744}{101 \cdot s^2 - 562} & G_{12} &= \frac{1}{50500 \cdot s^2 - 281000} \\ G_{21} &= \frac{6744 \cdot s}{101 \cdot s^2 - 562} & G_{22} &= \frac{s}{50500 \cdot s^2 - 281000} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Η γραμμική εξίσωση που περιγράφει το σύστημα ενός μαγνήτη, όπως είδαμε αποτελεί ένα σύστημα με πολλαπλή είσοδο και πολλαπλή έξοδο γνωστά ως “MIMO systems”. Συγκεκριμένα έχει δύο εισόδους, το ρεύμα των πηνίων  $I_c(t)$  και την διαταραχή  $F_d(t)$ . Επίσης έχει δύο εξόδους, το μήκος του διακένου  $z(t)$  και την ταχύτητα  $v(t)$ . Ο πρώτος δείκτης των συναρτήσεων μεταφοράς εκφράζει την έξοδο, με αριθμό 1 συμβολίζεται η θέση  $z(t)$  και με τον αριθμό 2 συμβολίζεται η ταχύτητα  $v(t)$ . Αντίστοιχα, ο δεύτερος δείκτης εκφράζει την είσοδο, με αριθμό 1 συμβολίζεται το ρεύμα των πηνίων  $I_c(t)$  και με αριθμό 2 συμβολίζεται η διαταραχή  $F_d(t)$ . Από τα αποτελέσματα του σχήματος (4.7) παρατηρείται η ύπαρξη πόλου στο δεξί ημιπέπεδο. Από την θεωρία ελέγχου είναι γνωστό ότι η ύπαρξη πόλου στο θετικό πραγματικό μέρος οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια. Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστεί αναλυτικά ο τρόπος που θα μετατρέψει την αστάθεια του συστήματος σε ευστάθεια.

### **Οι απαιτούμενες μετρήσεις και προδιαγραφές ελέγχου**

Μια μικρή αλλαγή στη θέση της ράγας από παρατυπίες, μπορεί να αγνοηθεί διότι το τρένο κινείται κατά μήκος σε αδρανειακές συντεταγμένες που περιορίζονται ελαφρώς από την εγγύτητα της υποδομής. Γι' αυτό λοιπόν το κενό που δημιουργείται ανάμεσα στο μαγνήτη και στη ράγα, δεν αρκεί σαν δεδομένο για το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου. Έτσι, η μέτρηση του κενού συμπληρώνεται με την μέτρηση της επιτάχυνσης του μαγνήτη προς την ράγα με σκοπό το μηδενισμό της από το σύστημα ελέγχου, διατηρώντας ασφαλές το σύστημα.

Διαμορφώνουμε λοιπόν τον έλεγχο με τις επόμενες προδιαγραφές:

- Μηδενισμός της επιτάχυνσης στην γρήγορη κλίμακα, δηλαδή για χρόνους απόκρισης 0,1s-1s.
- Διατήρηση του κενού στις 2 ίντσες στην αργή κλίμακα, δηλαδή για χρόνους απόκρισης μεγαλύτερες από 1s.
- Για τιμές μέχρι και 1 Hz τροποποιείται το ρεύμα έτσι ώστε να διατηρείται σταθερό το κενό.
- Για υψηλότερες τιμές δηλαδή για τιμές μέχρι και 10 Hz τα πηνία ελέγχου να μηδενίσουν της κάθετες επιταχύνσεις.

#### 4.6.1 Αντικατάσταση προδιαγραφών και των μετρήσεων στο σύστημα ελέγχου

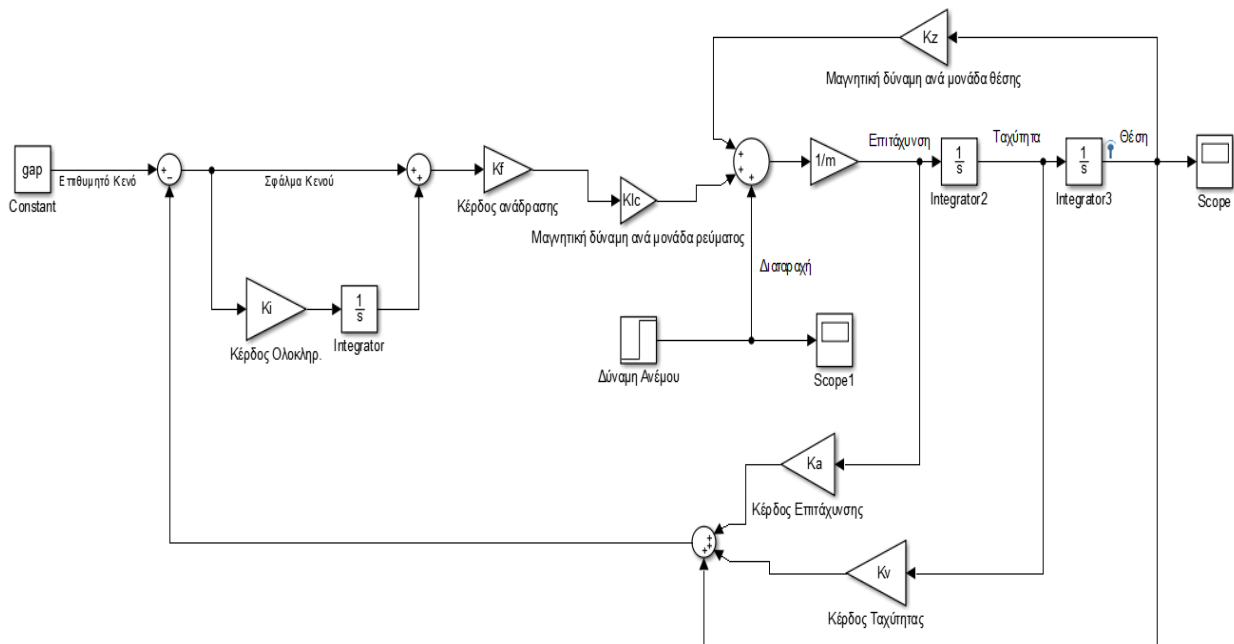
Στην υπό ενότητα αυτή θα γίνει ο σχεδιασμός του γραμμικού συστήματος στο λογισμικό simulink, θα εξαχθούν οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς και τα κέρδη που ορίζουν το πλήρες σύστημα. Για την εκπλήρωση των προδιαγραφών που αναλύθηκαν πάνω, θα χρησιμοποιηθεί ένας PID ελεγκτής με ανάδραση επιτάχυνσης. Τα κέρδη που θα χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό του γραμμικού αυτού ελεγκτή θα είναι:

- $K_a \rightarrow$  Κέρδος επιτάχυνσης
- $K_i \rightarrow$  Κέρδος ολοκληρωτικού όρου
- $K_v \rightarrow$  Κέρδος ταχύτητας (διαφορικός όρος)
- $K_f \rightarrow$  Κέρδος συνολικής ανατροφοδότησης (αναλογικός όρος)

Η συνάρτηση μεταφοράς της ανάδρασης θα είναι :

$$H(s) = K_f (s^2 K_a + s K_v) \left( \frac{K_i}{s} + 1 \right) \quad (4.19)$$

Η εξίσωση αυτή προκύπτει εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό La Place στους όρους της ανάδρασης. Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα είναι η παράγωγος της θέσης, γι' αυτό λοιπόν το κέρδος της ταχύτητας θα πολλαπλασιαστεί με την παράμετρο  $s$  στο πεδίο της συχνότητας. Αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας τον κανόνα μετασχηματισμού για την παράγωγο υψωμένο στο τετράγωνο, η επιτάχυνση θα πολλαπλασιαστεί με την παράμετρο  $s^2$ . Ακολουθώντας το πίνακα του μετασχηματισμού, το κέρδος του ολοκληρωτικού όρου θα διαιρεθεί με την παράμετρο  $s$ . Και τέλος, το κέρδος της συνολικής ανατροφοδότησης θα πολλαπλασιαστεί με όλα τα υπόλοιπα χωρίς να έχει σχέση με την παράμετρο του μετασχηματισμού. Παρακάτω παρουσιάζεται το συνολικό διάγραμμα του γραμμικού ελεγκτή για το μαγνήτη του Maglev υπό την διαταραχή ανέμου.

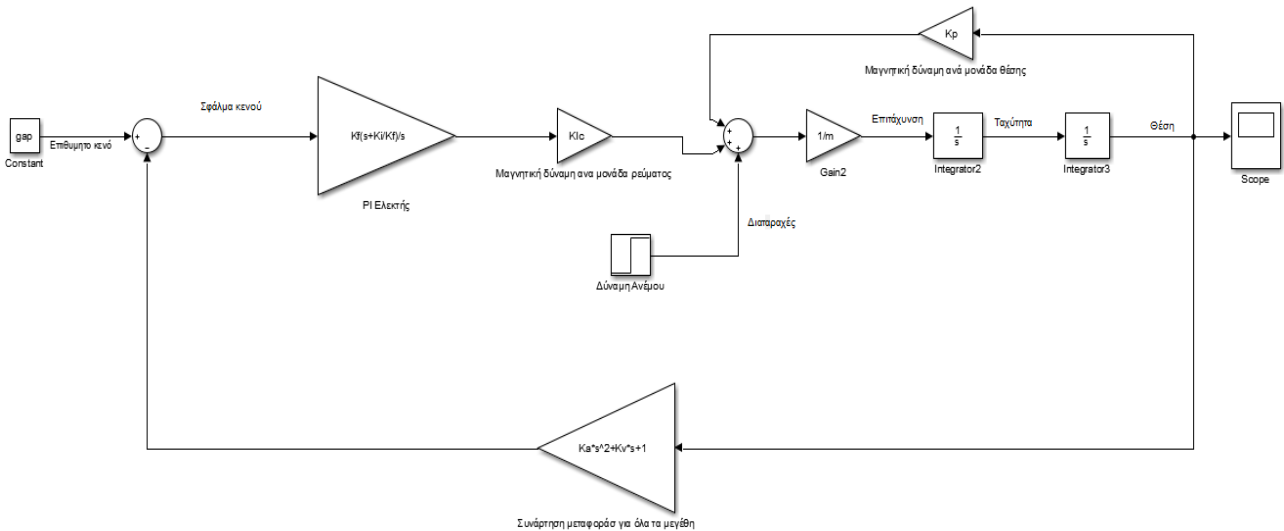


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα block του γραμμικού ελεγκτή.

Για να φτιάξουμε το διάγραμμα μπλοκ, αρχικά προσθέτουμε την είσοδο του συστήματος δηλαδή το σήμα που θέλουμε να ελέγχουμε σε όλη τη διάρκεια του ταξιδιού. Το σήμα εισόδου είναι η επιθυμητή τιμή κενού μεταξύ του μαγνήτη και της ράγας, είναι ένας σταθερός αριθμός ίσο με δύο ίντσες. Στη συνέχεια λαμβάνουν μέρος τα κέρδη του ελεγκτή, τα οποία καθορίζουν την ισχύ της απόκρισης του ελεγκτή που παρατηρείται συγκριτικά με την απόκλιση μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου. Ύστερα από αυτό αρχίζουμε να φτιάχνουμε την διαφορική εξίσωση (4.17) που περιγράφει το σύστημα. Όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του μπλοκ διαγράμματος υπάρχουν δύο ολοκληρωτές, αυτό γίνεται διότι στην διαφορική εξίσωση υπάρχει ο όρος της θέσης αλλά και της επιτάχυνσης. Το σήμα εξόδου θα είναι η ελεγχόμενη μεταβλητή  $z(t)$  η οποία εκφράζει το μήκος του διακένου, ο όρος αυτός πολλαπλασιάζεται με την μαγνητική δύναμη ανά μετατόπιση  $K_z$ , και επιστρέφει στο αθροιστικό σημείο με θετικό πρόσημο. Οι άλλοι όροι που προστίθενται στο αθροιστικό σημείο είναι οι διαταραχές  $F_d(t)$  και η μαγνητική δύναμη ανά μονάδα ρεύματος  $K_{ic}$ . Από την διαφορική εξίσωση παρατηρούμε ότι όλοι οι όροι έχουν θετικά πρόσημα και διαιρούνται με την μάζα  $m$ , έτσι λοιπόν όλοι οι είσοδοι του αθροιστικού σημείο θα έχουν θετικό πρόσημο και θα πολλαπλασιαστούν με το  $1/m$ . Η ανάδραση αποτελείται από τρεις όρους, την επιτάχυνση, την ταχύτητα και την θέση. Αντίστοιχα το κέρδος της επιτάχυνσης θα είναι το  $K_a$  και της ταχύτητας το  $K_v$ . Αντι να έχουμε κέρδος στην θέση θα υποθέσουμε ότι ολόκληρος ο έλεγχος ανατροφοδότησης θα πολλαπλασιαστεί με ένα κέρδος βρόχου  $K_f$ .

**Μετατροπή του συστήματος σε σύστημα δεύτερης τάξης**

Γνωρίζοντας καλά την δομή του συστήματος μπορούμε να φτιάξουμε και να αναλύσουμε το διάγραμμα μπλοκ για να εξασφαλίσουμε την σωστή λειτουργία του συστήματος με τη χρήση λογισμικού. Τα πιο σύνθετα διαγράμματα μπορούμε να τα επεξεργαστούμε για να τα φέρουμε σε πιο απλή μορφή με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και το χειρισμό. Ως εκ τούτου, μετά από μικρές αλλαγές το διάγραμμα γίνεται όπως το σχήμα[4.9].



Σχήμα 4.9: Απλοποιημένο διάγραμμα block του γραμμικού ελεγκτή.

Λύνοντας το διάγραμμα μπλοκ του σχήματος καταλήγουμε στη συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει το ολικό σύστημα:

$$G(s) = \frac{K_f K I_c \left[ \frac{(s + K_i)}{s(s^2 - \frac{K_z}{m})} \right]}{1 + \frac{(K_a s^2 + K_v s + 1) \cdot K_f \cdot K I_c \cdot (s + K_i)}{s(s^2 - \frac{K_z}{m})}} \quad (4.20)$$

Προτού προσδιοριστούν τα κέρδη του συστήματος είναι σκόπιμο να εξηγηθεί η έννοια της ευστάθειας και το πως επηρεάζει το σύστημα. Ένα σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία όταν το σήμα εξόδου παραμένει σταθερό παρά τις εξωτερικές διαταραχές. Για να είναι αξιόπιστο το σύστημα θα πρέπει να είναι ευσταθές διότι όταν εφαρμοστεί ένα σήμα εισόδου, η έξοδος θα καταλήξει σε μια απόκριση μόνιμης κατάστασης ενώ για ένα ασταθή σύστημα η έξοδος δεν καταλήγει σε μόνιμη κατάσταση, αλλά αυξάνεται απεριόριστα.

Ένα σύστημα είναι ευσταθές όταν το σήμα εξόδου του συστήματος είναι υπό έλεγχο. Στην αντίθετη περίπτωση το σύστημα λέγεται ασταθές. Η ταξινόμηση του συστήματος με βάση την ευστάθεια γίνεται με τρεις τρόπους. Ο πρώτος τρόπος λέγεται απόλυτο σταθερό σύστημα (absolute stable system), εάν για όλο το εύρος τιμών οι πόλοι του συστήματος βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο ανεξάρτητα εάν το σύστημα είναι ανοιχτού ή κλειστού βρόχου, τότε το σύστημα ανήκει σε αυτό το τρόπο. Ένας δεύτερος τρόπος είναι η ευστάθεια υπό όρους (conditionally stable system), στην οποία ανήκει το σύστημα που είναι σταθερό για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών. Ο τρίτος και ο τελευταίος τρόπος λέγεται οριακά ευσταθές σύστημα (marginally stable system), στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο πόλοι ανοιχτού ή κλειστού βρόχου στον φανταστικό άξονα, εάν το σύστημα για οριακή είσοδο παράγει έξοδο με σταθερή συχνότητα ταλαντώσεων και σταθερό πλάτος τότε ανήκει σε αυτή την κατηγορία.

Ένας εύκολος και χρήσιμος τρόπος που χρησιμοποιείται σε ασταθή συστήματα είναι η απλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς. Στη συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης (4.20) παρατηρούμε ότι ο παρονομαστής είναι τρίτης τάξης. Αυτό που μπορούμε να κάνουμε σε μια τέτοια περίπτωση, είναι να επιλέξουμε το  $K_i$  τέτοιο ώστε ο αριθμητής να απλοποιηθεί με τον παρονομαστή και να μετατρέψει το σύστημα τρίτης τάξης σε σύστημα δεύτερης τάξης. Με αυτό το τρόπο λοιπόν, η δυναμική του συστήματος θα είναι δεύτερης τάξης και θα μπορεί να ρυθμιστεί σε οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή. Τα κέρδη του συστήματος θα επιλεγθούν για να βελτιστοποιήσουν την μαγνητική απόκριση σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Για να πραγματοποιηθούν αυτά που αναφέραμε παραπάνω θα πρέπει να υποθέσουμε αρχικά ότι ισχύει:

$$K_i^2 = \frac{K_z}{m} \quad (4.21)$$

Γενικά, ο όρος του αριθμητή είναι ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας της εισόδου, συνεπώς μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή δίχως να επηρεάσει την τελική μορφή των αποτελεσμάτων. Τοποθετώντας την εξίσωση (4.21) στην εξίσωση (4.20) η συνάρτηση μεταφοράς μετατρέπεται σε:

$$G(s) = \frac{[(s + \sqrt{K_z/m}) \cdot K_f \cdot K_{Ic} \cdot m]}{(K_f \cdot K_{Ic} \cdot m \cdot K_a \cdot s^3 + K_f \cdot K_{Ic} \cdot m \cdot K_a \cdot s^2 + K_f \cdot K_{Ic} \cdot m \cdot K_v \cdot s^2 + K_f \cdot K_{Ic} \cdot m \cdot K_v \cdot s + K_f \cdot K_{Ic} \cdot m \cdot s + K_f \cdot K_{Ic} \cdot m + s^3 \cdot m - s \cdot K_z)} \quad (4.22)$$

Ύστερα από αυτό θα βγάλουμε το  $s + \sqrt{K_z/m}$  ως κοινό παράγοντα στο παρονομαστή για να απαλείφει τον όρο του αριθμητή. Οι απλοποιήσεις αυτές γίνονται για να φέρουμε την συνάρτηση μεταφοράς στην επιθυμητή μορφή.



Επιλέγοντας τις κατάλληλες τιμές στα κέρδη  $K_a, K_f, K_i$  θα μετατραπεί η συνάρτηση μεταφοράς σε δευτεροτάξιο σύστημα και θα είναι στη μορφή:

$$\left[ s + \sqrt{\frac{K_z}{m}} \right] \cdot (s^2 + 2\zeta_{\kappa\beta} \cdot \omega_{\kappa\beta} \cdot s + \omega_{\kappa\beta}^2) \quad (4.23)$$

Η παρένθεση αποτελεί την γενική μορφή των συναρτήσεων μεταφοράς δεύτερης τάξης. Τα περισσότερα συστήματα εμφανίζουν ταλαντωτική συμπεριφορά όταν διαταράσσονται από την θέση της στατικής τους ισορροπίας. Ο λόγος απόσβεσης “ζ”, είναι ένα αδιάστατο μέτρο που περιγράφει το πως αποσυντίθενται οι ταλαντώσεις μετά από μια διαταραχή που εφαρμόζεται στο σύστημα. Με τον όρο “ω” συμβολίζονται οι συχνότητες των ταλαντώσεων. Υποτίθεται ότι ο λόγος απόσβεσης του κλειστού βρόχου είναι ίσο με την τιμή  $\sqrt{2}/2$  και η συχνότητα του κλειστού βρόχου ίσο με  $20\pi$ . Για να απλοποιηθούν ακόμη περισσότερο οι εξισώσεις του συστήματος θα υποθεθεί ότι τα μηδενικά που εισάγονται από το κέρδος της επιτάχυνσης και ταχύτητας βρίσκονται στο ίδιο σημείο που υποδηλώνεται με  $\omega_z$ . Έτσι λοιπόν, τα κέρδη γίνονται:

$$K_a = \frac{1}{\omega_z^2} \text{ και } K_v = \frac{1}{\omega_z} \quad (4.24)$$

Περιορίζοντας τα κέρδη έχουμε εξαλείψει τις μη γραμμικότητες στην λύση, οι τιμές αυτές καθορίζονται από τη θέση των μηδενικών. Η συχνότητα του ανοιχτού βρόχου είναι  $\omega_{\alpha\beta} = \sqrt{K_x / m}$ . Έτσι λοιπόν ενώνοντας τους τύπους και αντικαθιστώντας στο τύπο της συνάρτησης μεταφοράς προκύπτει η σχέση:

$$\omega_z = \frac{\omega_{\kappa\beta} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}} \cdot \left( 2 \cdot \zeta_{\kappa\beta} + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}} \right)} \right)}{\left( 2 \cdot \zeta_{\kappa\beta} + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}} \right)} \quad (4.25)$$

Άρα τελικά τα κέρδη έχουν την παρακάτω μορφή :

$$K_a = \frac{1}{\omega_x^2} = \frac{(2 \cdot \zeta_{\kappa\beta} + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}})^2}{[\omega_{\kappa\beta} (1 + \sqrt{1 + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}} (2 \cdot \zeta_{\kappa\beta} + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}})])^2} \quad (4.26)$$

$$K_v = \frac{1}{\omega_x} = \frac{(2 \cdot \zeta_{\kappa\beta} + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}})}{[\omega_{\kappa\beta} (1 + \sqrt{1 + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}} (2 \cdot \zeta_{\kappa\beta} + \frac{\omega_{\alpha\beta}}{\omega_{\kappa\beta}})})]} \quad (4.27)$$

$$K_f = \frac{\omega_{\kappa\beta}}{KI_c \cdot [1 + (\frac{\omega_{\kappa\beta}}{\omega_x})^2]} \quad (4.28)$$

## 4.7 Η τελική μορφή της μοντελοποίησης

Εφόσον έχουν οριστεί και τα τελικά κέρδη μπορούμε να επαληθεύσουμε την καταλληλότητα και την ακρίβεια του σχεδιασμού, εξετάζοντας την απόκριση του συστήματος. Αρχικά θα πρέπει να βρεθούν οι αριθμητικές τιμές των κερδών με σκοπό την δημιουργία και εκτέλεση του μοντέλου υπό την βοήθεια του λογισμικού. Οι παράμετροι του συστήματος παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα :

m	50500
Kx	3372000
Klc	17984
Ka	0.00015866
Kv	0.0252
Ki	28.3599
Kf	2463.2

Πίνακας 4.2: Παράμετροι του συστήματος.

Η εύρεση των διαφορικών εξισώσεων μπορεί να γίνει με την χρήση του διαγράμματος μπλοκ. Συνολικά στο διάγραμμα υπάρχουν τρεις ολοκληρωτές,

επομένως το σύστημα θα περιγράφεται από τρεις διαφορικές εξισώσεις. Ξεκινώντας από την δεξιά μεριά του διαγράμματος, μεταβαίνουμε από ολοκληρωτή σε ολοκληρωτή για κάθε κατάσταση. Αρχίζουμε λοιπόν από τον ολοκληρωτή της ταχύτητας,

$$v(t) = \frac{d}{dt} \cdot x(t) \quad (4.29)$$

Ο επόμενος ολοκληρωτής είναι πιο περίπλοκος διότι περιλαμβάνει περισσότερους όρους. Η διαφορική εξίσωση για την επιτάχυνση έχει έναν όρο στα δεξιά που περιλαμβάνει την παράγωγο της ταχύτητας.

Ο ολοκληρωτή της επιτάχυνσης είναι πιο δύσκολο να εκφραστεί:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} v(t) = & \left( \frac{K_z - K_f \cdot K I_c}{m} \right) \cdot x(t) - \frac{K_f \cdot K_v \cdot K I_c}{1 + \frac{K_f \cdot K_a \cdot K I_c}{m}} \cdot v(t) \\ & + \frac{K_f \cdot K I_c}{1 + \frac{K_f \cdot K_a \cdot K I_c}{m}} \cdot a(t) + \frac{K_f \cdot K I_c}{1 + \frac{K_f \cdot K_a \cdot K I_c}{m}} \cdot g(t) + \frac{F d(t)}{m \left( 1 + \frac{K_f \cdot K_a \cdot K I_c}{m} \right)} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Και τέλος ο ολοκληρωτής της αντιστάθμισης.

$$\frac{d}{dt} a(t) = -K_i \cdot K_a \cdot \frac{d}{dt} \cdot v(t) - K_v \cdot K_i \cdot v(t) - K_i \cdot x(t) + K_i \cdot g(t) \quad (4.31)$$

Αντικαθιστούμε τώρα τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων στις διαφορικές εξισώσεις, έτσι ώστε να μπορούμε να λύσουμε το πρόβλημα και να βρούμε την συμπεριφορά του συστήματος που περιγράφεται από αυτές τις εξισώσεις.

### 1<sup>η</sup> Διαφορική Εξίσωση

$$\frac{d}{dt} x(t) = v(t) \quad (4.32)$$

### 2<sup>η</sup> Διαφορική Εξίσωση

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} v(t) = & -3647.333890x(t) - 99.48571587v(t) + 3947.845868a(t) \\ & + 3947.845868g(t) + 0.0002385211688Fd(t) \end{aligned} \quad (4.33)$$

### 3<sup>η</sup> Διαφορική Εξίσωση

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \alpha(t) &= -0.004499 \left( \frac{d}{dt} v(t) \right) - 0.71466948v(t) - 28.3599x(t) + 28.3599g(t) \\ &= -11.948x(t) - 0.267025v(t) + 10.596244g(t) - 1.0732 \cdot 10^{-6} Fd(t) - 17.76365a(t) \end{aligned} \quad (4.34)$$

Τοποθετώντας τις τιμές των παραμέτρων και λύνοντας τις εξισώσεις στο λογισμικό Matlab βρίσκουμε τους πίνακες του χώρου κατάστασης. Ο χώρος κατάστασης αναλύει μια μεγάλη γκάμα συστημάτων στην οποία το σύστημα περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης. Ο κώδικας παρουσιάζεται στο παράρτημα της τελευταίας σελίδας. Εναλλακτικά μπορούμε να λύσουμε το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τα γνωστά βήματα μετατροπής διαφορικών εξισώσεων σε πίνακες μόνιμης κατάστασης. Το σύστημα που μελετάμε είναι ένα MIMO σύστημα, δηλαδή περιέχει περισσότερες από μια εισόδους και εξόδους. Τα MIMO συστήματα μπορούν να περιγραφούν εύκολα με πίνακες, οι είσοδοι και έξοδοι πλέον επεκτείνονται σε ένα διάνυσμα με τον επιθυμητό αριθμό. Η αναπαράσταση της κατάστασης είναι ένα από τις βασικότερες έννοιες στα συστήματα ελέγχου, αποτελεί ουσιαστικά ένα μαθηματικό μοντέλο ενός φυσικού συστήματος με μεταβλητές εισόδων, εξόδων και κατάστασης οι οποίες σχετίζονται με διαφορικές εξισώσεις. Η αναπαράσταση της κατάστασης του συστήματος δίνεται από τις δυναμικές εξισώσεις:

$$X'(t) = AX(t) + BU(t)$$

$$Y(t) = CX(t) + DU(t)$$

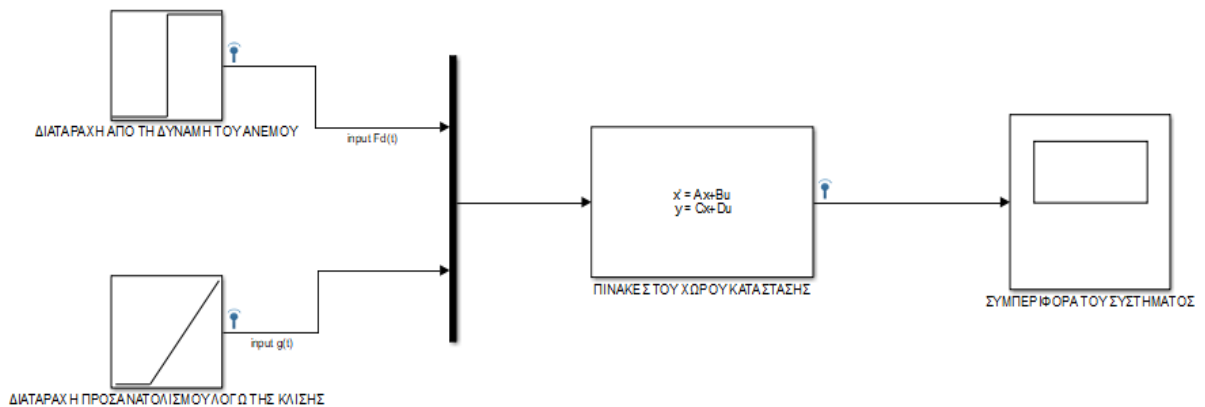
- Ο A είναι τετραγωνικός πίνακας κατάστασης σε διαστάσεις  $n \times n$
- Ο B είναι πίνακας εισόδων σε διαστάσεις  $n \times r$
- Ο C είναι πίνακας εξόδων σε διαστάσεις  $m \times n$
- Ο D είναι πίνακας άμεσης τροφοδοσίας σε διαστάσεις  $m \times r$

Η χρήση της μεθόδου αυτής προτιμάται πολλές φορές λόγω της απλότητας της, ιδιαίτερα στον χώρο προγραμματισμού μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επιτρέπει την κατασκευή μοντέλου χρησιμοποιώντας δεδομένα από διαφορετικές πηγές για την εκτίμηση μιας υποκείμενης ποσότητας. Είναι επίσης ικανό να περιγράψει μη γραμμικά συστήματα και συστήματα που μεταβάλλονται χρονικά. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σπουδαία καθώς δίνει την δυνατότητα μελέτης του συστήματος ανά πάσα στιγμή. "Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα λοιπόν καθιστούν το σύστημα πολύ δυνατό και προτιμότερο από τις συναρτήσεις μεταφοράς. Τα  $X_1, X_2, X_3$  είναι μεταβλητές κατάστασης. Οι μεταβλητές αυτές αντιπροσωπεύουν τον μικρότερο αριθμό μεταβλητών που μπορούν να περιγράψουν την απόκριση του συστήματος εφόσον είναι γνωστή η παρούσα κατάσταση του, οι είσοδοι/έξοδοι και οι διαφορικές

εξισώσεις που αναπαριστούν το σύστημα. Σύμφωνα με της μεταβλητές κατάστασης των διαφορικών εξισώσεων μπορούν να βρεθούν οι πίνακες μόνιμης κατάστασης που αντιπροσωπεύουν την δυναμική του συστήματος. Συνεπώς, από της διαφορικές εξισώσεις (4.32-4.34) προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες:

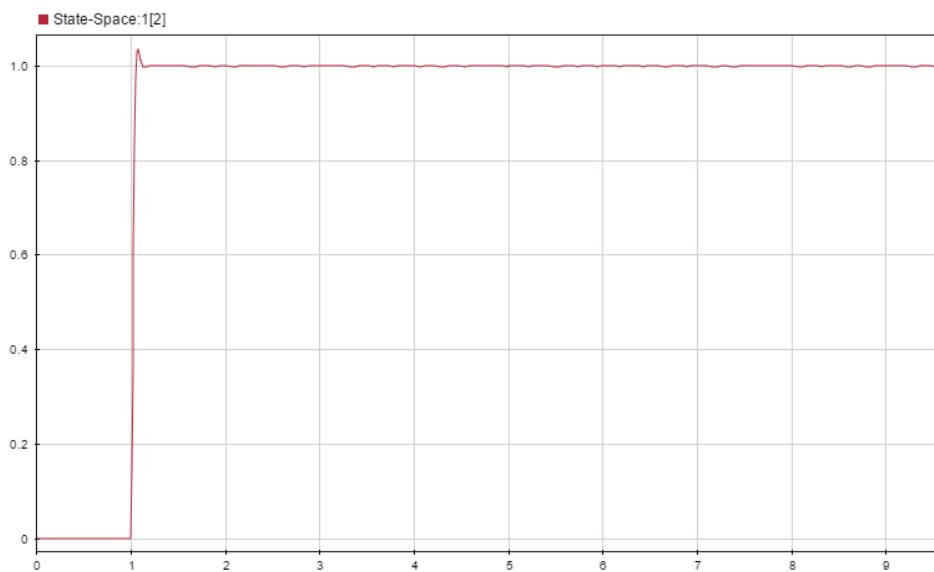
$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -99,4857 & -3647,3339 & 3947,8458 \\ 1 & 0 & 0 \\ -0,2670 & -11,9484 & -17,7636 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0,0002385 & 3947,8458 \\ 0 & 0 \\ -1,07324 \cdot 10^{-6} & 10,5962 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

Εφόσον βρέθηκαν οι πίνακες έχουμε πλέον τη δυνατότητα να επαληθεύσουμε τη λειτουργία του ελεγκτή, παρατηρώντας την ανταπόκριση του σε διαταραχές, όπως είναι η δύναμη που ασκείται από τον άνεμο, και οι αλλαγές στον προσανατολισμό του τρένου. Η δύναμη  $F_d(t)$  των εξισώσεων μπορεί να ρυθμιστεί στο λογισμικό simulink σαν μια βηματική είσοδο και η δύναμη λόγω της κλίσης σαν είσοδο ράμπας. Τα μοντέλο του simulink παρουσιάζεται στο σχήμα (4.10).

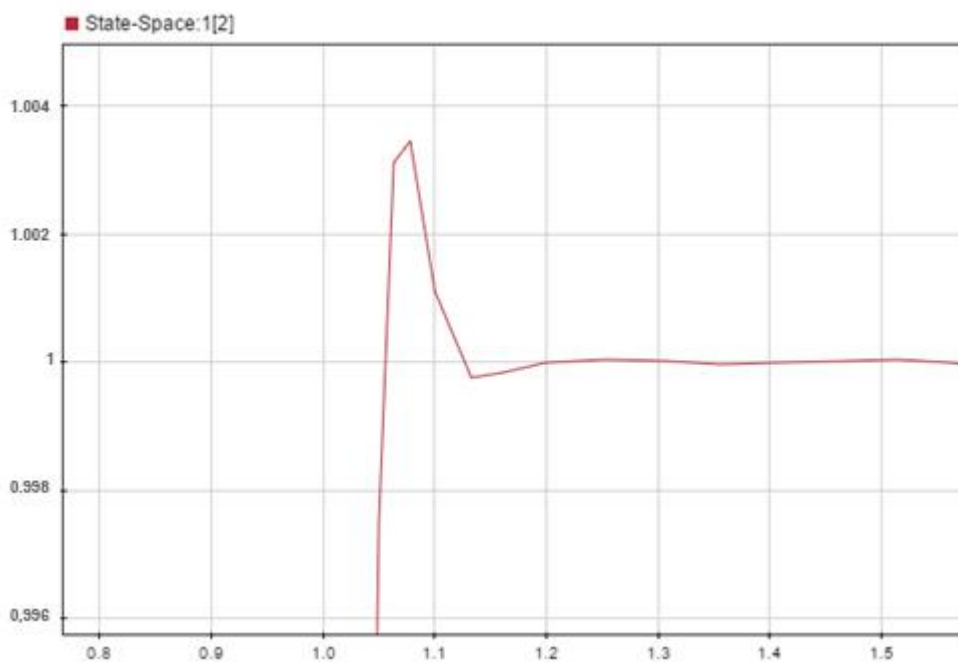


Σχήμα 4.10: Μοντέλο του συστήματος Simulink.

Αντικαθιστώντας όλα τα δεδομένα στο λογισμικό Simulink μπορούμε να σχεδιάσουμε το σύστημα που περιγράφει όλα αυτά που έχουν συζητηθεί μέχρι τώρα, με ένα πολύ απλό τρόπο. Αρχικά όπως φαίνεται στο σχήμα [4.10] προσθέτουμε τις διαταραχές που επηρεάζουν την συμπεριφορά του συστήματος ως είσοδο στο σύστημα. Η διαταραχή λόγω της δύναμης του ανέμου έχει την τιμή 10.000 rounds σε 0.1 δευτερόλεπτο, και η κλίση της ράγας ως 1 ft ανά 10 δευτερόλεπτα. Έπειτα αντικαθιστούμε τις αριθμητικές τιμές που έχουμε βρει στους πίνακες κατάστασης και ελέγχουμε την συμπεριφορά του συστήματος. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν εμφανίζονται στα σχήματα [4.11] και [4.13].

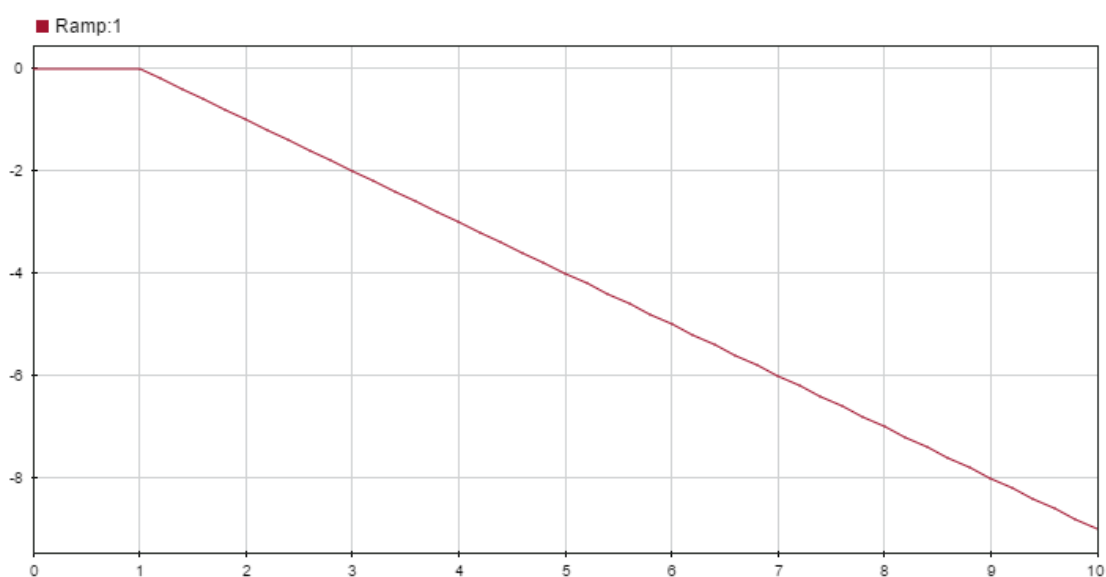


Σχήμα 4.11: Συμπεριφορά του συστήματος στις διαταραχές.



Σχήμα 4.12: Μεγέθυνση του σχήματος 4.11

Παρατηρώντας το αποτέλεσμα που αντιπροσωπεύει την συμπεριφορά του συστήματος στις διαταραχές, βλέπουμε ότι ο ελεγκτής που δημιουργήσαμε είναι ικανός να διορθώσει τις μεταβολές του διάκενου υπό τις ασκούμενες δυνάμεις. Στο σχήμα[4.12] ο κάθετος άξονας  $y$  δίνει το σφάλμα του κενού που μετρείται σε ίντσες και ο οριζόντιος άξονας  $x$  δίνει τα δευτερόλεπτα. Φαίνεται ότι η τιμή της μεταβολής του διακένου είναι μικρότερο από 0,004 ίντσες και διορθώνεται πάρα πολύ γρήγορα, έτσι λοιπόν για τις συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές διαταραχών μπορούμε να συμπεραίνουμε ότι το σύστημα ελέγχου παρέχει υψηλή ασφάλεια στο τρένο πληρώντας όλα τα σχεδιαστικά κριτήρια.

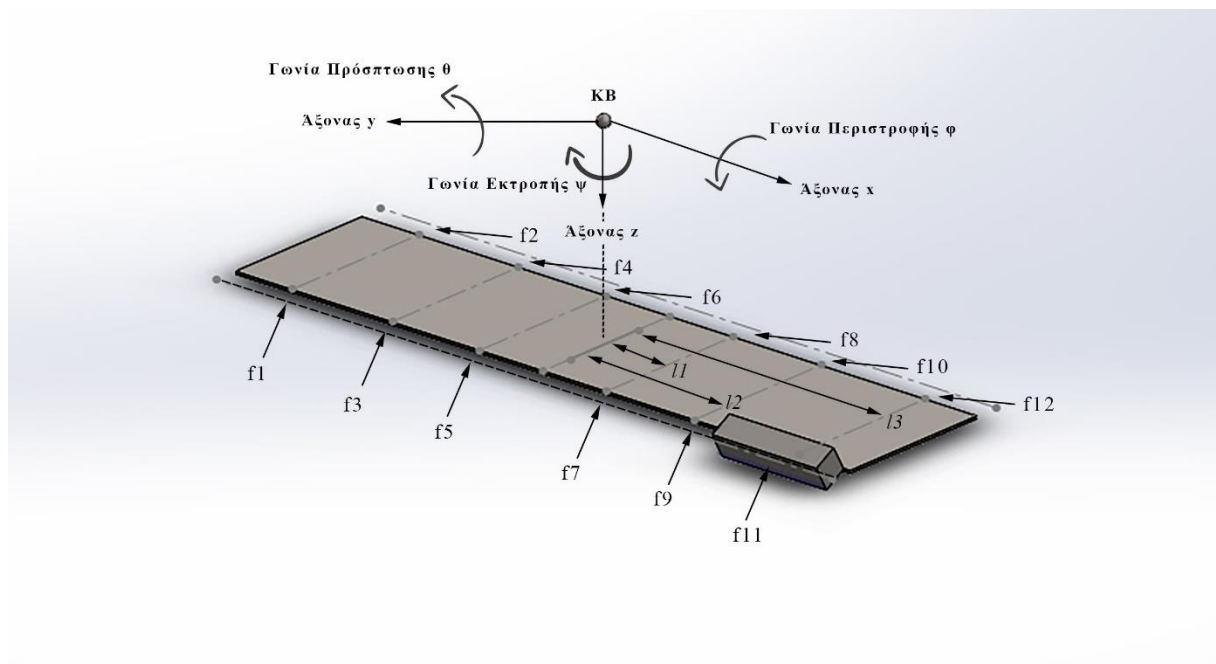


Σχήμα 4.13: Σήμα εισόδου της κλίσης.

Το σχήμα [4.13] εμφανίζει το σήμα εισόδου της διαταραχής στην περίπτωση που υπάρχει μια κλίση στη ράγα. Όπως έχει δοθεί παραπάνω, η κλίση θα είναι 1ft ανά 10 δευτερόλεπτα. Στο σχήμα ο κάθετος άξονας  $y$  μετρείται σε ίντσες και ο οριζόντιος άξονας  $x$  σε δευτερόλεπτα, επομένως η κλίση θα είναι 0.833 ίντσες ανά δευτερόλεπτο. Το σήμα εισόδου είναι στις αρνητικές τιμές του  $y$ , αυτό σημαίνει ότι η κλίση της ράγας είναι προς τα κάτω.

## 4.8 Μοντέλο του πραγματικού συστήματος

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε μελέτη ενός μαγνήτη, στην ενότητα αυτή θα δούμε την συμπεριφορά του συστήματος για ένα πραγματικό σύστημα τρένου μαγνητικής αιώρησης σε διαταραχές ανέμου και σε αλλαγές κατευθύνσεων. Το πραγματικό σύστημα αποτελείται από 12 ομάδες των 4 μαγνητών όπως φαίνεται στο σχήμα [4.14]. Ο στόχος είναι να διατηρηθεί το διάκενο αέρα μεταξύ του τρένου και της ράγας για κίνηση ανύψωσης, πρόσπτωσης, ταλάντωσης και εκτροπής.



Σχήμα 4.14: Γεωμετρία του συνολικού συστήματος Maglev.

Η γεωμετρία και η θέση των μαγνητών αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό του τρένου διότι οι ροπές και οι δυνάμεις εξαρτώνται αυστηρά από αυτά. Η προώθηση του τρένου γίνεται από την αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται μέσω των τριφασικών πηνίων τα οποία είναι τοποθετημένα κατά μήκος της σιδηροτροχιάς, με το μαγνητικό πεδίο των ανυψωτικών μαγνητών. Οι μαγνήτες αυτές είναι τοποθετημένες με μία κλίση  $35^\circ$  προς τις χαλύβδινες ράγες. Λόγω της κλίσης που υπάρχει στους μαγνήτες η ελκυστική δύναμη του μαγνήτη χωρίζεται σε κάθετες και οριζόντιες δυνάμεις. Θα ακολουθήσει στη συνέχεια η μαθηματική μοντελοποίηση αυτού του συστήματος στην οποία δεν θα λάβουμε υπόψιν τις δυνάμεις Coriolis.



### **Εξισώσεις Κίνησης**

Οι εξισώσεις κίνησης περιγράφονται από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Όταν ένα σώμα εκτελεί περιστροφική κίνηση η κατανομή των υλικών σημείων βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από τον άξονα περιστροφής, συνεπώς κάποια σημεία εμφανίζουν μεγαλύτερη αντίσταση στην περιστροφή και κάποια σημεία λιγότερη. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα μας δίνει την συσχέτιση της ροπής, της αδράνειας και της περιστροφικής κίνησης. Χρησιμοποιώντας τον νόμο αυτό θα έχουμε δύο διαφορετικούς τύπους για την έκφραση της κίνησης, η μία θα είναι απλή μορφή του νόμου δηλαδή  $F=ma$  ενώ η άλλη θα εκφράζει την περιστροφική κίνηση δηλαδή  $\tau=Ia$ . Όπου  $\tau$  είναι η ροπή,  $I$  είναι η αδράνεια και  $a$  η γωνιακή επιτάχυνση. Ο πρώτος τύπος εκφράζει την γραμμική κίνηση και θα εφαρμοστεί για την μελέτη της ανύψωσης και ταλάντωσης ενώ ο δεύτερος τύπος με την περιστροφική κίνηση θα εφαρμοστεί για την μελέτη της πρόσπτωσης και εκτροπής. Τα διανύσματα  $L_\theta$ ,  $L_\psi$ ,  $L_y$  και  $L_z$  εκφράζουν την κατεύθυνση των δυνάμεων και παίρνουν τις τιμές +1 ή -1 αντίστοιχα. Από την γεωμετρία του συστήματος η δύναμη ως προς τον άξονα  $y$  θα είναι  $F_y=F\sin(\beta)$  και αντίστοιχα για τον άξονα  $z$  θα είναι  $F_z=F\cos(\beta)$ .

#### **Εξίσωση κίνησης για την μελέτη της πρόσπτωσης**

$$I_\theta \frac{d}{dt} \left( \frac{d}{dt} \theta(t) \right) = L_\theta \cdot f \cdot \cos(\beta)$$

$$I_\theta \left( \frac{d^2}{dt^2} \theta(t) \right) = L_\theta \cdot f \cdot \cos(\beta) \quad (4.36)$$

#### **Εξίσωση κίνησης για την μελέτη της εκτροπής**

$$I_\psi \frac{d}{dt} \left( \frac{d}{dt} \psi(t) \right) = L_\psi \cdot f \cdot \sin(\beta)$$

$$I_\psi \left( \frac{d^2}{dt^2} \psi(t) \right) = L_\psi \cdot f \cdot \sin(\beta) \quad (4.37)$$

#### **Εξίσωση κίνησης για την μελέτη της ταλάντωσης**

$$m \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{d}{dt} y(t) \right) = L_y \cdot f \cdot \cos(\beta)$$

$$m \left( \frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) = L_y \cdot f \cdot \cos(\beta) \quad (4.38)$$

**Εξίσωση κίνησης για την μελέτη της ανύψωσης**

$$m \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{d}{dt} z(t) \right) = L_z \cdot f \cdot \sin(\beta)$$

$$m \left( \frac{d^2}{dt^2} z(t) \right) = L_z \cdot f \cdot \sin(\beta) \quad (4.39)$$

**Δυναμική του τρένου**

Οι εξισώσεις του συστήματος κλειστού-βρόχου που εκφράζουν την συνολική συμπεριφορά του τρένου maglev σε όρους ανύψωσης, ταλάντωσης, πρόσπτωσης και εκτροπής επιτυγχάνονται με τον συνδυασμό των εξισώσεων για όλους τους μαγνήτες με τις βασικές εξισώσεις κίνησης που αναλύθηκαν παραπάνω. Η δυναμική του τρένου για τον άξονα z δίνεται από την πρόσθεση όλων των δυνάμεων στον άξονα αυτό. Έτσι λοιπόν εφαρμόζοντας την εξίσωση κίνησης για 12 μαγνήτες και αντικαθιστώντας τους αντίστοιχους παραμέτρους θα έχουμε την παρακάτω εξίσωση. Τα πρόσημα όλων των όρων είναι ίδια εφόσον όλες οι δυνάμεις ανύψωσης εφαρμόζονται προς την ίδια κατεύθυνση. Η εξίσωση αυτή αντιπροσωπεύει την συμπεριφορά του συνολικό συστήματος στην ανύψωση του τρένου.

$$4192.5 \left( \frac{d^2}{dt^2} z(t) \right) = 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v1(t) \right) + 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v2(t) \right)$$

$$+ 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v3(t) \right) + 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v4(t) \right)$$

$$+ 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v5(t) \right) + 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v6(t) \right)$$

$$+ 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v7(t) \right) + 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v8(t) \right)$$

$$+ 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v9(t) \right) + 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v10(t) \right)$$

$$+ 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v11(t) \right) + 286.1912455 \cdot \left( \frac{d}{dt} v12(t) \right) \quad (4.40)$$

Τον ίδιο τρόπο θα εφαρμόσουμε και για τον άξονα γ. Η διαφορά της συγκεκριμένης εξίσωσης από την παραπάνω είναι ο πολλαπλασιασμός της δύναμης με  $\sin(\beta)$  λόγω της γεωμετρίας και η διαφορά των πρόσημων του κάθε όρου λόγω του διανύσματος της κατεύθυνσης. Η εξίσωση αυτή αντιπροσωπεύει την συμπεριφορά του συνολικού συστήματος στην ταλάντωση του τρένου.

$$\begin{aligned}
 4192.5 \left( \frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) &= -200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v1(t) \right) + 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v2(t) \right) \\
 &- 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v3(t) \right) + 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v4(t) \right) \\
 &- 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v5(t) \right) + 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v6(t) \right) \\
 &- 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v7(t) \right) + 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v8(t) \right) \\
 &- 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v9(t) \right) + 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v10(t) \right) \\
 &- 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v11(t) \right) + 200.3932674 \left( \frac{d}{dt} v12(t) \right)
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω οι περιστροφικές κινήσεις δίνονται από τον τύπο  $\tau=Ia$ . Η δυναμική εξίσωση είναι συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο βάρους του τρένου, επομένως ο όρος της δύναμης θα πολλαπλασιαστεί και με την απόσταση που απέχουν οι μαγνήτες από το κέντρο. Επίσης, λόγω της περιστροφής και δυναμική της γεωμετρίας στην εξίσωση εμφανίζονται οι όροι που εκφράζουν την γωνιά πρόσπτωσης  $\theta(t)$  και την γωνία εκτροπής  $\psi(t)$ . Αθροίζοντας όλες τις δυνάμεις των μαγνητών στη κατεύθυνση αυτή προκύπτει η παρακάτω εξίσωση που αντιπροσωπεύει την συμπεριφορά το συνολικό συστήματος στην πρόσπτωση του τρένου.

$$\begin{aligned}
 8.82500 \cdot 10^5 \left( \frac{d^2}{dt^2} \theta(t) \right) &= -16227.04362 \left( \frac{d}{dt} v1(t) \right) - 16227.04362 \left( \frac{d}{dt} v2(t) \right) \\
 &- 3296.923148 \left( \frac{d}{dt} v3(t) \right) - 3296.923148 \left( \frac{d}{dt} v4(t) \right) \\
 &- 1648.461574 \left( \frac{d}{dt} v5(t) \right) - 1648.461574 \left( \frac{d}{dt} v6(t) \right) \\
 &+ 16227.04362 \left( \frac{d}{dt} v7(t) \right) + 16227.04362 \left( \frac{d}{dt} v8(t) \right) \\
 &+ 3296.923148 \left( \frac{d}{dt} v9(t) \right) + 3296.923148 \left( \frac{d}{dt} v10(t) \right) \\
 &+ 1648.461574 \left( \frac{d}{dt} v11(t) \right) + 1648.461574 \left( \frac{d}{dt} v12(t) \right) \\
 &- 13523.1120 \cdot \theta(t) - 17945.77574 \cdot \psi(t)
 \end{aligned} \tag{4.42}$$

Όπως παρατηρείται οι πρώτοι 6 όροι έχουν θετικά πρόσημα, αυτό γίνεται διότι οι πρώτοι 6 μαγνήτες εφαρμόζουν την δύναμη προς την ίδια κατεύθυνση με την γωνία πρόσπτωσης. Και τέλος η εξίσωση που αντιπροσωπεύει την συμπεριφορά του συνολικού συστήματος στην εκτροπή του τρένου. Τα πρόσημα της εξίσωσης εξαρτώνται από το διάνυσμα της κατεύθυνσης. Όπως και στην μελέτη της πρόσπτωσης έτσι και δω, οι δυνάμεις θα πολλαπλασιαστούν με την απόσταση των μαγνητών από το κέντρο βάρους. Στην μελέτη της ανύψωσης και ταλάντωσης οι δυνάμεις δεν εξαρτώνται από την απόσταση των μαγνητών, αλλά στην πρόσπτωση και εκτροπή η απόσταση αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα λόγω της ύπαρξης της ροπής.

$$\begin{aligned}
 8.82500 \cdot 10^5 \left( \frac{d^2}{dt^2} \psi(t) \right) &= 11362.29826 \left( \frac{d}{dt} v1(t) \right) - 11362.29826 \left( \frac{d}{dt} v2(t) \right) \\
 +2308.530440 \left( \frac{d}{dt} v3(t) \right) &- 2308.530440 \left( \frac{d}{dt} v4(t) \right) \\
 +1154.265220 \left( \frac{d}{dt} v5(t) \right) &- 1154.265220 \left( \frac{d}{dt} v6(t) \right) \\
 +1154.265220 \left( \frac{d}{dt} v7(t) \right) &- 1154.265220 \left( \frac{d}{dt} v8(t) \right) \\
 +2308.530440 \left( \frac{d}{dt} v9(t) \right) &- 2308.530440 \left( \frac{d}{dt} v10(t) \right) \\
 +11362.29826 \left( \frac{d}{dt} v11(t) \right) &- 11362.29826 \left( \frac{d}{dt} v12(t) \right) \\
 -13523.1120 \cdot \theta(t) &- 17945.77574 \cdot \psi(t)
 \end{aligned} \tag{4.43}$$

## 4.9 Αποτελέσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι αναλύουμε ένα σύστημα “MIMO” με 13 εισόδους και 4 εξόδους. Οι εισοδοί του συστήματος είναι οι διαταραχές λόγω της δύναμης ανέμου και η επιτάχυνση βαρύτητας του κάθε μαγνήτη. Ως έξοδος μας δίνει την πρόσπτωση, εκτροπή, ταλάντωση και ανύψωση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα βρεθεί η συμπεριφορά του συστήματος για την ανύψωση του τρένου maglev. Για την ευκολία της επίλυσης χρησιμοποιούμε πίνακες μόνιμης κατάστασης. Εξετάζουμε την ασφάλεια του ελεγκτή που έχει σχεδιαστεί όταν υπάρχουν διαταραχές προσανατολισμού. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από την χρήση του λογισμικού και παρουσιάζονται παρακάτω.

$$A = \begin{bmatrix} -17.763655 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & -17.763655 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -17.763655 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -17.763655 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}_{44 \times 44}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.00000107324 & 10.596245 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ -0.00000107324 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ -0.00000107324 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ -0.00000107324 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ -0.00000107324 & 0 & 10.596245 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ -0.00000107324 & 0 & 0 & 10.596245 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}_{44 \times 13}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}_{4 \times 44}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}_{4 \times 13}$$

Η χρήση των πινάκων είναι ένας εύκολος τρόπος χειρισμού συστημάτων, στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως βλέπουμε ότι οι πίνακες αποτελούνται από μεγάλες διαστάσεις, γι' αυτό θα μετατρέψουμε τους πίνακες σε συναρτήσεις μεταφοράς. Παρακάτω εμφανίζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς που περιγράφουν το ολικό σύστημα. Ο πρώτος δείκτης δείχνει την έξοδο και ο δεύτερος δείχνει τον μαγνήτη. Η έξοδος 1 αντιπροσωπεύει την ανύψωση, η 2 την ταλάντωση, η 3 την πρόσπτωση και η 4 την εκτροπή.

$$G11 = \frac{-188.6992803s - 5351.492720}{s^3 + 117.2493710s^2 + 6468.738844s + 111960.5140}$$

$$G12 = \frac{188.6992803s + 5351.492720}{s^3 + 117.2493710s^2 + 6468.738844s + 111960.5140}$$

$$G13 = \frac{-188.6992803s - 5351.492720}{s^3 + 117.2493710s^2 + 6468.738844s + 111960.5140}$$

$$G13 = G14 = G16 = G18 = G110 = G112$$

$$G13 = G15 = G17 = G19 = G113$$

$$G21 = \frac{0.0001953851030s}{s^3 + 117.24937s^2 + 6468.7388s + 111960.514}$$

$$G22 = \frac{269.4905012s + 7642.723663}{s^3 + 117.2493710s^2 + 6468.738844s + 111960.5140}$$

$$G23 = G24 = G25 = G26 = G27 = G28 = G29 = G210 = G211 = G212 = G213$$

$$G31 = \frac{-72.591350s^5 - 2058.6834s^4 - 2.1459796s^3 - 60.85976s^2}{s^7 + 117.24937s^6 + 6468.7695s^5 + 111964.107s^4 + 198.249263s^3 + 3431.28709s^2 + 0.10753135s + 1.8611456}$$

$$G32 = G33 = \dots G34 = \dots G313 = \dots$$

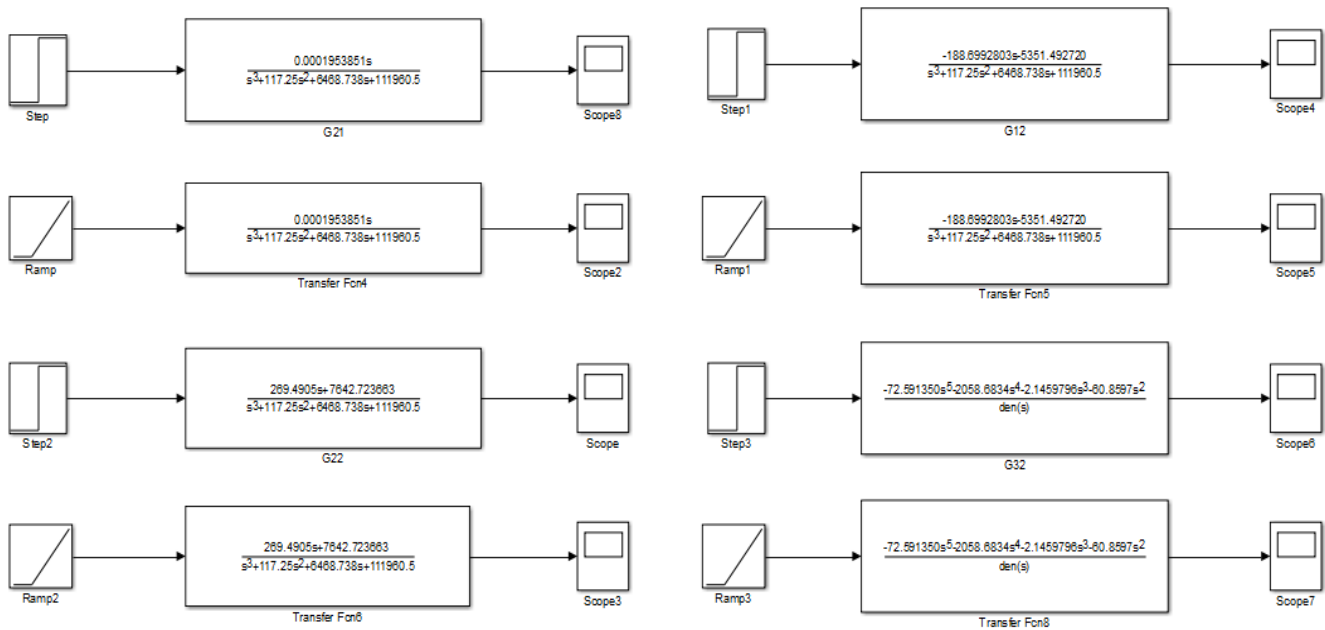
$$G41 = \frac{50.82901s^5 + 1441.5056s^4 + 1.557770s^3 + 44.178226s^2}{s^7 + 117.24937s^6 + 6468.7695s^5 + 111964.107s^4 + 198.249263s^3 + 3431.28709s^2 + 0.10753135s + 1.8611456}$$

$$G42 = \frac{-50.82901s^5 - 1441.5056s^4 + 2.630146489 \cdot 10^{-10} s^3 + 7.459 \cdot 10^{-9} s^2}{s^7 + 117.24937s^6 + 6468.7695s^5 + 111964.107s^4 + 198.249263s^3 + 3431.28709s^2 + 0.10753135s + 1.8611456}$$

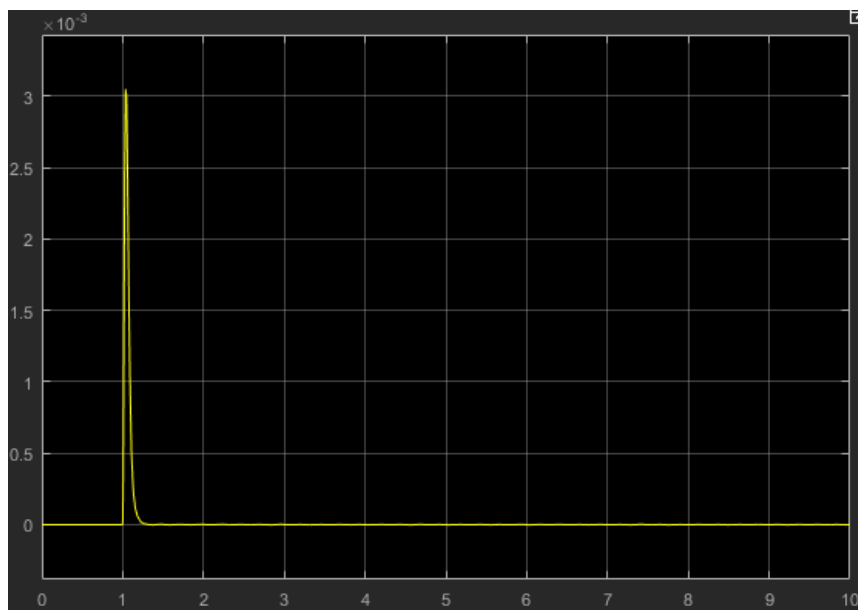
$$G43 = \dots G45 = \dots G413 = \dots$$

Οι περισσότερες συναρτήσεις μεταφοράς είναι όμοιες μεταξύ τους. Λόγω της θέσης των μαγνητών προκύπτουν διαφορές στα πρόσημα τους. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Simulink εισάγουμε όλα αυτά τα δεδομένα και ελέγχουμε της αντίστοιχες συμπεριφορές τους στις διαταραχές. Η δύναμη λόγω ανέμου εφαρμόζεται ως βηματική είσοδος, ενώ η κλίση της ράγας εφαρμόζεται ως είσοδος ράμπας με χρόνο εφαρμογής 1 sec. Το λογισμικό simulink μας δίνει δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς του συστήματος είτε εισάγοντας τα δεδομένα σε μορφή συναρτήσεων μεταφοράς είτε σε μορφή πινάκων. Παρακάτω εμφανίζεται το μοντέλο ελέγχου του κάθε μαγνήτη με δύο διαφορετικές εισόδους.

## Κεφάλαιο 4. Έλεγχος μαγνητικής αιώρησης



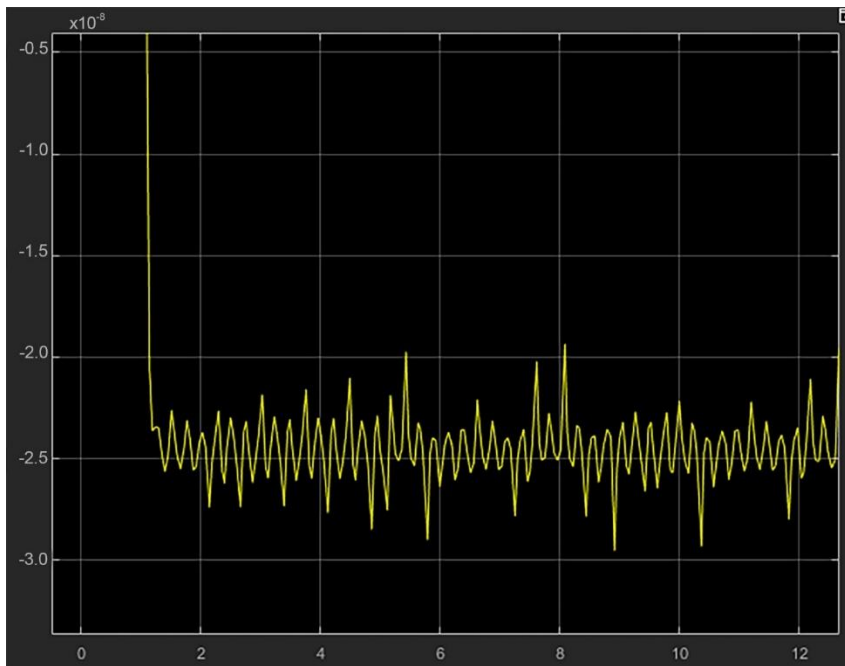
Σχήμα 4.15: Έλεγχος του συνολικού συστήματος στις διαταραχές.



Σχήμα 4.16: Ανταπόκριση του συστήματος στην δύναμη ανέμου.

Το σχήμα [4.16] απεικονίζει την συμπεριφορά του ολικού συστήματος όταν εφαρμόζεται η διαταραχή από την δύναμη ανέμου. Η διαταραχή αυτή αποτελεί είσοδο βήματος και εφαρμόζεται με 10.000 N στο 1 δευτερόλεπτο. Ο οριζόντιος άξονας μας δείχνει το χρόνο σε δευτερόλεπτα και ο κάθετος άξονας την μετατόπιση

ανύψωσης σε ίντσες. Βλέπουμε ότι η μετατόπιση κατά την διαταραχή αυτή είναι 0.004 ίντσες και η επιστροφή γίνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μια τέτοια διαταραχή δεν θα προκαλούσε μεγάλο πρόβλημα στο σύστημα διότι το διάκενο μεταξύ της ράγας και τρένου είναι 2 ίντσες. Ο ελεγκτής που σχεδιάστηκε είναι ικανός να ελέγχει το σύστημα δίχως κίνδυνο.



Σχήμα 4.17: Η συμπεριφορά της ανύψωσης στην κλίση της ράγας.

Το σχήμα [4.17] απεικονίζει την συμπεριφορά του συστήματος κατά την επίδραση διαταραχής λόγω της αλλαγής του προσανατολισμού. Η διαταραχή αυτή αποτελεί είσοδο ράμπας με ρυθμό 1 ft ανά δευτερόλεπτο. Ο οριζόντιος άξονας μας δείχνει το χρόνο σε δευτερόλεπτα και ο κάθετος άξονας την μετατόπιση ανύψωσης σε ίντσες. Η είσοδος της διαταραχής εκτελείται στο 1 δευτερόλεπτο, έτσι λοιπόν και στο σχήμα βλέπουμε την έντονη αλλαγή προς τα αρνητικά, αυτό γίνεται διότι η κλίση της ράγας είναι προς τα κάτω. Στο επόμενο χρονικό διάστημα η μετατόπιση αλλάζει με ένα γρήγορο ρυθμό αλλά κυμαίνεται περίπου στις ίδιες τιμές. Οι τιμές αυτές δεν προκαλούν κίνδυνο στο σύστημα, εφόσον είναι πολύ μικρές. Παρατηρούμε ότι λόγω των ορίων και προδιαγραφών που εισάχθηκαν στο σχεδιασμό του ελεγκτή η μετατόπιση του διακένου μπορεί να διατηρηθεί στις επιθυμητές τιμές. Μπορούμε να συμπεραίνουμε ότι ο σχεδιασμένος PID ελεγκτής είναι στη θέση να ελέγχει και τις δύο μορφές διαταραχής, παρέχοντας ένα υψηλό βαθμό ασφαλείας στο συνολικό σύστημα.



(Σκόπιμα κενή σελίδα)

# Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες

## 5.1 Σύνοψη της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε, η εφαρμογή της τεχνολογίας μαγνητικής αιώρησης στα τρένα. Τα τρένα με ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση απαιτούν ισχυρούς και αποτελεσματικούς ελεγκτές για να διατηρείται σταθερό το διάκενο, χωρίς να υπάρχει καμία επαφή με τη ράγα. Το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο που αλληλοεπιδρά με τους μαγνήτες, παρέχεται από τα τριφασικά πηνία εναλλασσόμενου ρεύματος που είναι τοποθετημένα κατά μήκος της ράγας. Το συνολικό σύστημα Maglev αποτελείται από 12 ομάδες μαγνητών. Κάθε μαγνητικό πηνίο, ελέγχεται με έναν ανεξάρτητο σύστημα. Η ανεξαρτησία αυτή συνεισφέρει στον έλεγχο της κίνησης, προκειμένου να διατηρείται το διάκενο στις επιθυμητές τιμές. Οι μαγνήτες είναι τοποθετημένες με μία κλίση  $35^\circ$ , έτσι ώστε να ελέγχεται ταυτόχρονα και οι κινήσεις εκτροπής.

Για τον έλεγχο της κίνησης του τρένου χρησιμοποιείται ελεγκτής PID με ανατροφοδότηση επιτάχυνσης. Εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος στις δυνάμεις διαταραχής και σε αλλαγές κατεύθυνσης. Απαιτείται από το σύστημα ελέγχου, να μπορεί να ελέγχει τις κινήσεις ανύψωσης, ταλάντωσης, κλίσης και εκτροπής όταν εφαρμόζονται οι διαταραχές αυτές. Καταστρώνοντας τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα, στο λογισμικό Matlab-Simulink, βρίσκουμε τα αποτελέσματα ανταπόκρισης του συστήματος υπό τις εξωτερικές διαταραχές. Τέλος, καταφέραμε να δείξουμε ότι ο σχεδιαζόμενος ελεγκτής μπόρεσε να ελέγξει την κίνηση του τρένο όσον αφορά την μετατόπιση της ανύψωσης χωρίς παρέχοντας υψηλή ασφάλεια και πληρώντας όλα τα σχεδιαστικά κριτήρια.

## 5.2 Συμπεράσματα

Το υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής εργασίας απαρτίζεται από τρία κομμάτια. Αρχικά περιγράφεται ένα πείραμα μαγνητικής αιώρησης για να μπορούμε να κατανοήσουμε την λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος βασιζόμενοι σε ένα απλό μοντέλο. Εν συνέχεια, υπολογίζεται η συμπεριφορά του συστήματος μελετώντας μόνο έναν μαγνήτη και τέλος υπολογίζουμε ένα πραγματικό σύστημα με 12 ομάδες μαγνητών.

Προτού σχεδιαστεί ο ελεγκτής για ένα πραγματικό σύστημα, μελετήθηκε το πείραμα της μαγνητικής αιώρησης μιας μπάλας, προκειμένου να κατανοηθεί με πολύ πιο απλό και εύκολο τρόπο η αρχή λειτουργίας και η συμπεριφορά του συστήματος.

Είδαμε ότι η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της ηλεκτροδυναμικής δύναμης και της βαρύτητας μίας μικρής σφαίρας απαιτεί αρκετούς υπολογισμούς και μία σοβαρή επιστημονική μελέτη. Αρχικά θεωρώντας ως είσοδο το ρεύμα, η συνάρτηση μεταφοράς του πειράματος εμφάνιζε έναν πόλο στο δεξί ημιεπίπεδο οδηγώντας το σύστημα σε αστάθεια. Η θεώρηση της τάσης ελέγχου ως σήμα εισόδου, είχε σαν αποτέλεσμα το γραμμικοποιημένο σύστημα ανοιχτού βρόγχου να είναι ένα σύστημα δεύτερης τάξης με δύο συζυγείς πόλους πάνω στο φανταστικό άξονα. Έτσι λοιπόν επιλέγεται ως είσοδος η τάση, η οποία αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο ελέγχου του συστήματος.

Το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, τεκμηρίωσε τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός PID ελεγκτή με ανάδραση ταχύτητας, έτσι ώστε να υπάρχει αποτελεσματικός και ασφαλής έλεγχος του προσανατολισμού παρά τις εξωτερικές διαταραχές. Σαν πρώτο βήμα προσδιορίστηκε το μαθηματικό μοντέλο για να περιγράψει την δυναμική του συστήματος. Εν συνεχεία, αναπτύχθηκε ο PID ελεγκτής με ανάδραση επιτάχυνσης έτσι ώστε να διατηρείται το διάκενο στις επιθυμητές τιμές. Εφόσον, αναπτύχθηκε ο ελεγκτής, μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος στις εξωτερικές δυνάμεις διαταραχών και σε αλλαγές κατεύθυνσης. Το αρχικό σύστημα αποτελούταν από έναν μαγνήτη, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το πραγματικό σύστημα maglev, το οποίο αποτελείται συνολικά από 12 ομάδες μαγνητών. Λόγω των μεγάλων διαστάσεων στο χώρο κατάστασης, τα αποτελέσματα που περιγράφουν την συμπεριφορά του συστήματος μετατράπηκαν σε συναρτήσεις μεταφοράς.

Τα διαγράμματα στις εικόνες [4.16],[4.17] δείχνουν την συμπεριφορά του συστήματος στις δύο συγκεκριμένες εξωτερικές διαταραχές. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab/Simulink βρέθηκε η ανταπόκριση του συστήματος για μια δύναμη ανέμου 10.000 N και σε για μια κλίση 0.1 ft/sec. Το σύστημα ελέγχου που ορίστηκε, μπόρεσε να διατηρήσει την κίνηση του τρένου στα επιτρεπτά όρια χωρίς να υπάρχει κάποιος κίνδυνος. Η συνολική μεταβολή του κενού ήταν 0,004 ίντσες και διορθώθηκε σε 0,5 δευτερόλεπτα. Το αποτέλεσμα αυτό μας δείχνει ότι ο σχεδιαζόμενος ελεγκτής μπορεί εύκολα να διορθώσει το σφάλμα για αυτές τις συγκεκριμένες διαταραχές.

### 5.3 Μελλοντικές εργασίες

Μία πιθανή μελλοντική εργασία θα μπορούσε να περιλαμβάνει την σχεδίαση διάφορων γραμμικών ελεγκτών για διαφορετικές περιοχές λειτουργίας του συστήματος, στις οποίες ο σχεδιαζόμενος ελεγκτής δεν δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Μια άλλη πρόταση είναι η βελτίωση του συγκεκριμένου ελεγκτή λαμβάνοντας υπόψη την περίπτωση που το τρένο θα είχε ένα εύρη φάσμα διακυμάνσεων της μάζας, όπως γίνεται στα εμπορικά συστήματα. Λόγω της διακύμανσης αυτής, η απόδοση του ελεγκτή δεν θα ήταν αρκετά ικανοποιητική, έτσι λοιπόν θα είχε ενδιαφέρον σε μία μελλοντική εργασία να βελτιωθεί ο συγκεκριμένος ελεγκτής και να εμφανίζει την απαιτούμενη απόδοση σε μία αντίστοιχη περίπτωση.

Μέσα στο κομμάτι των μελλοντικών εργασιών θα μπορούσε να ενταχθεί και η συμμετοχή του Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας στο διαγωνισμό Hyperloop Pod . Έτσι, αφενός θα διευρύνουμε τους γνωστικούς μας ορίζοντες, αφού θα αποκτήσουμε γνώσεις σχετικά με ένα από τα πιο σύγχρονα τεχνολογικά επιτεύγματα, αφετέρου θα έχουμε μια μοναδική εμπειρία να εκπροσωπήσουμε τη σχολή μας σε ένα παγκόσμιο επίπεδο. Η εν λόγω ιδέα μπορεί να είναι χρονοβόρα και να απαιτεί αρκετά καλή προετοιμασία και οργάνωση, όπως την συγκρότηση ομάδων, την ανάθεση εργασιών, αλλά τα οφέλη που θα αποκομίσουμε θα αποζημιώσουν την προσπάθεια μας.

## Παράρτημα

### 1<sup>ος</sup> Κώδικας

```
syms x(t) v(t) I(t) F(t) s
```

Ορισμός της διαφορικής εξίσωσης του συστήματος

```
v(t) = diff(x, t);  
eq = diff(v) == (562/101)*x+(6744/101)*I+(1/50500)*F;
```

Εφαρμογή Laplace στην εξίσωση

```
lap = laplace(eq);  
S = subs(lap, [x(0) v(0)], [0 0]); syms lx lv lI lF  
Sx = subs(S, [laplace(x(t), t, s) laplace(I(t), t, s) laplace(F(t), t, s)], [lx lI lF]);  
Sv = subs(S, [laplace(x(t), t, s) laplace(I(t), t, s) laplace(F(t), t, s)], [lv/s lI lF]);
```

Εύρεση των συναρτήσεων μεταφοράς του συστήματος

```
g11 = simplify(lx/solve(subs(Sx,lF,0),lI))  
g12 = simplify(lx/solve(subs(Sx,lI,0),lF))  
g21 = simplify(lv/solve(subs(Sv,lF,0),lI))  
g22 = simplify(lv/solve(subs(Sv,lI,0),lF))
```

Εύρεση πόλων και μηδενικών για τις τέσσερις συναρτήσεις μεταφοράς

```
G=[tf(6744,[101 0 -562]),tf(1,[50500 0 -281000]);tf([6744 0],[101 0 -562]),tf([1 0],[50500 0 -281000])];  
iopzmap(G)
```

*Published with MATLAB® R2016a*

## 2<sup>ος</sup> Κώδικας

Δημιουργία του πίνακα

```
A=[-99.48571587-3647.33390 3947.845868 ; 1 0 0 ; -0.2670253700774340814 -  
11.94842305075683474 -17.76365515630017511];
```

Εντολή εύρεσης ιδιοτιμών

```
E= eig(A)
```

*Published with MATLAB® R2016a*

## 3<sup>ος</sup> Κώδικας

```

syms x1(t) x2(t) x3(t) x4(t) x5(t) x6(t) x7(t) x8(t) x9(t) x10(t)
x11(t) x12(t)...
f1(t) f2(t) f3(t) f4(t) f5(t) f6(t) f7(t) f8(t) f9(t) f10(t)
f11(t) f12(t)...
x31(t) x32(t) x33(t) x34(t) x35(t) x36(t) x37(t) x38(t) x39(t)
x310(t) x311(t) x312(t)...
g1(t) g2(t) g3(t) g4(t) g5(t) g6(t) g7(t) g8(t) g9(t) g10(t)
g11(t) g12(t)...
v1(t) v2(t) v3(t) v4(t) v5(t) v6(t) v7(t) v8(t) v9(t) v10(t)
v11(t) v12(t)...
zet(t) yet(t) thet(t) pset(t)

```

Ορισμός των διαφορικών εξισώσεων του συστήματος

```

eqn1 = v1 == diff(x1, t);
eqn2 = diff(v1) == -3647.333890*x1-
99.48571587*v1+3947.845868*x31+3947.845868*g1+0.0002385211688*f1;
eqn3 = diff(x31) == -11.948*x1-0.267025*v1+10.5962*g1-
0.0000010732*f1-17.76365*x31;

eqn8 = v2 == diff(x2, t);
eqn9 = diff(v2) == -3647.333890*x2-
99.48571587*v2+3947.845868*x32+3947.845868*g2+0.0002385211688*f2;
eqn10 = diff(x32) == -11.948*x2-0.267025*v2+10.5962*g2-
0.0000010732*f2-17.76365*x32;

eqn11 = v3 == diff(x3, t);
eqn12 = diff(v3) == -3647.333890*x3-
99.48571587*v3+3947.845868*x33+3947.845868*g3+0.0002385211688*f3;
eqn13 = diff(x33) == -11.948*x3-0.267025*v3+10.5962*g3-
0.0000010732*f3-17.76365*x33;

eqn14 = v4 == diff(x4, t);
eqn15 = diff(v4) == -3647.333890*x4-
99.48571587*v4+3947.845868*x34+3947.845868*g4+0.0002385211688*f4;
eqn16 = diff(x34) == -11.948*x4-0.267025*v4+10.5962*g4-
0.0000010732*f4-17.76365*x34;

eqn17 = v5 == diff(x5, t);
eqn18 = diff(v5) == -3647.333890*x5-
99.48571587*v5+3947.845868*x35+3947.845868*g5+0.0002385211688*f5;
eqn19 = diff(x35) == -11.948*x5-0.267025*v5+10.5962*g5-
0.0000010732*f5-17.76365*x35;

eqn20 = v6 == diff(x6, t);
eqn21 = diff(v6) == -3647.333890*x6-
99.48571587*v6+3947.845868*x36+3947.845868*g6+0.0002385211688*f6;
eqn22 = diff(x36) == -11.948*x6-0.267025*v6+10.5962*g6-
0.0000010732*f6-17.76365*x36;

```

```

eqn23 = v7 == diff(x7, t);
eqn24 = diff(v7) == -3647.333890*x7-
99.48571587*v7+3947.845868*x37+3947.845868*g7+0.0002385211688*f7;

eqn25 = diff(x37) == -11.948*x7-0.267025*v7+10.5962*g7-
0.0000010732*f7-17.76365*x37;

eqn26 = v8 == diff(x8, t);
eqn27 = diff(v8) == -3647.333890*x8-
99.48571587*v8+3947.845868*x38+3947.845868*g8+0.0002385211688*f8;
eqn28 = diff(x38) == -11.948*x8-0.267025*v8+10.5962*g8-
0.0000010732*f8-17.76365*x38;

eqn29 = v9 == diff(x9, t);
eqn30 = diff(v9) == -3647.333890*x9-
99.48571587*v9+3947.845868*x39+3947.845868*g9+0.0002385211688*f9;
eqn31 = diff(x39) == -11.948*x9-0.267025*v9+10.5962*g9-
0.0000010732*f9-17.76365*x39;

eqn35 = v10 == diff(x10, t);
eqn36 = diff(v10) == -3647.333890*x10-
99.48571587*v10+3947.845868*x310+3947.845868*g10+0.0002385211688*f1
0;
eqn37 = diff(x310) == -11.948*x10-0.267025*v10+10.5962*g10-
0.0000010732*f10-17.76365*x310;

eqn38 = v11 == diff(x11, t);
eqn39 = diff(v11) == -3647.333890*x11-
99.48571587*v11+3947.845868*x311+3947.845868*g11+0.0002385211688*f1
1;
eqn40 = diff(x311) == -11.948*x11-0.267025*v11+10.5962*g11-
0.0000010732*f11-17.76365*x311;

eqn41 = v12 == diff(x12, t);
eqn42 = diff(v12) == -3647.333890*x12-
99.48571587*v12+3947.845868*x312+3947.845868*g12+0.0002385211688*f1
2;
eqn43 = diff(x312) == -11.948*x12-0.267025*v12+10.5962*g12-
0.0000010732*f12-17.76365*x312;

eqn4 = 4192.5*diff(zet) ==
286.1912455*v1+286.1912455*v2+286.1912455*v3+286.1912455*v4+286.191
2455*v5+286.1912455*v6...

+286.1912455*v7+286.1912455*v8+286.1912455*v9+286.1912455*v10+286.1
912455*v11+286.1912455*v12;
eqn5 = 4192.5*diff(yet) == -200.3932674*v1+200.3932674*v2-
200.3932674*v3+200.3932674*v4-200.3932674*v5+200.3932674*v6...
-200.3932674*v7+200.3932674*v8-200.3932674*v9+200.3932674*v10-
200.3932674*v11+200.3932674*v12;
eqn6 = 882500*diff(thet) == -16227.04362*v1-16227.04362*v2-
3296.923148*v3-3296.923148*v4-1648.461574*v5-1648.461574*v6...

+16227.04362*v7+16227.04362*v8+3296.923148*v9+3296.923148*v10+1648.
461574*v11+1648.461574*v12-13523.1120*thet-17945.77574*psset;

```



## Παράρτημα

---

```
eqn7= 882500*diff(pset) == 11362.29826*v1-  
11362.29826*v2+2308.530440*v3-2308.530440*v4+1154.265220*v5-  
1154.265220*v6...  
+1154.265220*v7-1154.265220*v8+2308.530440*v9-  
2308.530440*v10+1154.265220*v11-1154.265220*v12-13523.1120*pset-  
9468.984961*thet;
```

```
eqns = [eqn1; eqn2; eqn3; eqn4; eqn5; eqn6; eqn7; eqn8; eqn9;  
eqn10; eqn11; eqn12;...  
eqn13; eqn14; eqn15; eqn16; eqn17; eqn18; eqn19; eqn20; eqn21;  
eqn22; eqn23; eqn24;...  
eqn25; eqn26; eqn27; eqn28; eqn29; eqn30; eqn31; eqn35; eqn36;  
eqn37; eqn38; eqn39; eqn40; eqn41; eqn42; eqn43]
```

Μετατροπή των εξισώσεων σε διάνυσμα

```
vars = [x1(t) x2(t) x3(t) x4(t) x5(t) x6(t) x7(t) x8(t) x9(t)  
x10(t) x11(t) x12(t)...  
f1(t) f2(t) f3(t) f4(t) f5(t) f6(t) f7(t) f8(t) f9(t) f10(t)  
f11(t) f12(t)...  
x31(t) x32(t) x33(t) x34(t) x35(t) x36(t) x37(t) x38(t) x39(t)  
x310(t) x311(t) x312(t)...  
g1(t) g2(t) g3(t) g4(t) g5(t) g6(t) g7(t) g8(t) g9(t) g10(t)  
g11(t) g12(t)...  
v1(t) v2(t) v3(t) v4(t) v5(t) v6(t) v7(t) v8(t) v9(t) v10(t)  
v11(t) v12(t)...  
zet(t) yet(t) thet(t) pset(t)]  
[V, S] = odeToVectorField(eqns)
```

Μετατροπή των κλασματικών αποτελεσμάτων σε δεκαδικά

```
vpa(V)
```

*Published with MATLAB® R2016a*

---

---

## Βιβλιογραφία

- [1] Han HS, Kim DS (2016), *“Maglev technology and applications”* Springer, Berlin
- [2] Meins J, Miller K, Mayer WJ (1988), *“The high speed Maglev transportation system TRANSRAPID”*. IEEE Trans Magn 24(2): 808-811.
- [3] Weinstock, Robert (1976). *“On a fallacious proof of Earnshaw’s theorem”*. American Journal of Physics. 39-93. Doi:10.1119/1.10449.
- [4] D. M. Rote and Y. Cai, *“Review of Dynamic Stability of Repulsive-Force Maglev Suspension Systems”*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No.2, Mar.2002, 1383-1390.
- [5] Y. Cai, S.S. Chen, *“Numerical Analysis for Dynamic Instability of Electrodynamic Maglev Systems”*, Shock and Vibration, Vol.2.No.4, pp. 339-349.
- [6] T. Yamada, M.Iwamoto and T. Ito, *“Magnetic Damping Force in Inductive Magnetic Levitation System for High-Speed Trains”*, Electrical Engineering in Japan, vol.94, no.1, 1974, pp. 80-84.
- [7] Long Z, He G, Xue S, *“Study of EDS & EMS hybrid suspension system with permanent-magnet Halbach array”*, IEEE Trans Magn 47(12) : 4717-4724
- [8] Gerada D, Mebarki A, Brown NL, Gerada C, Cavagnino A (2014), *“ High-speed electrical machines: technologies, trends, and development”*. IEEE Trans Ind Electron 61(6): 2946-2959
- [9] Cho HW, Sung HK, Sung SY, You DJ, Jang SM (2008) *“Design and characteristic analysis on the short-stator linear synchronous motor for high-speed Maglev propulsion”*, IEEE Trans Magn 44(11): 4369-4372
- [10] William Samuel P, *“Modelling and design of magnetic levitation systems for vibration isolation”*, PhD Thesis , 54-55.
- [11] Musk, Elon (12 August 2013) *“Hyperloop Alpha ”*.
- [12] Baker, David R. (15 June 2015). *“Build your own hyperloop! SpaceX announces pod competition”* San Francisco Chronicle.
- [13] TUM Hyperloop Team (4 December 2019). *“TUM hyperloop by NEXT prototypes e.V.”* <https://tumhyperloop.de/#our-mission>

[14] Quanser Consulting Inc, “Magnetic Levitation Experiment for Matlab/Simulink Users”

[15] Maple Software , “Optimizing the Controller Design to Guide the Motion of a Maglev Train”,Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc.,2008