



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## **ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κωνσταντίνος Ε. Φούσκης**

**Επιβλέπων : Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου**  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ε. Φούσκης

**Επιβλέπων :** Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....  
Μαρία Γ. Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

.....  
Κωνσταντίνος Ε. Φούσκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Ε. Φούσκης, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια αναφορά στον τρόπο λειτουργίας και στις εφαρμογές ενός ιδιαίτερου τύπου ηλεκτρικού κινητήρα, του ευθύγραμμου κινητήρα. Ένας ευθύγραμμος κινητήρας είναι μια ηλεκτρική μηχανή στην οποία η κίνηση μεταξύ δρομέα και στάτη είναι ευθύγραμμη. Η επίτευξη της πρόωσης του κινούμενου μέρους της μηχανής επιτυγχάνεται μέσω της ανάπτυξης δύναμης ώθησης σε αντίθεση με τη ροπή περιστροφής που εμφανίζεται σε έναν περιστροφικό κινητήρα.

Αρχικά γίνεται εισαγωγή στους ευθύγραμμους κινητήρες. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους, τα είδη τους ενώ γίνεται και μια σύγκριση με τους περιστροφικούς κινητήρες. Επιπλέον γίνεται παρουσίαση των όποιων πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων παρουσιάζει η χρήση ευθύγραμμων κινητήρων.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια πιο εξειδικευμένη ανάλυση των δύο πιο διαδεδομένων τύπων ευθύγραμμων κινητήρων: Των σύγχρονων και των επαγωγικών. Παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα καθώς και τα πιο χαρακτηριστικά τους μεγέθη όπως η δύναμη ώθησης, η ισχύς και η δύναμη ανάρτησης.

Τέλος γίνεται αναφορά στις εφαρμογές των ευθύγραμμων κινητήρων. Η μεγαλύτερη χρήση τους συμβαίνει στον τομέα των μεταφορών κυρίως στην πρόωση ηλεκτρικών τρένων. Επιπλέον παρουσιάζονται και άλλες τους εφαρμογές όπως στην ιατρική και στη βιομηχανία.

Λέξεις κλειδιά:

Ευθύγραμμος κινητήρας, συστήματα πρόωσης, ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας, ευθύγραμμος σύγχρονος κινητήρας, δύναμη ώθησης, δύναμη ανύψωσης, maglev, μαγνητική ανύψωση, ηλεκτρικά τρένα, EMALS

# Abstract

The aim of this diploma thesis is to present the linear motors, the principle of operation and their applications. A linear motor is an electric machine in which the movement between the stator and the rotor is linear. The propulsion of the moving part of the can be achieved due to the thrust force in comparison with the rotary motors which produce torque.

Initially becomes an introduction for the linear motors. The principles of operation, their different types are analyzed and a comparison between linear and rotary motors is conducted. Furthermore, all the possible pros and cons of linear motors are presented.

Afterwards reports a more detailed analysis of the two most widespread types of linear motors: Linear synchronous motors (LSM) and linear induction motors (LIM). In addition, presents their equivalent circuits and measures of their thrust force, power and levitation force.

Finally becomes presentation of the linear motors applications. Their main usage occurs in the field of transportation especially for the propulsion of electric trains. Medicine and industries are other fields where the use of linear motors is extensive as well.

Key words:

Linear motors, propulsion systems, linear induction motor, linear synchronous motor, thrust force, levitation force, maglev, magnetic levitation, electric trains, EMALS

## Ευχαριστίες:

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κ. Μαρία Ιωαννίδου που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους που στάθηκαν στο πλευρό μου με πολύτιμες συμβουλές και γνώσεις κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο Πολυτεχνείο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες όμως θέλω να δώσω στην οικογένεια μου, στον πατέρα μου Μανώλη, στη μητέρα μου Γεωργία, στην αδερφή μου Μαρία, στη θεία μου Άννα καθώς και σε όλους τους υπόλοιπους συγγενείς, καθώς μέσα σε δύσκολους καιρούς η υποστήριξη τους ήταν ουσιαστική για την επίτευξη του στόχου μου.

**Στους γονείς μου,**



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

### ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ & ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

1.1	Ιστορική αναδρομή.....	15
1.2	Εισαγωγή στις στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές.....	16
1.3	Χαρακτηριστικά & δομή ευθύγραμμων κινητήρων.....	24
1.3.1	Εισαγωγή στους ευθύγραμμους κινητήρες.....	24
1.3.2	Κατηγορίες ευθύγραμμων κινητήρων.....	27
1.3.3	Δυνάμεις στους ευθύγραμμους κινητήρες.....	36
1.3.4	Υλικά ευθύγραμμων κινητήρων.....	40
1.4	Σύγκριση ευθύγραμμων & περιστροφικών κινητήρων.....	40
1.5	Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα ευθύγραμμων κινητήρων.....	44

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

### ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

2.1	Εισαγωγή στους σύγχρονους ευθύγραμμους κινητήρες.....	47
2.2	Σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες σιδήρου.....	49
2.3	Σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες αέρος.....	54

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

### ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

3.1	Εισαγωγή στους ευθύγραμμους επαγωγικούς κινητήρες.....	58
3.2	Χαρακτηριστικά μεγέθη ευθύγραμμων επαγωγικών κινητήρων.....	62

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:**  
**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**

4.1	Εισαγωγή.....	67
4.2	Ευθύγραμμοι κινητήρες και μεταφορές.....	68
4.3	Ευθύγραμμοι κινητήρες στην ιατρική.....	78
4.4	Ευθύγραμμοι κινητήρες στη βιομηχανία.....	83
4.5	Άλλες εφαρμογές.....	91
<b>Συμπεράσματα.....</b>		<b>95</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>		<b>97</b>
<b>Αναφορές διαδικτύου.....</b>		<b>98</b>

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>:

Σχήμα 1.2.1 λειτουργία κινητήρα

Σχήμα 1.2.2 λειτουργία γεννήτριας

Σχήμα 1.2.3 λειτουργία πέδης

Σχήμα 1.2.4 μηχανή συνεχούς ρεύματος

Σχήμα 1.2.5 δυνάμεις- πεδίο σε DC μηχανή

Σχήμα 1.2.6 τύλιγμα κλωβού

Σχήμα 1.2.7 τύλιγμα με δακτυλίους

Σχήμα 1.2.8 3-φ κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού

Εικόνα 1.3.1.1 ευθύγραμμος κινητήρας

Σχήμα 1.3.1.2 ευθύγραμμος κινητήρας ως ανάπτυσμα περιστροφικού

Σχήμα 1.3.1.3 μηχανικό φρένο σε ευθύγραμμο κινητήρα

Εικόνα 1.3.2.1 ευθύγραμμος επίπεδος κινητήρας

Σχήμα 1.3.2.2 σωληνοειδής ευθύγραμμος κινητήρας

Σχήμα 1.3.2.3 Ε.Ε.Κ με δευτερεύον χαλύβδινη πλάκα

Σχήμα 1.3.2.4 Ε.Ε.Κ με δευτερεύον αγωγίμο στρώμα

Σχήμα 1.3.2.5 ανάλογο κινητήρα D.C

Σχήμα 1.3.2.6 ευθύγραμμος κινητήρας με βραχύ πρωτεύον

Σχήμα 1.3.2.7 ευθύγραμμος κινητήρας με μακρύ πρωτεύον

Σχήμα 1.3.2.8 ευθύγραμμος κινητήρας διπλού διακένου

Εικόνα 1.3.2.9 U-type ευθύγραμμος κινητήρας

Σχήμα 1.3.2.10 ευθύγραμμος κινητήρας διαμήκους ανάπτυξης μαγνητικής ροής

Σχήμα 1.3.2.11 ευθύγραμμος ομοπολικός κινητήρας

Σχήμα 1.3.3.1 χαρακτηριστική δύναμης ώθησης T και ολίσθησης s για επαγωγικό ευθύγραμμο κινητήρα

Σχήμα 1.3.3.2 χαρακτηριστικές ελκτικών δυνάμεων και δυνάμεων ώθησης ως προς ολίσθηση για οκταπολικό και τετραπολικό κινητήρα

**Σχήμα 1.3.3.3** ροπές Roll, Pitch, Yaw

**Σχήμα 1.4.1** χαρακτηριστική δύναμης ώθησης και ολίσθησης

**Σχήμα 1.4.2** χαρακτηριστική απόδοσης και ολίσθησης

**Σχήμα 1.4.3** χαρακτηριστική συντελεστή ισχύος και ολίσθησης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>:**

**Σχήμα 2.2.1** κύκλωμα Σ.Ε.Κ με υποστήριξη σιδήρου

**Σχήμα 2.2.2** ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Ε.Κ με υποστήριξη σιδήρου

**Σχήμα 2.3.1** κύκλωμα Σ.Ε.Κ αέρος

**Σχήμα 2.3.2** ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Ε.Κ αέρος

**Σχήμα 2.3.3** απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Ε.Κ αέρος

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>:**

**Σχήμα 3.1.1** Ε.Ε.Κ απλής όψεως

**Σχήμα 3.1.2** Ε.Ε.Κ διπλής όψεως

**Σχήμα 3.1.3** ισοδύναμο κύκλωμα Ε.Ε.Κ απλής όψεως

**Σχήμα 3.1.3** απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα Ε.Ε.Κ απλής όψεως

**Σχήμα 3.1.4** τελικό ισοδύναμο κύκλωμα Ε.Ε.Κ απλής όψεως

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>:**

**Εικόνα 4.2.1** τρένο μαγνητικής ανύψωσης(maglev)

**Σχήμα 4.2.2** EMS σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης

**Σχήμα 4.2.3** EDS σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης

**Εικόνα 4.2.4** Transrapid στη Σαγκάη

**Εικόνα 4.2.5** προσομοίωση τρένου SC maglev

**Πίνακας 4.2.6** λειτουργία, δοκιμές και έρευνα maglev projects ανά τον κόσμο

**Εικόνα 4.2.7** Bombardier Innovia Metro

**Εικόνα 4.2.8** ηλεκτροκίνητα τρένα με ευθύγραμμους κινητήρες ανά τον κόσμο

**Εικόνα 4.2.9** Monorail τρένο

**Εικόνα 4.2.10** όχημα personal rapid transit (PRT)

**Εικόνα 4.2.11** μαγνητικό αυτοκίνητο με ευθύγραμμο κινητήρα

**Εικόνα 4.3.1** Αξονικός τομογράφος

**Εικόνα 4.4.1** Επίπεδος και U-shape ευθύγραμμοι κινητήρες

**Εικόνα 4.4.2** Μεταφορέας κιβωτίων υψηλής ταχύτητας

**Εικόνα 4.4.3** ευθύγραμμος κινητήρας σε crash test αυτοκινήτου

**Σχήμα 4.4.4** ανελκυστήρας με ευθύγραμμο κινητήρα

**Σχήμα 4.4.5** ανελκυστήρας ευθύγραμμου κινητήρα με διακριτά τυλίγματα πρωτεύοντος

**Σχήμα 4.4.6**, X-Y σύστημα κίνησης με ευθυγραμμους κινητήρες

**Εικόνα 4.5.1** απογείωση αεροσκάφους με χρήση του συστήματος EMALS

**Εικόνα 4.5.2** Roller Coaster

**Εικόνα 4.5.3** σύστημα μεταφοράς αποσκευών σε αεροδρόμιο



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>:**

## **ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**

### **1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ:**

Η περιγραφή των θεμελιωδών αρχών που διέπουν στον ηλεκτρομαγνητισμό πραγματοποιήθηκε το 1831 από τους Michael Faraday και Joseph Henry. Αυτό, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη και εξέλιξη των ηλεκτρικών κινητήρων στην πρώιμη μορφή τους, είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της ηλεκτρικής κίνησης καθώς και πλήθος παράγωγων συστημάτων που σχετίζονται με αυτή.

Το 1888 ο Nikola Tesla ανέπτυξε τον κινητήρα AC, χρησιμοποιώντας δηλαδή εναλλασσόμενο ρεύμα. Όμως και ο κινητήρας DC είχε εμφανιστεί την ίδια περίοδο χάρη στον Thomas Edison. Η ύπαρξη αυτών των δύο διαφορετικών ειδών, επέφερε πολλές συζητήσεις στον επιστημονικό κλάδο για το ποια μηχανή υπερέφερε έναντι της άλλης. Αποτέλεσμα ήταν τόσο οι μηχανές AC όσο και οι μηχανές DC να εξελιχθούν, να βελτιωθούν και να γίνουν περισσότερο αποδοτικές με το πεδίο χρήσης τους να καλύπτει ένα ευρύ φάσμα.

Τα πλεονεκτήματα όμως του εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι του συνεχούς συντέλεσαν στην επικράτηση του AC κινητήρα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάπτυξη της δυνατότητας για ακριβή έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων, επήλθε επανάσταση στον τομέα της ηλεκτρικής κίνησης. Αρχικά τα πρώτα συστήματα ελέγχου που ήταν είτε μηχανικά είτε ηλεκτρικά, δεν είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα ενώ και η απόδοση τους ήταν σημαντικά χαμηλή. Αργότερα όμως με τα τρανζίστορ και την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος αυτό το πρόβλημα ξεπεράστηκε ανοίγοντας το δρόμο για την περαιτέρω ανάπτυξη του κλάδου.

Η ιστορία των ευθύγραμμων κινητήρων εντοπίζεται πολύ πίσω στο χρόνο και είναι σχεδόν σύγχρονη της ανακάλυψης των περιστροφικών ηλεκτρικών μηχανών. Τα πρώτα ίχνη αυτής χρονολογούνται στη δεκαετία του 1840 εξαιτίας της δουλειάς του Charles Wheatstone στο πανεπιστήμιο King's του Λονδίνου. Το μοντέλο του Charles Wheatstone όμως αποδείχτηκε μη πρακτικό ώστε να πραγματοποιηθεί μαζική παραγωγή. Ένα εφικτό μοντέλο περιγράφηκε από τον εφευρέτη Alfred Zehden το 1905 το οποίο αφορούσε τρένα και ανυψωτικά μηχανήματα.

Ο Γερμανός μηχανικός Hermann Kemper κατασκεύασε ένα λειτουργικό μοντέλο το 1935. Στα τέλη του 1940 ο καθηγητής Eric Laithwaite του Imperial College του Λονδίνου ανέπτυξε το πρώτο πλήρως λειτουργικό μοντέλο. Η όλο και αυξανόμενη ύπαρξη περιστροφικών ηλεκτρικών μηχανών, λόγω της εκτεταμένης χρήσης του ηλεκτρισμού, είχε ως αποτέλεσμα αυτό το είδος κινητήρα να μείνει στην αφάνεια για αρκετό χρονικό διάστημα.

Τα τελευταία χρόνια όμως η ύπαρξη τους ξαναήρθε στο φως λόγω της χρησιμοποίησης τους σε πολλά είδη συστημάτων τα οποία απαιτούν ευθύγραμμη κίνηση. Παράδειγμα τέτοιας τεχνολογίας είναι τα ηλεκτρομαγνητικά τρένα που πετυχαίνουν υψηλές ταχύτητες παρόλο που είναι ακριβά και μη συμβατά με τα περισσότερα υπάρχοντα σιδηροδρομικά δίκτυα.

## **1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ:**

### ➤ Θεωρητική περιγραφή

Το κύριο μέσο για τη συνεχή μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή και αντίστροφα είναι η στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή. Οι τρεις μεγάλες κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών είναι οι ακόλουθες:

- ✓ Σύγχρονες μηχανές
- ✓ Μηχανές επαγωγής ( ή ασύγχρονες μηχανές)
- ✓ Μηχανές συνεχούς ρεύματος

Οι δύο πρώτες κατηγορίες αποτελούν τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι ηλεκτρικές μηχανές ποικίλουν πολύ ως προς την ονομαστική τους ισχύ αλλά και ως προς τον τύπο τους που εξαρτάται από τον αριθμό καθώς και τη σύνδεση των τυλιγμάτων τους. Επομένως έχουμε μονοφασικές ,τριφασικές, με σύνδεση αστέρα, με σύνδεση τριγώνου. Όμως, παρά τις διαφορές τους αυτές, οι αρχές λειτουργίας τους είναι οι ίδιες.

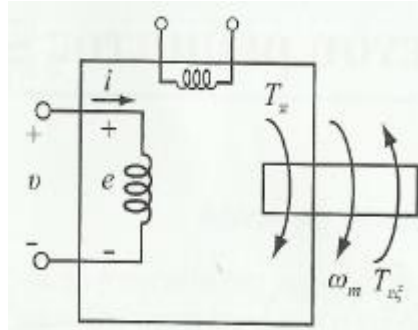
Κάθε στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Κι αυτό γιατί σε κάθε περιστρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή αναπτύσσεται ταυτόχρονα τόσο ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) , όσο και ροπή. Συγκεκριμένα οι τρόποι λειτουργίας τους είναι τρεις : Λειτουργία κινητήρα, λειτουργία γεννήτριας και λειτουργία πέδης.

## **ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ:**

Κατά τη λειτουργία του κινητήρα παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στο κύριο τύλιγμα της μηχανής, το οποίο ονομάζεται τύλιγμα τυμπάνου ,ενώ



αποδίδεται μηχανική ενέργεια σε μια περιστρεφόμενη άτρακτο που κινεί το μηχανικό φορτίο. Σε μορφή δίθυρου με μία ηλεκτρική και μία μηχανική θύρα, αυτός ο τρόπος λειτουργίας περιγράφεται στο ακόλουθο σχήμα:



**Σχήμα 1.2.1** λειτουργία κινητήρα

Μία εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση  $v$  οδηγεί ένα ρεύμα  $i$  στο τύλιγμα τυμπάνου ενάντια σε μια εσωτερικά επαγόμενη αντιηλεκτρεγερτική δύναμη ( αντί-ΗΕΔ)  $e$ . Το τύλιγμα τυμπάνου απορροφά έτσι ηλεκτρική ενέργεια με ρυθμό  $pe = e \cdot i$ . Η ενέργεια αυτή αποδίδεται από το πεδίο ζεύξης, το οποίο ασκεί μια στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_\pi$  πάνω στο περιστρεφόμενο μέλος της μηχανής που λέγεται δρομέας ( rotor ). Αν ο δρομέας στρέφεται με μηχανική γωνιακή ταχύτητα  $\omega_m$ , τότε η στιγμιαία εσωτερική ισχύς είναι  $T_\pi \cdot \omega_m$ . Η ισχύς αυτή εν μέρει χάνεται σε μηχανικές απώλειες περιστροφής και η υπόλοιπη αποδίδεται στην άτρακτο μέσω της εξωτερικά εφαρμοζόμενης ροπής φορτίου  $T_{\xi}$ , η οποία δρα με φορά αντίστροφη από εκείνη της περιστροφής και καθιστά το φορτίο ικανό να απορροφά μηχανική ενέργεια.

Αμελώντας τις απώλειες, η εξίσωση επιτάχυνσής ,με τις φορές του σχήματος 1.2.1, είναι :

$$T_\pi - T_{\xi} = J \cdot \frac{d \cdot \omega_m}{dt} \quad (1)$$

όπου  $J$  είναι η ροπή αδράνειας του δρομέα και του μηχανικού φορτίου. Όταν ισχύει η συνθήκη ισορροπίας δηλαδή  $T_\pi = T_{\xi}$  τότε από τη σχέση 1 προκύπτει:

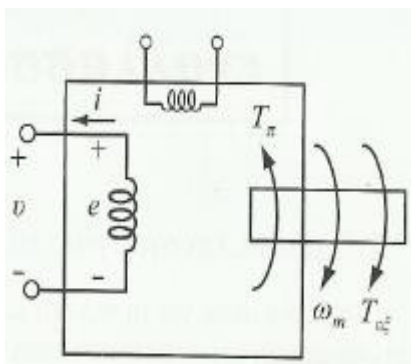
$$\frac{d \cdot \omega_m}{dt} = 0 \quad (2)$$

και η μηχανή περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega_m$ . Αυτή η συνθήκη αποτελεί προϋπόθεση για να επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής. Το μαγνητικό πεδίο ζεύξης, το οποίο διαμεσολαβεί για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή δημιουργείται σε πολλές περιπτώσεις από ένα βοηθητικό τύλιγμα , το οποίο ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης ή αλλιώς τύλιγμα πεδίου. Σε μερικές περιπτώσεις μηχανών το πεδίο διέγερσης μπορεί να παράγεται από μόνιμο μαγνήτη. Στη μόνιμη λειτουργία των συνηθισμένων μηχανών που έχουν χωριστά τροφοδοτούμενο τύλιγμα διέγερσης, η μέση τιμή

της ισχύος που τροφοδοτεί το τύλιγμα αυτό είναι πολύ μικρή και δαπανάται κυρίως σε απώλειες θερμότητας.

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ:

Η λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής ως γεννήτριας είναι η αντίστροφη εκείνης που περιγράψαμε ως κινητήρα. Συγκεκριμένα παρέχεται μηχανική ενέργεια στην άτρακτο της ηλεκτρικής μηχανής από μία κινητήρια μηχανή και εξέρχεται ηλεκτρική ενέργεια από τους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου. Η κινητήρια μηχανή ενδεικτικά μπορεί να είναι ένας ατμοστρόβιλος, ένας υδροστρόβιλος ή μια μηχανή εσωτερικής καύσης. Η λειτουργία γεννήτριας μιας ηλεκτρικής μηχανής παριστάνεται στο επόμενο σχήμα:



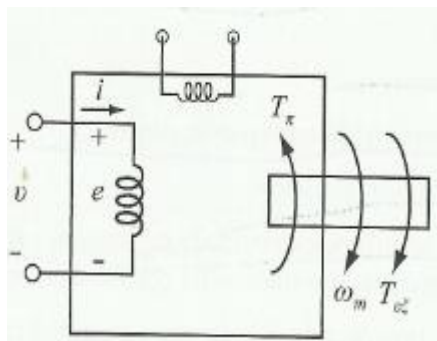
**Σχήμα 1.2.2** λειτουργία γεννήτριας

Συγκεκριμένα, η άτρακτος κινείται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega m$  με φορά που συμπίπτει με εκείνη της επιβαλλόμενης εξωτερικά ροπής  $T_{εξ}$  και αντίθετα από την ηλεκτρομηχανική ροπή  $T_{\pi}$  που ασκεί το πεδίο. Η αντιροπή αυτή επιτρέπει στη μηχανή να απορροφά μηχανική ενέργεια και να τη μετατρέπει σε ηλεκτρική. Στο τύλιγμα τυμπάνου αναπτύσσεται τώρα μια ηλεκτρεγερτική δύναμη, ΗΕΔ,  $e$  εξαιτίας της οποίας προκαλείται ένα ρεύμα  $i$  το οποίο τροφοδοτεί ένα εξωτερικό ηλεκτρικό φορτίο με τάση ακροδεκτών  $u$ . Η εξίσωση επιτάχυνσης (1) που αναφέραμε κατά τη λειτουργία της μηχανής ως κινητήρας ισχύει και τώρα με κατάλληλη προσαρμογή των πρόσημων ( $-\omega m$  αντί για  $\omega m$ ). Η συνθήκη ισορροπίας (2) ισχύει επίσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

## ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΕΔΗΣ:

Σε αυτό τον τρόπο λειτουργίας, η ηλεκτρική μηχανή απορροφά τόσο μηχανική όσο και ηλεκτρική ενέργεια. Η ολική ενέργεια εισόδου χάνεται μέσα στη μηχανή με μορφή απωλειών (κυρίως θερμικών) και η μηχανή λειτουργεί

σαν πέδη, δηλαδή φρενάρει. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας, που είναι περιορισμένης εφαρμογής, περιγράφεται σχηματικά παρακάτω:



**Σχήμα 1.2.3** λειτουργία πέδης

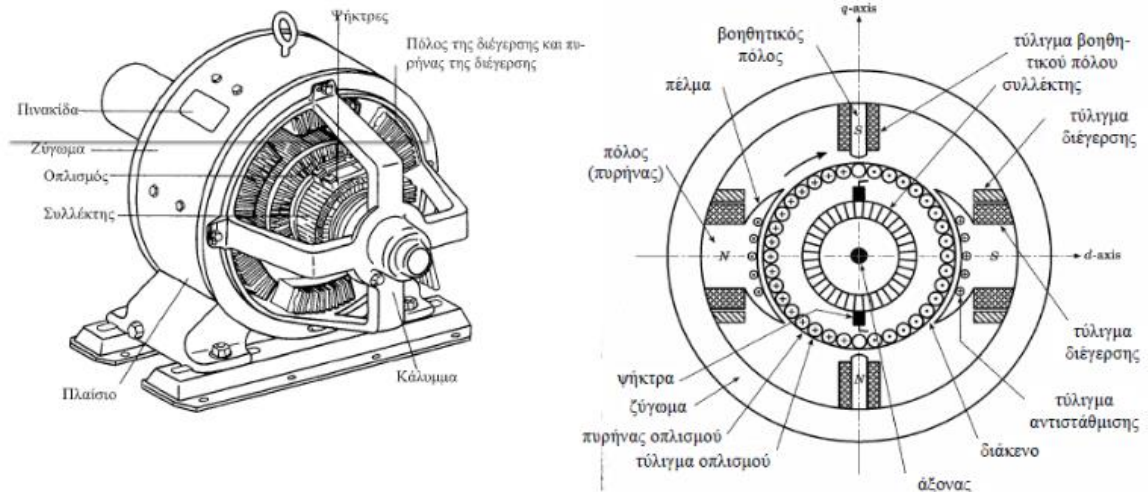
## ➤ Δομή Στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών

### ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ( DC):

Η πρώτη κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών είναι οι μηχανές συνεχούς ρεύματος ή αλλιώς DC. Αναλύοντας τη δομή μιας μηχανής DC, έχουμε τα εξής κύρια μέρη:

- ✓ Στάτης (αποτελεί το ακίνητο μέρος της μηχανής)
- ✓ Ζύγωμα (αποτελεί τον κορμό της μηχανής)
- ✓ Τύλιγμα διέγερσης (παράγει το κύριο μαγνητικό πεδίο της μηχανής)
- ✓ Κύριοι – βοηθητικοί πόλοι
- ✓ Ψήκτρες
- ✓ Δρομέας (αποτελεί το στρεφόμενο μέρος της μηχανής)
- ✓ Πυρήνας
- ✓ Συλλέκτης

Στο σχήμα 1.2.4 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος:



**Σχήμα 1.2.4** μηχανή συνεχούς ρεύματος

Ο στάτης αποτελείται από ένα ηλεκτρομαγνήτη με δύο πόλους, το βόρειο και το νότιο, ο οποίος παράγει το μαγνητικό πεδίο  $B$  (σχήμα 1.2.5). Ο δρομέας αποτελείται από έναν κύλινδρο κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό, οποίος μπορεί και να στραφεί γύρω από τον άξονα του.

Αν το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτηθεί με συνεχές ρεύμα, τότε η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Η περιστροφή του δρομέα οφείλετε στις δυνάμεις Laplace που αναπτύσσονται στις πλευρές  $ab$  και  $γδ$  του πλαισίου. Η εξίσωση που δίνει τη δύναμη αυτή είναι :

$$F = i \cdot (l \times B) \quad (3)$$

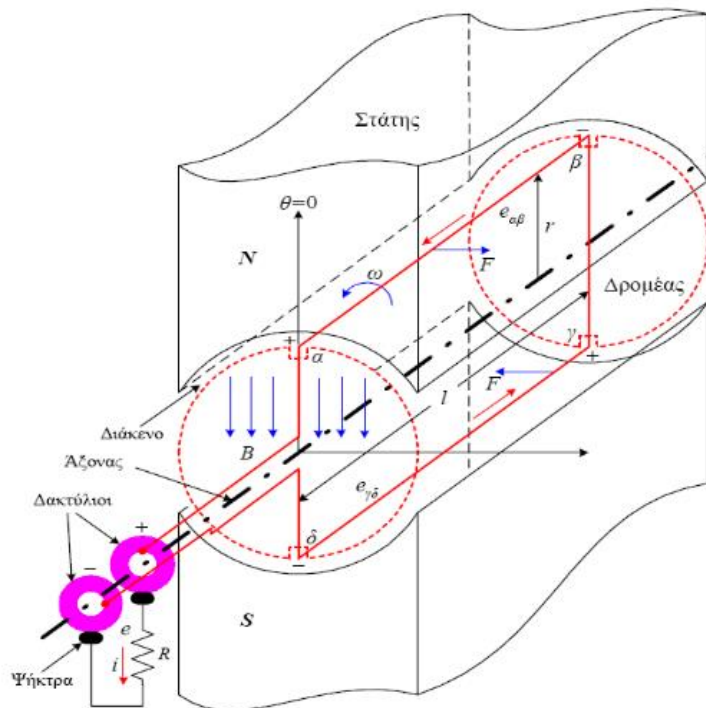
όπου  $l$  το μήκος του αγωγού,  $B$  το μαγνητικό πεδίο και  $i$  η ένταση του ρεύματος.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο είναι συνδεδεμένο ηλεκτρικά το τύλιγμα διέγερσης με το τύλιγμα δρομέα υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά είδη.

Συγκεκριμένα:

- ✓ Ανεξάρτητης διέγερσης ( το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται από πηγή ανεξάρτητη εκείνης του κυκλώματος δρομέα)
- ✓ Παράλληλης διέγερσης ( το τύλιγμα διέγερσης είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το τύλιγμα δρομέα)
- ✓ Σειράς ( το τύλιγμα διέγερσης είναι σε σειρά με το τύλιγμα δρομέα)

- ✓ Σύνθετης διέγερσης ( είναι συνδυασμός παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σε σειρά)



**Σχήμα 1.2.5** δυνάμεις- πεδίο σε DC μηχανή

## ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ:

Η συνήθης σύγχρονη μηχανή έχει δρομέα ο οποίος διεγείρεται από πηγή συνεχούς ρεύματος, η οποία καλύπτει μόνο τις απώλειες του τυλίγματος διεγέρσεως. Ο δρομέας αυτός περιστρέφεται συγχρόνως με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Η σχέση μεταξύ συχνότητας, αριθμού στροφών ανά λεπτό και αριθμού πόλων είναι

$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \quad (4)$$

όπου f η συχνότητα, P ο αριθμός των πόλων και n ο αριθμός των στροφών ανά λεπτό.

Αναλυτικά, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το συνεχές ρεύμα που ρέει στο τύλιγμα του δρομέα, περιστρέφεται στο διάκενο με την ταχύτητα του δρομέα. Για να αναπτυχθεί σταθερή ηλεκτρομαγνητική ροπή, το μαγνητικό πεδίο του στάτη πρέπει να περιστρέφεται επίσης με την ίδια ταχύτητα η οποία ονομάζεται σύγχρονη και είναι το n της εξίσωσης (4) παραπάνω. Επομένως μια σύγχρονη μηχανή περιστρέφεται στη μόνιμη κατάσταση με τη σύγχρονη αυτή

ταχύτητα. Επειδή όμως οι σύγχρονες μηχανές αναπτύσσουν ροπή μόνο στη σύγχρονη ταχύτητα, κατά την εκκίνηση ενός σύγχρονου κινητήρα, όταν και ο δρομέας είναι ακίνητος, η μέση τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι μηδέν. Δεν διαθέτει από μόνη της η μηχανή ροπή εκκίνησης κάτι που πρέπει να γίνει με άλλο τρόπο ώστε να φτάσει στη σύγχρονη ταχύτητα.

Από κατασκευαστικής απόψεως διακρίνονται σε δύο είδη. Μηχανές με κυλινδρικό δρομέα και με έκτυπους πόλους. Ο δρομέας φέρει το τύλιγμα συνεχούς ρεύματος το οποίο για κυλινδρικό δρομέα είναι τοποθετημένο σε αξονικούς αύλακες. Οι ακροδέκτες συνδέονται σε δακτυλίους επί των οποίων ολισθαίνουν ψήκτρες από άνθρακα μέσω των οποίων εισάγεται το ρεύμα πεδίου.

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ:

Μία ηλεκτρική μηχανή επαγωγής αποτελείται από δύο κύρια μέρη. Το πρώτο είναι σταθερό, ονομάζεται στάτης και φέρει στις αύλακές του ένα μονοφασικό, διφασικό ή τριφασικό τύλιγμα. Το δεύτερο μέρος είναι στρεφόμενο και ονομάζεται δρομέας. Ο πυρήνας του στάτη συντίθεται από ελάσματα χάλυβα με συνηθέστερο πάχος από 0,3 ως 0,6 mm. Τα τυλίγματα του στάτη εισάγονται στις αύλακες είτε ως τυλιγμένα πηνία είτε τυλίγονται μέσα στις αύλακες ως προκατασκευασμένα πηνία. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι δρομέων:

Το πρώτο είναι το τύλιγμα κλωβού (σχήμα 1.2.6). Είναι το απλούστερο και αποτελείται από αριθμό ράβδων (αλουμινίου ή χαλκού) κατά τη διεύθυνση της γενέτειρας ή με κάποια λοξότητα, οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα δύο άκρα με δακτυλίους από το ίδιο υλικό.

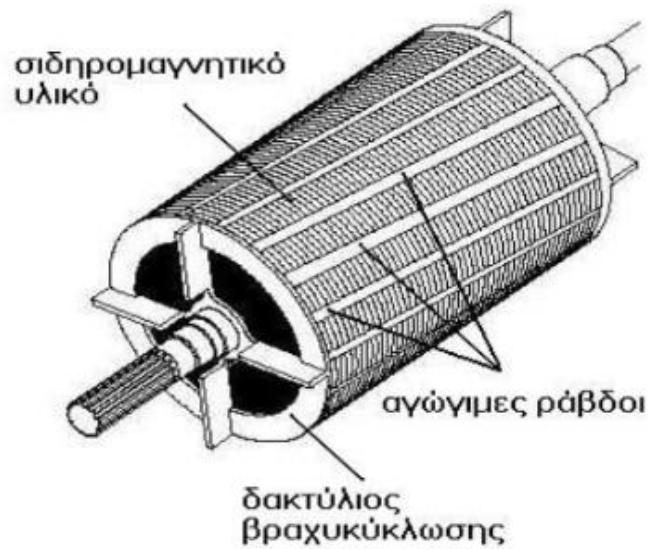
Το δεύτερο είναι με δακτυλίους (σχήμα 1.2.7). Αυτοί στην περίπτωση κινητήρων μέχρι 10kW διαθέτουν συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα όπως αυτά στο στάτη. Επιπλέον ο δρομέας με δακτυλίους απαιτεί εκτός των δακτυλίων και ψήκτρες καθώς και αντιστάσεις εκκινήσεως.

Ρεύματα επάγονται στο τύλιγμα του δρομέα από το τύλιγμα του στάτη. Τα ρεύματα αυτά έχουν διαφορετική συχνότητα από εκείνη του στάτη, επειδή ο δρομέας κινείται. Το παραγόμενο από τα ρεύματα μαγνητικό πεδίο, στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα η οποία δίνεται από τη σχέση (4), που αναφέραμε και στις σύγχρονες μηχανές. Τώρα θα τη συμβολίσουμε με  $n_s$  για να τη διακρίνουμε από ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $n$ . Επομένως έχουμε:

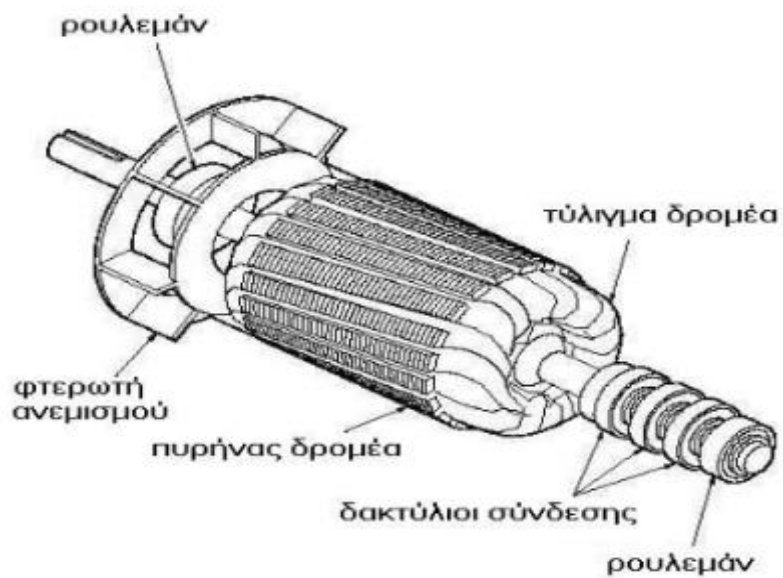
✓  $n_s = \frac{120f}{P}$  η σύγχρονη ταχύτητα και  $\omega_s = \frac{2\pi f}{P/2}$  η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.

✓  $n = (1-s) n_s$  η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και

- ✓  $\omega_m = (1-s) \omega_s$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, όπου  $s$  ονομάζεται ολίσθηση.

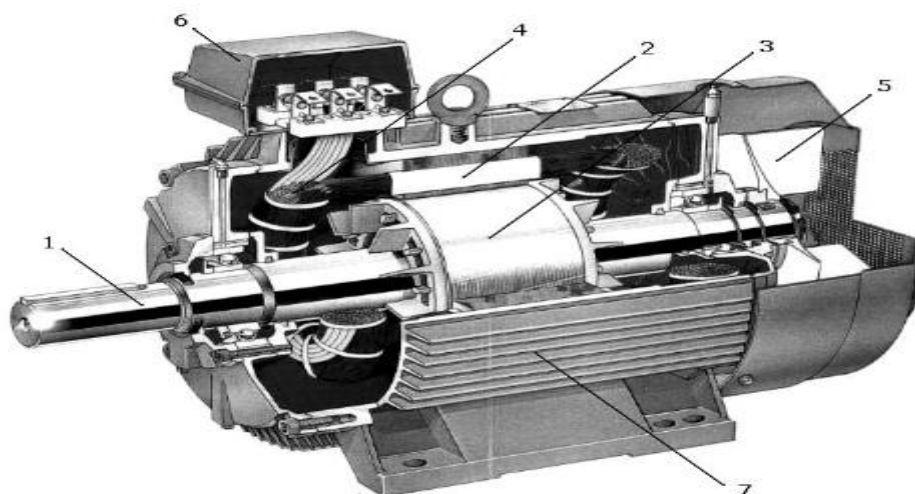


**Σχήμα 1.2.6** τύλιγμα κλωβού



**Σχήμα 1.2.7** τύλιγμα με δακτύλιους

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας τριφασικός κινητήρας επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού:



**Σχήμα 1.2.8** 3-φ κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού όπου:

1. ο άξονας, 2. ο στάτης, 3. ο δρομέας, 4. το τύλιγμα του στάτη, 5. η φτερωτή ανεμισμού, 6. το κιβώτιο σύνδεσης τυλιγμάτων/ακροδεκτών, 7. το πλαίσιο

## 1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ:

### 1.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Έχοντας κάνει μια εισαγωγή στις περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, θα περάσουμε στην πλήρη περιγραφή των αρχών που διέπουν σε ένα διαφορετικό είδος ηλεκτρικής μηχανής, τον ευθύγραμμο ηλεκτρικό κινητήρα. Η εισαγωγή αυτή έγινε καθώς οι ευθύγραμμοι κινητήρες δε διαφέρουν ουσιαστικά στον τρόπο λειτουργίας από τους γνωστούς στρεφόμενους. Οι κανόνες μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική είναι οι ίδιοι χρησιμοποιώντας τη μαγνητική ενέργεια και το μαγνητικό πεδίο ως μέσα αποθήκευσης και σύζευξης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων τους, αντίστοιχα.

Οι εφαρμογές της γραμμικής κίνησης σήμερα είναι πιο απαιτητικές από ποτέ. Μεγαλύτερες ταχύτητες, ακριβής προσδιορισμός της θέσης, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, λιγότερα κινητά μέρη και λιγότερη συντήρηση είναι μερικά στοιχεία μιας μεγάλης λίστας. Με τη συνεχή τεχνολογική εξέλιξη, πλησιάζουμε κοντά στην κάλυψη πολλών από αυτών των απαιτήσεων.





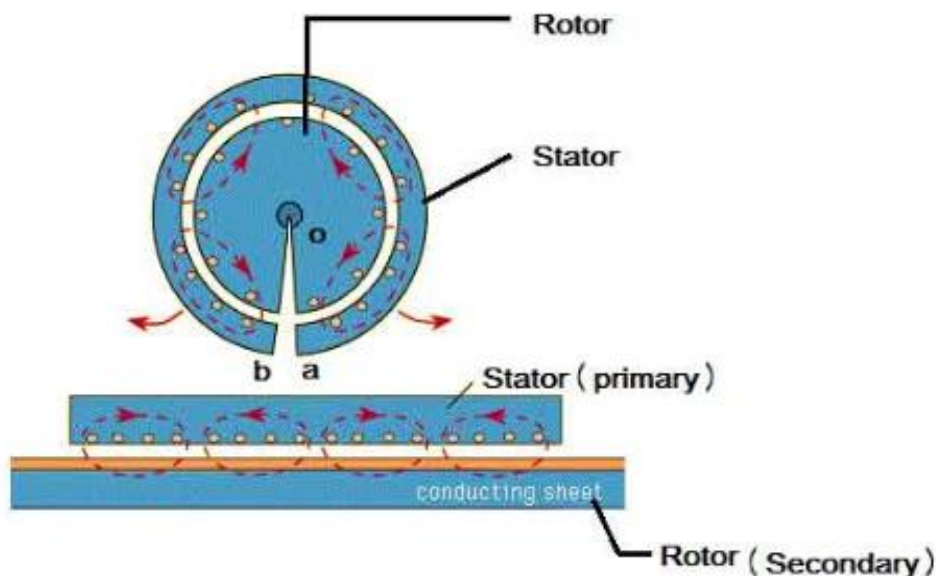
**Εικόνα 1.3.1.1** ευθύγραμμος κινητήρας

Πριν από μία δεκαετία ήταν δύσκολο να βρεθεί μία συσκευή η οποία μπορούσε να επιτύχει ταχύτητα 5 m/s σε απόλυτα ευθύγραμμη κίνηση, με ικανοποιητική χωρητικότητα φορτίου και ακαμψία. Σήμερα όμως υπάρχουν τέτοια συστήματα τα οποία υπερκαλύπτουν τους παραπάνω κρίσιμους παράγοντες. Τη βάση για τη δημιουργία και την εξέλιξη τέτοιων συστημάτων, αποτελεί ο ευθύγραμμος κινητήρας.

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες είναι ηλεκτρικοί κινητήρες οι οποίοι παράγουν κίνηση σε ευθεία γραμμή σε αντίθεση με την περιστροφική κίνηση. Στην ξένη βιβλιογραφία τους συναντάμε ως Linear Motors όμως η μετάφραση ως γραμμικοί κινητήρες μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση σε σχέση με τον τρόπο κίνησης των μηχανών αυτών και το πώς συμπεριφέρονται ηλεκτρικά. Επομένως από το σημείο αυτό θα το τους αναφέρουμε μόνο ως ευθύγραμμους κινητήρες. Θεωρητικά μπορούν να επιτύχουν επιταχύνσεις μεγαλύτερες των 20g και ταχύτητα 20m/s όμως περιορισμοί στους παραμέτρους κίνησης εμποδίζουν κάτι τέτοιο. Έτσι οι συνήθεις ευθύγραμμοι κινητήρες επιτυγχάνουν ταχύτητες της τάξης των 5m/s και επιτάχυνση 5g.

Στους κλασσικούς κινητήρες ο δρομέας περιστρέφεται εντός ενός ακλόνητου μέρος το οποίο ονομάζεται στάτη. Στους ευθύγραμμους κινητήρες όμως, αυτή η διάταξη είναι διαφορετική. Η κίνηση πλέον μεταξύ δρομέα και στάτη είναι ευθύγραμμη. Επί της ουσίας, ο ευθύγραμμος κινητήρας είναι ο κλασσικός περιστροφικός ξετυλιγμένος, δηλαδή αποτελεί ανάπτυγμα αυτού. Βέβαια αυτό δε συνεπάγεται και ομοιότητα ως προς τις χαρακτηριστικές λειτουργίας τους λόγω και της διαφορετικής συμμετρίας των δύο μοντέλων. Ο δρομέας έτσι μετατρέπεται σε μια ράγα μαγνητών ή σπειρωμάτων. Το φορτίο συνδέεται απευθείας στον κινητήρα και επιτυγχάνεται η ευθύγραμμη κίνηση χωρίς περιστροφή.

Ο πυρήνας ( δρομέας) βρίσκεται τοποθετημένος παράλληλα με το στάτη με ένα διάκενο να τους χωρίζει αντίστοιχα όπως και στους περιστροφικούς κινητήρες. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως ο δρομέας βρίσκεται ανάμεσα στα τυλίγματα του στάτη. Τότε ο ευθύγραμμος κινητήρας ονομάζεται διπλού διακένου. Αυτό μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητό από το σχήμα 1.3.1.2 :



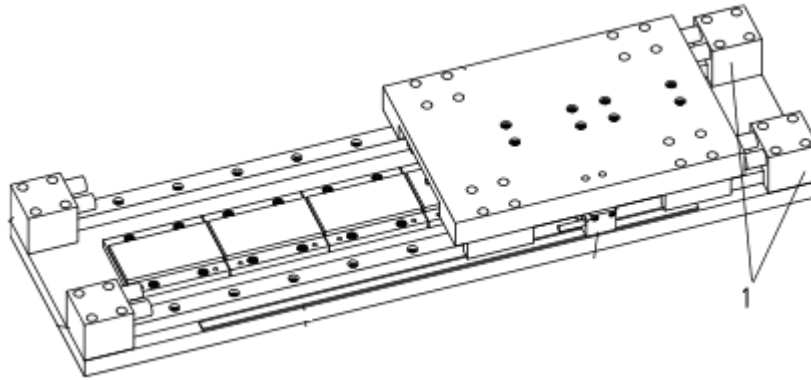
**Σχήμα 1.3.1.2** ευθύγραμμος κινητήρας ως ανάπτυγμα περιστροφικού

Αν ο στάτης της περιστροφικής μηχανής του σχήματος 1.3.1.2 κοπεί κατά μήκος της τομής  $aob$  και απλωθεί σε επίπεδη επιφάνεια, τότε σχηματίζει το πρωτεύον (primary) του ευθύγραμμου κινητήρα και συνεπώς ο δρομέας σχηματίζει το δευτερεύον (secondary). Με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, το δευτερεύον κινείται κατά μήκος του πρωτεύοντος ωθούμενο από τη δύναμη λόγω του μαγνητικού πεδίου.

Στην περίπτωση που το πρωτεύον διεγερθεί από μία τριφασική παροχή, ροή επάγεται στο πρωτεύον. Το ηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται στους αγωγούς του δρομέα (συνήθως αλουμινένιους) και είναι το αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης μεταξύ της οδεύοντος ροής και των αγωγών. Αυτό το ηλεκτρικό ρεύμα αλληλοεπιδρά με την οδεύουσα ροή και παράγεται γραμμική δύναμη η οποία προκαλεί και την επιθυμητή ώθηση.

Η βασική αρχή για την κίνηση σε ένα ευθύγραμμο κινητήρα είναι η ακόλουθη. Όταν τροφοδοτήσουμε το πρωτεύον και ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στο τύλιγμα του, παράγεται ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο κινείται κατά την οριζόντια διεύθυνση. Αυτό το κινούμενο μαγνητικό πεδίο από το πρωτεύον, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ρευμάτων και που κυκλοφορούν στο δευτερεύον καθώς και ένα άλλο μαγνητικό πεδίο σε αυτό. Τα δύο αυτά μαγνητικά πεδία αναπτύσσουν δυνάμεις μεταξύ τους έχοντας ως αποτέλεσμα την ευθύγραμμη κίνηση. Επιπλέον χρειάζονται γραμμές οι οποίες διατηρούν τη θέση του δευτερεύοντος και θα καθορίσουν την τροχιά στην οποία θα κινηθεί. Σε αυτές είναι δυνατόν να υπάρχουν και μηχανικά φρένα, δηλαδή κάποιος προεξοχές οι οποίες θα ανακόπτουν την κίνηση του όπου απαιτείται.

Στο σχήμα 1.3.1.3 παρουσιάζεται ένας επίπεδος ευθύγραμμος κινητήρας ο οποίος διαθέτει μηχανικά φρένα τα οποία είναι μεταλικές προεξοχές που στόχο έχουν να ανακόψουν την κίνηση του κινητήρα σε επιλεγμένα σημεία.



**Σχήμα 1.3.1.3** μηχανικό φρένο σε ευθύγραμμο κινητήρα, όπου 1 είναι τα μηχανικά φρένα.

Η ανάλυση που προηγήθηκε αγορά μια συγκεκριμένη κατηγορία ευθύγραμμων κινητήρων οι οποίοι ονομάζονται επίπεδοι ευθύγραμμοι κινητήρες (flat linear motors). Πρόκειται δηλαδή για τους κινητήρες που έχουν προκύψει ως ανάπτυγμα ενός περιστροφικού με το δρομέα να είναι παράλληλος ως προς το στάτη και με διάκενο ανάμεσα τους (μονό ή διπλό). Οι κινητήρες αυτοί μπορεί να έχουν υποστήριξη σιδήρου. Αυτό εξυπηρετεί στην μεγιστοποίηση της δύναμης ώθησης. Το μειονέκτημα είναι όμως η ύπαρξη ελκτικών δυνάμεων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος καθώς και του φαινομένου της οδόντωσης (cogging). Οι σύγχρονοι όμως κινητήρες αυτού του τύπου είναι σχεδιασμένοι ώστε να είναι μειωμένα τα φαινόμενα αυτά και έτσι να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Υπάρχει βέβαια και η περίπτωση επίπεδων κινητήρων χωρίς υποστήριξη σιδήρου. Σε αυτούς δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της οδόντωσης που προκαλεί μείωση στην απόδοση ενώ επίσης οι ελκτικές δυνάμεις είναι ισχνές.

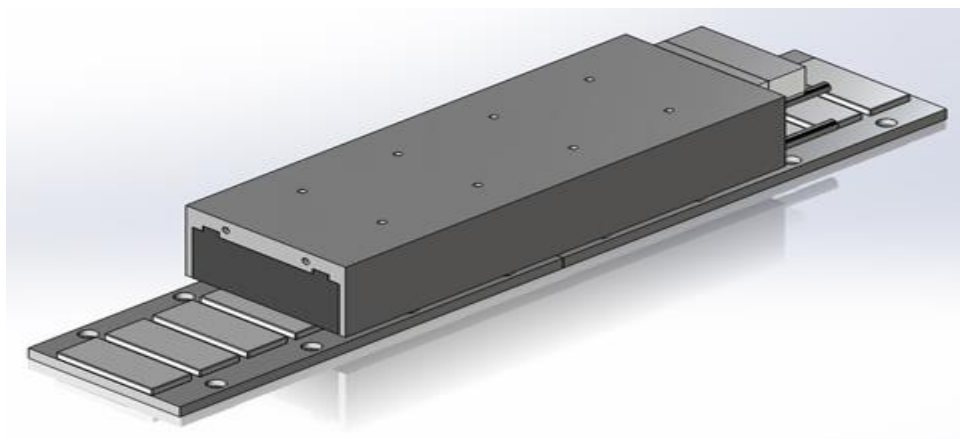
Πέρα από τους επίπεδους ευθύγραμμους κινητήρες υπάρχουν και άλλα είδη ως προς τη μορφή τους ( U-type, κυλινδρικός κλπ.) τα οποία θα παρουσιαστούν σε επόμενη ενότητα. Όμως πρέπει να αναφέρουμε πως η μελέτη μας στηρίζεται πάνω στους επίπεδους ευθύγραμμους κινητήρες και στις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν αυτό το είδος.

## 1.3.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Υπάρχουν πολλά είδη ευθύγραμμων κινητήρων σήμερα, η επιλογή του κατάλληλου εκ των οποίων στηρίζεται στη λειτουργία που καλείται να επιτελέσει καθώς και σε οικονομικά κριτήρια. Στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσουμε τα κυριότερα από αυτά τα είδη.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, το είδος ευθύγραμμου κινητήρα πάνω στον οποίο στηρίζεται η μελέτη μας είναι του επίπεδου ευθύγραμμου κινητήρα (σχήμα 1.3.2.1) με υποστήριξη σιδήρου ή χωρίς. Στους κινητήρες χωρίς υποστήριξη σιδήρου δεν εμφανίζονται ελκτικές

δυνάμεις καθώς και το φαινόμενο της οδόντωσης. Αντιθέτως σε κινητήρες με υποστήριξη σιδήρου στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον εμφανίζεται ελκτική δύναμη καθώς και το φαινόμενο της οδόντωσης. Το πλεονέκτημα όμως είναι πως με υποστήριξη σιδήρου επιτυγχάνονται μεγαλύτερες δυνάμεις πρόωσης.



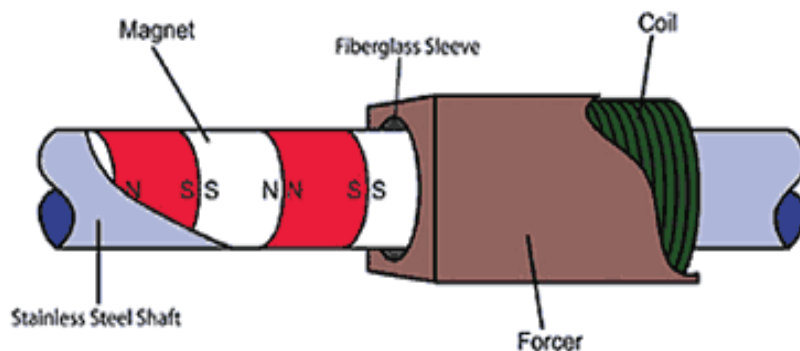
**Εικόνα 1.3.2.1** ευθύγραμμος επίπεδος κινητήρας

Πέρα από αυτόν όμως υπάρχουν και άλλα είδη ευθύγραμμων κινητήρων με διαφορετικό τρόπο κατασκευής και διαφορετικές ιδιότητες που αξίζει να αναφέρουμε:

### **ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ:**

Ο σωληνοειδής ευθύγραμμος κινητήρας (tubular linear motor) είναι ένας τύπος ευθύγραμμου κινητήρα ο οποίος έχει την εξής διαφοροποίηση. Ο δρομέας αποτελείται από μια σειρά σωληνοειδών πηνίων τυλιγμένα γύρω από μια ράβδο η οποία περιέχει ένα αριθμό ισχυρών κυλινδρικών μόνιμων μαγνητών ευθυγραμμισμένους σε εναλλασσόμενες και αντίθετες κατευθύνσεις(σχήμα 1.3.2.2).

Όταν είχαν κυκλοφορήσει οι ευθύγραμμοι κινητήρες που είχαν τη μορφή ενός “ξετυλιγμένου” περιστροφικού κινητήρα, με πυρήνα σιδήρου επίπεδης μορφής, κυριάρχησαν στην ως πιο αποδοτικοί συγκρινόμενοι με τα υπόλοιπα συστήματα γραμμικής κίνησης της εποχής. Όμως αποδείχτηκε πως οι αποδοτικότητά τους περιοριζόταν από δυνάμεις οδόντωσης (cogging torque) τα οποία προκαλούσαν απώλειες και έτσι η καταλληλότητα του κινητήρα για υψηλής ακρίβειας εφαρμογές, περιοριζόταν.



**Σχήμα 1.3.2.2** σωληνοειδής ευθύγραμμος κινητήρας

Αργότερα όμως, ο σωληνοειδής ευθύγραμμος κινητήρας (U-shaped), αναπτύχθηκε για να περιορίσει αυτά τα προβλήματα. Με το νέο αυτό σχέδιο οι απώλειες λόγω δινορευμάτων και φαινομένου οδόντωσης περιορίστηκαν. Βέβαια η ακαμψία και η μεγαλύτερη παραγωγή θερμότητας είναι μειονεκτήματα που αξίζει να αναφέρουμε.

Πέρα από τις κατηγορίες που αναφέραμε και οι οποίες έχουν μια εντελώς διαφορετική κατασκευαστική μορφή από τους περιστροφικούς, υπάρχουν και άλλα είδη ευθύγραμμων κινητήρων τα οποία τα έχουμε συναντήσει και σε αυτούς όπως :

### ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ:

Οι σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες (ΣΕΚ), συναντώνται σε δύο κύριους τύπους. Ο πρώτος είναι σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες με υποστήριξη σιδήρου. Αυτή αποτελεί και τη συμβατική μορφή του κινητήρα. Υπάρχουν όμως και σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες χωρίς σίδηρο. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται υπεραγώγιμοι μαγνήτες. Ο κινητήρας αυτός είναι γνωστός ως υπεραγώγιμος σύγχρονος κινητήρας ή σύγχρονος ευθύγραμμος κινητήρας αέρος. Χαρακτηριστικό των κινητήρων αυτών είναι πως το δευτερεύον κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα  $v_s = 2t f_s$  όπου  $t$  είναι το πολικό βήμα και  $f_s$  η συχνότητα του δικτύου.

Οι υπεραγώγιμοι σύγχρονοι κινητήρες κατά κανόνα κατασκευάζονται έχοντας βραχύ δευτερεύον, έχοντας δηλαδή μικρό αριθμό υπεραγώγιμων μαγνητών. Αυτό συμβαίνει επειδή το κόστος για την προμήθεια όσο και την συντήρηση των μαγνητών αυτών είναι αρκετά υψηλό.

Η άλλη κατηγορία σύγχρονων ευθύγραμμων κινητήρων, αυτοί με υποστήριξη σιδήρου, μπορούν να διαθέτουν είτε βραχύ πρωτεύον είτε βραχύ δευτερεύον. Συνηθέστερα συναντάμε την περίπτωση του κινητήρα με βραχύ δευτερεύον.

Ο πιο διαδεδομένος από τους σύγχρονους κινητήρες είναι ο σύγχρονος ευθύγραμμος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη ο οποίος και χρησιμοποιείται σε

εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια. Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο δρομέα ή στο στάτη ενώ στο άλλο τμήμα υπάρχει τριφασικό τύλιγμα. Στις μηχανές αυτές το πεδίο διέγερσης το δημιουργούν οι μαγνήτες που βρίσκονται στο στάτη ή στο δρομέα όπως αναφέραμε. Όμως λόγω του μεγάλου όγκου του τριφασικού τυλίγματος οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται στο στάτη και το τύλιγμα στο δρομέα. Το μειονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι πως ο δρομέας πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς με ρεύμα κάτι που γίνεται με ειδικό καλώδιο το οποίο ακολουθεί την κίνηση του και το οποίο πρέπει να έχει αυξημένη αντοχή. Επίσης το ρεύμα που διαρρέει το τριφασικό τύλιγμα πρέπει να αλλάζει πολικότητα ώστε να μένει συγχρονισμένο με το πεδίο του μαγνήτη και επομένως η παραγόμενη δύναμη να έχει σταθερό πρόσημο. Οι κινητήρες αυτοί δε διαθέτουν σύστημα ψηκτρών η αλλαγή της πολικότητας γίνεται μέσω της μονάδας οδήγησης ενώ ειδικοί αισθητήρες θέσης και ταχύτητας στο δρομέα συμβάλουν στο συγχρονισμό του κυκλώματος ελέγχου με τη θέση του δρομέα. Το γεγονός όμως ότι το πεδίο διέγερσης προέρχεται από τους μόνιμους μαγνήτες δεν επιτρέπει στην άμεση δυνατότητα ελέγχου του.

## **ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ:**

Η λειτουργία των μηχανών αυτών στηρίζεται στην αρχή της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης που πραγματοποιείται μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Στο πρωτεύον συνήθως υπάρχει ένα τριφασικό τύλιγμα το οποίο τροφοδοτείται από μια τριφασική πηγή τάσης ενώ επίσης υποστηρίζεται και από σίδηρο. Το δευτερεύον είναι ένα απλό αγωγίμο φύλλο στο οποίο γίνεται επαγωγή ρευμάτων ενώ αυτή κινείται κατά τη διεύθυνση του οριζόντιου άξονα.

Ο συνήθης ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας (EEK) , έχει ένα τριφασικό τύλιγμα διπλής στρώσης στο πρωτεύον το οποίο αποτελείται από τρία μονοφασικά τυλίγματα τα οποία διαρρέονται από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων.

Στο δευτερεύον μπορεί να μην υπάρχει υποστήριξη σιδήρου. Μπορεί ακόμα το δευτερεύον να είναι ένα χαλύβδινο στρώμα πάχους αρκετών εκατοστών. Το σιδηρομαγνητικό στρώμα πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί πολύ μεγάλου πάχους επομένως η ολική ισοδύναμη χαρακτηριστική του αντίσταση είναι ισοδύναμη προς τη χαρακτηριστική αντίσταση του σιδηρομαγνητικού υλικού. Σχηματικά αυτή η περίπτωση περιγράφεται στο σχήμα 1.3.2.3.

Επιπλέον, όπως θα αναφέρουμε και στη συνέχεια, υπάρχουν και επαγωγικοί κινητήρες οι οποίοι ονομάζονται διπλής όψεως καθώς φέρουν δύο πρωτεύοντα και ένα δευτερεύον. Ένας τέτοιος κινητήρας είναι ισοδύναμος με δύο κινητήρες που φέρουν ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον(κινητήρες απλής όψεως).

Τέλος, το δευτερεύον μπορεί να είναι κάποιο αγωγίμο στρώμα το οποίο έχει μεγάλο πάχος. Αυτό μπορεί να είναι για παράδειγμα θαλασσινό νερό(σχήμα 1.3.2.4).



**Σχήμα 1.3.2.3** Ε.Ε.Κ με δευτερεύον χαλύβδινη πλάκα



**Σχήμα 1.3.2.4** Ε.Ε.Κ με δευτερεύον αγώγιμο στρώμα

Η σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου σε στροφές ανά δευτερόλεπτο είναι:

$$n_s = 2f_s/p,$$

ενώ η ταχύτητα του γραμμικά κινούμενου πεδίου σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο είναι :

$$v_s = 2\pi f_s r$$

όπου  $f_s$  είναι η συχνότητα της πηγής σε Hz,  $p$  ο αριθμός των πόλων και  $r$  το πολικό βήμα (pole pitch) δηλαδή η απόσταση από το κέντρο του ενός πόλου μέχρι του άλλου.

Έτσι δεδομένου ολίσθησης  $s$  η ταχύτητα του δευτερεύοντος σε m/s είναι :

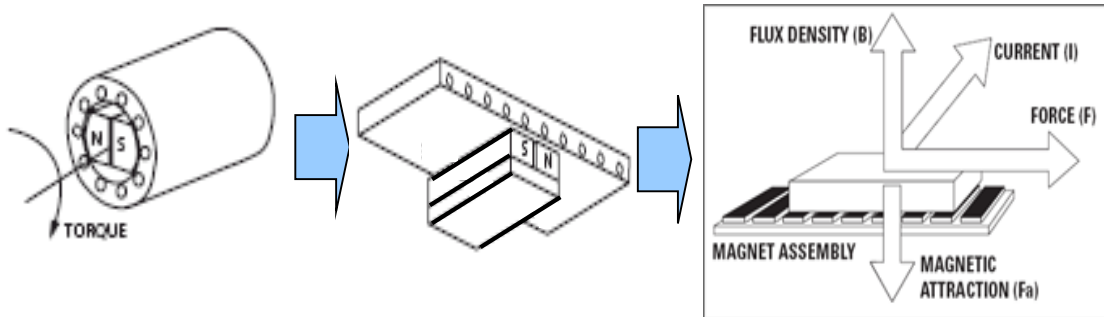
$$v_r = (1 - s)v_s$$

Εκτός όμως των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, έχουμε και τους κινητήρες που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα. Επομένως έχουμε :

## DC ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ:

Ευθύγραμμος κινητήρας DC ή συνεχούς ρεύματος καλείται ο ευθύγραμμος κινητήρας συνεχούς ρεύματος DC, ο οποίος βασίζει τη λειτουργία του στο μοντέλο Lorentz. Σύμφωνα με αυτό, η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι γραμμικά ανάλογη του φορτίου και του μαγνητικού πεδίου.

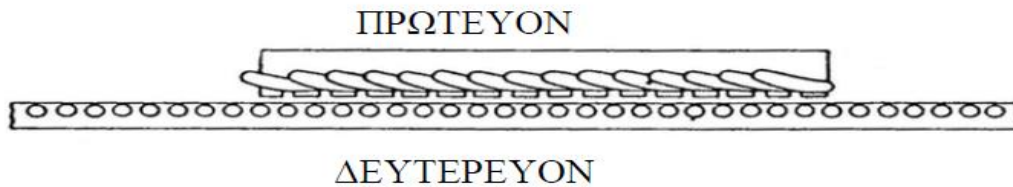
Στο σχήμα 1.3.2.5 παριστάνεται το ανάλογο ενός DC κινητήρα:



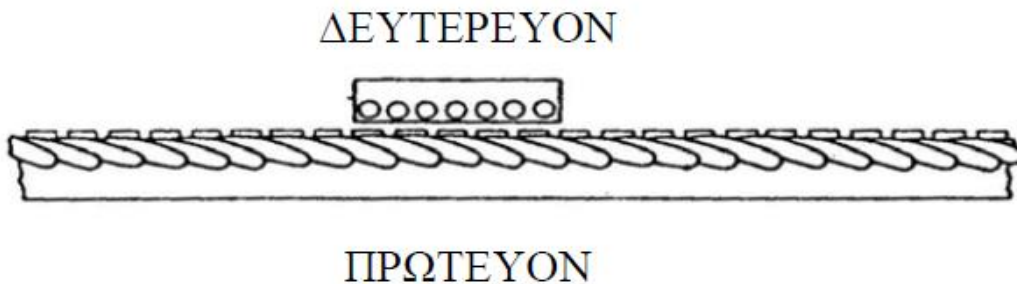
**Σχήμα 1.3.2.5** ανάλογο κινητήρα D.C

Επιπλέον είδη μπορούν να προκύψουν με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του ευθύγραμμου κινητήρα:

## ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΕ ΒΡΑΧΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝ Η ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ:



**Σχήμα 1.3.2.6** ευθύγραμμος κινητήρας με βραχύ πρωτεύον



**Σχήμα 1.3.2.7** ευθύγραμμος κινητήρας με μακρύ πρωτεύον

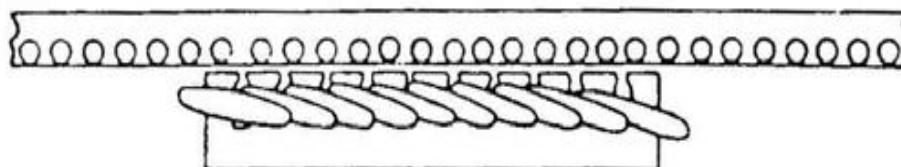


Η επόμενη κατηγοριοποίηση βασίζεται στο μέγεθος του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Συγκεκριμένα ο δρομέας ή ο στάτης μπορεί να είναι βραχύς ή μακρύς. Αυτό εξαρτάται από το που θα χρησιμοποιηθεί ο κινητήρας, τους οικονομικούς περιορισμούς κλπ. Σε πολλές όμως εφαρμογές οι κινητήρες με βραχύ δρομέα είναι καταλληλότεροι.

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ένας ευθύγραμμος κινητήρας επαγωγής έχει για πρωτεύον ένα τριφασικό τυλίγμα σε αύλακες σιδήρου και για δευτερεύον μπορεί να έχει ένα απλό φύλλο αγωγίμου υλικού, όπως αλουμινίου, με πάχος της τάξης των μερικών χιλιοστών. Όταν λοιπόν έχουμε ένα επαγωγικό κινητήρα με βραχύ πρωτεύον γίνεται εξοικονόμηση υλικού κάτι που τον καθιστά πιο οικονομικό εν συγκρίσει με τον αντίστοιχο του με βραχύ δευτερεύον.

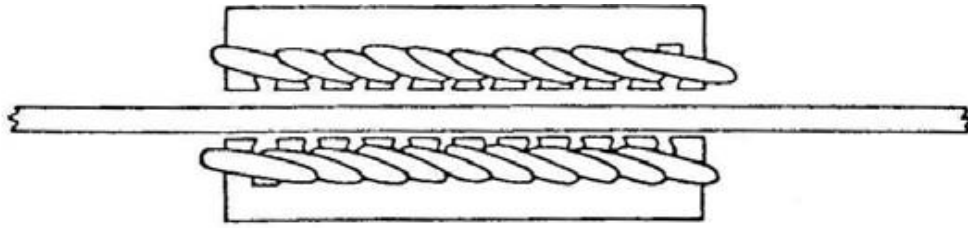
### **ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΠΛΟΥ – ΔΙΠΛΟΥ ΔΙΑΚΕΝΟΥ:**

Η επόμενη μας διαίρεση έχει να κάνει με τον αριθμό όψεων του πρωτεύοντος, που είναι και συνήθως το βραχύ τμήμα του κινητήρα. Υπάρχουν οι κινητήρες με ένα μόνο πρωτεύον και των οποίων το δευτερεύον υποστηρίζεται συνήθως από σίδηρο. Αυτοί ονομάζονται κινητήρες απλού διακένου (σχήμα 1.3.2.7). Αυτοί προκύπτουν αν απλώσουμε τα τυλίγματα του στάτη ενός περιστροφικού κινητήρα και εφαρμόσουμε πάνω του το δρομέα με κατάλληλο διάκενο.



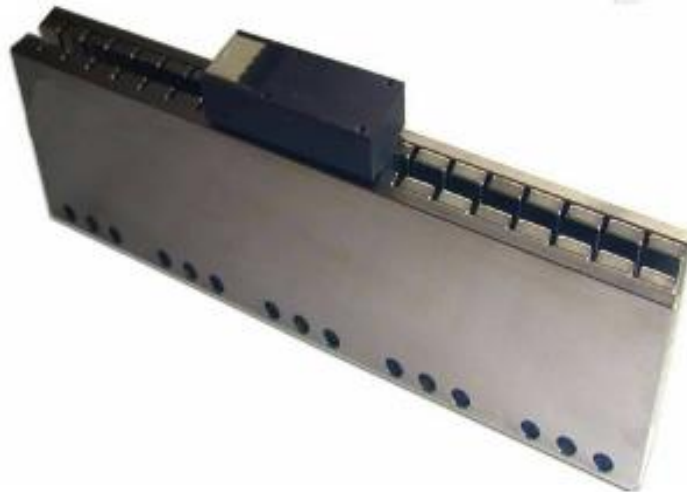
**Σχήμα 1.3.2.7** ευθύγραμμος κινητήρας απλού διακένου

Μπορεί όμως να προστεθεί και ένα δεύτερο πρωτεύον και τότε έχουμε κινητήρες διπλής όψης (double sided U-channel linear motor - σχήμα 1.3.2.8). Έτσι ο πυρήνας (δρομέας) βρίσκεται μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη. Αυτό γίνεται με την εξής διαδικασία. Έχουμε τον ευθύγραμμο κινητήρα απλής όψης και πραγματοποιείται μεταφορά των αγωγών του δρομέα έξω από τις αύλακες του δρομέα. Σχηματίζεται λοιπόν ένα αγωγίμο φύλλο στη θέση των αγωγών και τέλος προστίθεται το δεύτερο πρωτεύον με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ο κινητήρας διπλής όψης.



**Σχήμα 1.3.2.8** ευθύγραμμος κινητήρας διπλού διακένου

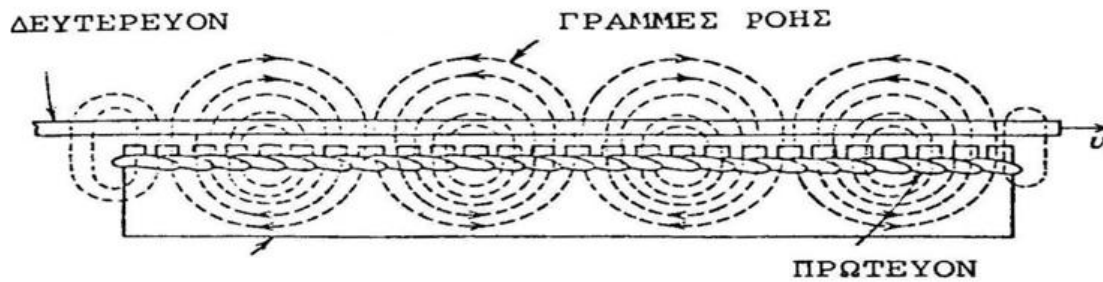
Στους κινητήρες διπλού διακένου ανήκουν οι U-type ευθύγραμμοι κινητήρες. Αυτοί οι ευθύγραμμοι κινητήρες έχουν δύο παράλληλες πλάκες οι αντικριστά η μία στην άλλη με το κινούμενο μέρος να βρίσκεται μεταξύ των δύο αυτών πλακών. Το κινούμενο μέρος δε διαθέτει σίδηρο κάτι που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν ελκτικές δυνάμεις και δυνάμεις που προκαλούν αναταράξεις ενώ επίσης επιτυγχάνονται υψηλές επιταχύνσεις.



**Εικόνα 1.3.2.9** U-type ευθύγραμμος κινητήρας

### **ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ – ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ:**

Μια επόμενη κατηγοριοποίηση αφορά το πώς αναπτύσσεται η μαγνητική ροή στον κινητήρα. Η πρώτη περίπτωση είναι οι δυναμικές γραμμές της μαγνητικής ροής να αναπτύσσονται στη φορά κατά την οποία κινείται ο κινητήρας (σχήμα 1.3.2.10). Ο κινητήρας αυτός ονομάζεται κινητήρας διαμήκους ανάπτυξης μαγνητικής ροής.



**Σχήμα 1.3.2.10** ευθύγραμμος κινητήρας διαμήκους ανάπτυξης μαγνητικής ροής

Σε άλλους κινητήρες όμως, είναι πιθανό να χρειαζόμαστε την ύπαρξη ενός βήματος. Αν θέλουμε να αποφύγουμε τα τον πιθανό κορεσμό, πρέπει το πάχος του σιδήρου που υποστηρίζει το πρωτεύον και το δευτερεύον να είναι αρκετά μεγάλο. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρησιμοποίηση κινητήρα εγκάρσιας ανάπτυξης μαγνητικής ροής. Με αυτό τον τρόπο το πάχος του σιδήρου μειώνεται σημαντικά. Στους κινητήρες αυτούς η μαγνητική ροή ρέει μέσα στο διάκενο όχι κατά τη φορά κίνησης του κινητήρα αλλά κυρίως εγκάρσια.

Τέλος υπάρχουν και κάποιες άλλες κατηγορίες όχι τόσο ευρέως διαδεδομένες που χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις :

### **ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ – ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ:**

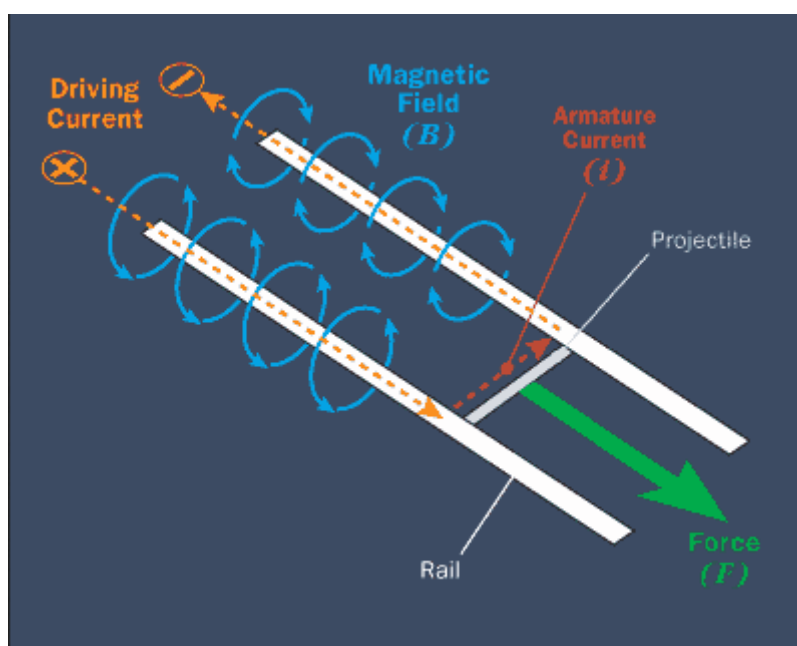
Υπάρχουν πολλά ακόμα είδη ευθύγραμμων κινητήρων που προκύπτουν από τα αντίστοιχα των περιστροφικών. Ένα από αυτά είναι οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης. Ο κινητήρας μαγνητικής αντίστασης (reluctance motor) έχει έκτυπους πόλους στο στάτη και το δρομέα οι οποίοι κατασκευάζονται από ελάσματα σιδήρου μονωμένα μεταξύ τους. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι στο δρομέα δεν υπάρχουν μαγνήτες ούτε τύλιγμα, επομένως ο δρομέας δε φέρει ρεύμα. Ως αποτέλεσμα το κόστος κατασκευής του είναι μικρό, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή. Σε αντίθεση με τους τριφασικούς κινητήρες όλων των τύπων, οι κινητήρες αυτοί εξακολουθούν να λειτουργούν σε περίπτωση διακοπής σε μία ή σε περισσότερες φάσεις.

Ένα άλλο είδος είναι οι κινητήρες μαγνητικής υστέρησης (hysteresis motors). Αυτοί είναι κινητήρες που διαθέτουν τύλιγμα μόνο στο στάτη. Πρόκειται συνήθως για μηχανές μικρής ισχύος. Η λειτουργία τους βασίζεται στην εκμετάλλευση του φαινομένου της υστέρησης στον πυρήνα του δρομέα. Σύμφωνα με αυτή την αρχή όταν ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί σε σίδηρο, τα ατομικά δίπολα ευθυγραμμίζουν τους εαυτούς τους με αυτό. Ακόμα και αν το πεδίο αφαιρεθεί, μέρος της ευθυγράμμισης αυτής θα διατηρηθεί. Το υλικό

λοιπόν έχει μαγνητιστεί. Αφού γίνει αυτό ο μαγνήτης θα μείνει σε αυτή την κατάσταση επ' αόριστο. Για να απομαγνητιστεί, χρειάζεται θερμότητα ή ένα μαγνητικό πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης.

### ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΣ ΟΜΟΠΟΛΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ:

Ο ευθύγραμμος ομοπολικός κινητήρας (linear homopolar motor) πρόκειται για μια ιδιαίτερη περίπτωση κινητήρα. Από κατασκευαστικής άποψης διαφέρει συγκρινόμενος με τα υπόλοιπα είδη ευθύγραμμων κινητήρων όμως καταφέρνει να επιτύχει το ίδιο αποτέλεσμα, δηλαδή την ευθύγραμμη κίνηση.



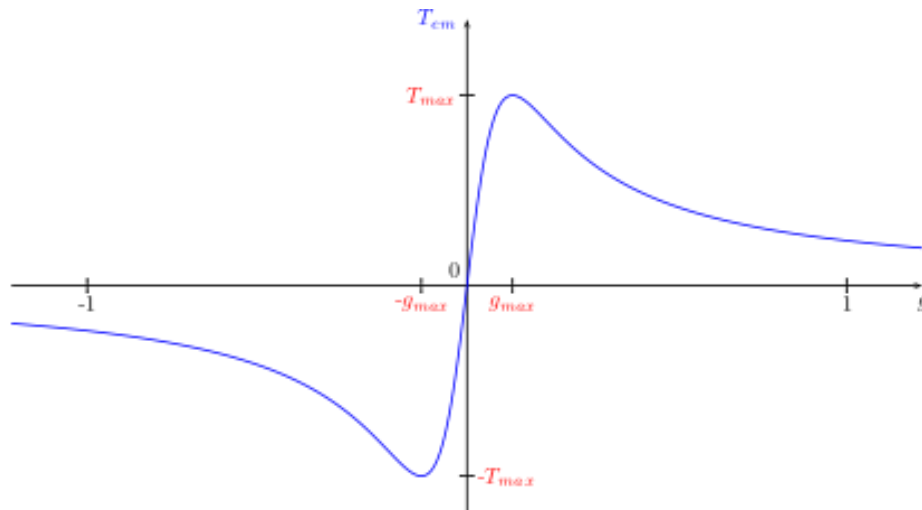
**Σχήμα 1.3.2.11** ευθύγραμμος ομοπολικός κινητήρας

Η αρχή λειτουργίας του είναι αρκετά απλή. Καταρχάς το φορτίο που θέλουμε να προωθηθεί πρέπει να αποτελείται από αγώγιμο υλικό. Το φορτίο αυτό εφαρμόζεται σε δύο επίσης αγώγιμες και παράλληλες ράγες, ενώνοντας τις. Στη συνέχεια, ηλεκτρικό ρεύμα παρέχεται στις ράγες αυτές διερχόμενο ταυτόχρονα και από το αγώγιμο φορτίο. Η φορά του ρεύματος αυτού (driving current) φαίνεται στο σχήμα 1.3.2.11. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μαγνητικού πεδίου (magnetic field B) γύρω από τις ράγες σύμφωνα με το νόμο του Ampere. Έτσι το φορτίο δέχεται δύναμη Laplace της φοράς του σχήματος, που το κινεί προς τα μπροστά.

### 1.3.3 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Σε ένα περιστροφικό κινητήρα αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η ροπή περιστροφής του δρομέα και κατά συνέπεια της περιστρεφόμενης ατράκτου μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας. Στους ευθύγραμμους κινητήρες, λόγω της γραμμικότητας της κίνησης, δεν υπάρχει

ροπή περιστροφής αλλά δύναμη πρόωσης. Η δύναμη αυτή είναι που οδηγεί το δρομέα σε ευθύγραμμη κίνηση και συμβολίζεται με  $T$  (Thrust). Ο υπολογισμός της δύναμης αυτής γίνεται χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των μετασχηματισμών Fourier καθώς και τα στοιχεία της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Στο σχήμα 1.3.3.1 παρουσιάζεται η δύναμη ώθησης συναρτήσει της ολίσθησης για ένα επαγωγικό ευθύγραμμο κινητήρα :



**Σχήμα 1.3.3.1** χαρακτηριστική δύναμης ώθησης  $T$  και ολίσθησης  $s$  για επαγωγικό ευθύγραμμο κινητήρα

Τίθεται όμως και ένα άλλο ερώτημα. Ποιες άλλες δυνάμεις πέρα από αυτή της πρόωσης αναπτύσσονται. Το ερώτημα αυτό είναι εντελώς θεωρητικό για τους περιστροφικούς κινητήρες καθώς η συμμετρία του δρομέα ως προς το στάτη προκαλεί εξισορρόπηση των ακτινικών δυνάμεων και μηδενίζει τις αξονικές. Αποτέλεσμα είναι να μένουν μόνο οι περιφερειακές δυνάμεις και η ροπή περιστροφής. Σε ένα ευθύγραμμο κινητήρα όμως, δεν εξισορροπούνται οι ακτινικές αυτές δυνάμεις. Αντιθέτως λόγω της μη ύπαρξης της ίδιας συμμετρίας γίνονται πλέον παράλληλες. Η συνισταμένη των δυνάμεων αυτών ονομάζεται δύναμη ανάρτησης και συμβολίζεται  $L$  (Lift). Μπορεί να προκύψει είτε θετική οπότε είναι απωστική είτε αρνητική οπότε είναι ελκτική.

Η ελκτική δύναμη εμφανίζεται μεταξύ στάτη και δρομέα ως αποτέλεσμα της ύπαρξης σιδήρου στο πρωτεύον και στο δευτερεύον. Η αιτία ύπαρξης της είναι επειδή σε κάθε μαγνητικό κύκλωμα η μαγνητική ροή στο διάκενο τείνει να αυξηθεί και το διάκενο να ελαττωθεί. Το μέτρο της δύναμης αυτής, ανά μονάδα επιφάνειας, δίνεται από τη σχέση 1:

$$F_{\text{ελκτική}}/m^2 = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot |Hn|^2 \quad (1)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου στο οποίο δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο και  $Hn$  η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής έντασης του πεδίου.

Η απωστική δύναμη μεταξύ δρομέα και στάτη είναι απόρροια του κανόνα του Lenz ο οποίος καθορίζει τη φορά των επαγωγικών ρευμάτων. Στο αγωγίμο τμήμα του δρομέα δημιουργούνται ρεύματα εξ επαγωγής τα οποία έχουν αντίθετη φορά με εκείνα του στάτη. Έτσι η αλληλεπίδραση των ρευμάτων αυτών λόγω του κανόνα του Lenz είναι απωστική. Το μέτρο της δύναμης αυτής, ανά μονάδα επιφάνειας, δίνεται από τη σχέση 2:

$$F_{\text{απωστική}}/m^2 = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot |Ht|^2 \text{ (σχέση 2)}$$

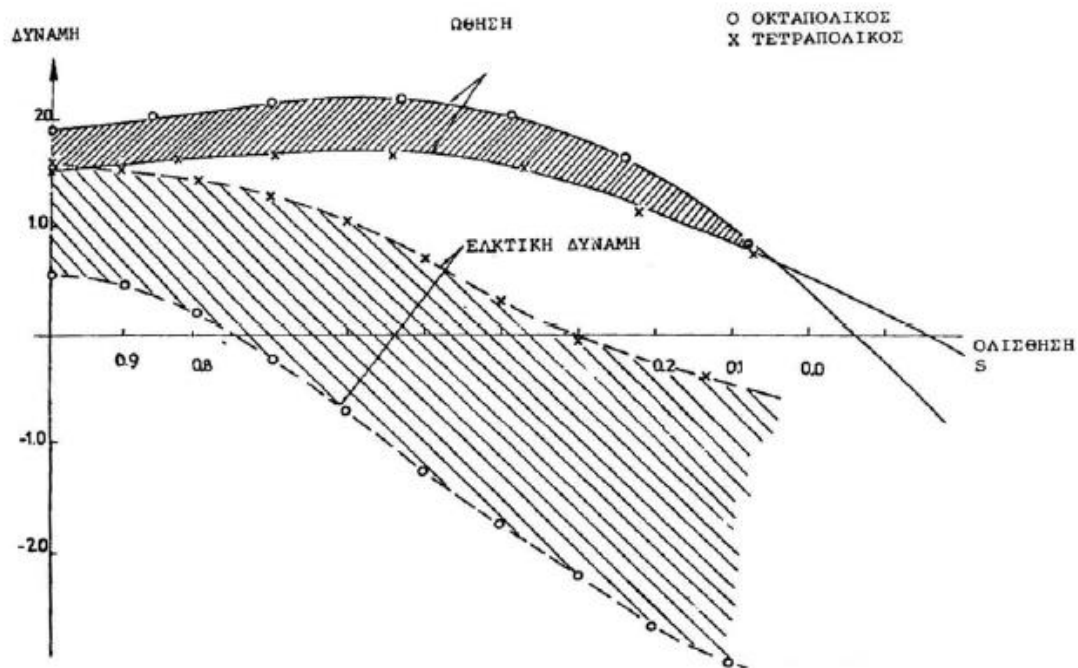
όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου στο οποίο δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο και  $Ht$  η εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής έντασης του πεδίου.

Στην περίπτωση ευθύγραμμων κινητήρων χωρίς υποστήριξη σιδήρου στο δευτερεύον υπερσχύει η απωστική δύναμη. Αντιθέτως, σε κινητήρες χωρίς αγωγούς αλλά με μόνο σίδηρο στο δευτερεύον υπάρχει μόνο ελκτική δύναμη καθώς δεν υπάρχει διαρροή ρεύματος. Στην περίπτωση τώρα που υπάρχει και αγωγίμο δευτερεύον αλλά και υποστήριξη σιδήρου το ποια δύναμη υπερσχύει εξαρτάται από την ολίσθηση καθώς και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα.

Πέρα από τη δύναμη ώθησης, τις ελκτικές – απωστικές δυνάμεις που περιγράψαμε και που αντιστοιχούν στις ακτινικές δυνάμεις ενός περιστροφικού κινητήρα, υπάρχουν και οι εγκάρσιες δυνάμεις που αντιστοιχούν στις αξονικές δυνάμεις του περιστροφικού. Όταν η θέση του στάτη είναι συμμετρική σε σχέση με το δρομέα τότε οι δυνάμεις αυτές είναι μηδέν. Με την κίνηση του δρομέα και την απομάκρυνση του από το κέντρο του στάτη αυτή η συμμετρία παύει να υπάρχει και οι εγκάρσιες δυνάμεις έχουν πλέον αισθητή παρουσία. Όταν η συνισταμένη των δυνάμεων αυτών είναι αρνητική τότε τείνει να επαναφέρει τους άξονες των τυλιγμάτων σε ευθυγράμμιση, κάτι θεμιτό. Όταν όμως είναι θετική, τείνει να αποσταθεροποιήσει το σύστημα οπότε και η χρήση συστήματος οδήγησης είναι επιτακτική.

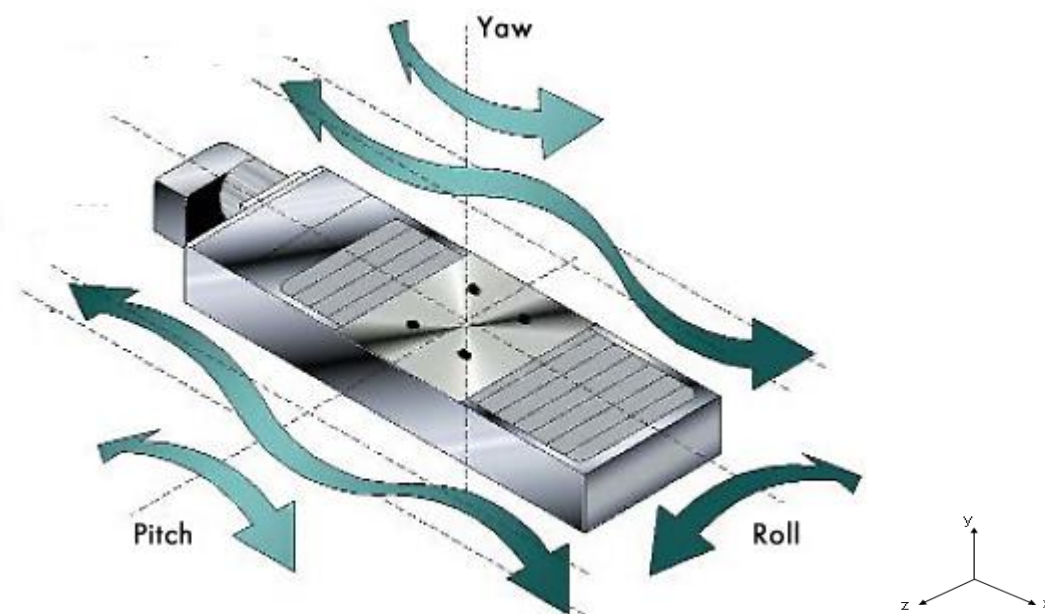
Λόγω της σχετικής κίνησης δρομέα και στάτη όπως αναφέραμε προηγουμένως, εμφανίζονται και τα end effects. Εξαιτίας της ύπαρξης τους υπάρχουν απώλειες στην απόδοση της μηχανής. Όταν το δευτερεύον είναι βραχύ, η συμπεριφορά του ευθύγραμμο κινητήρα είναι σχεδόν ίδια με εκείνη ενός περιστροφικού κινητήρα τουλάχιστον διπολικού. Αντιθέτως, με βραχύ πρωτεύον μείωση στη δύναμη ώθησης συμβαίνει σε χαμηλές τιμές ολίσθησης (μικρότερες του 0.3).

Στο σχήμα 1.3.3.2 φαίνεται η ποσοτική συνάρτηση της δύναμης ώθησης  $T$  καθώς και της κάθετης δύναμης συναρτήσει της ολίσθησης για ένα ευθύγραμμο επαγωγικό τετραπολικό καθώς και οκταπολικό κινητήρα της ίδιας σύγχρονης ταχύτητας:



**Σχήμα 1.3.3.2** χαρακτηριστικές ελκτικών δυνάμεων και δυνάμεων ώθησης ως προς ολίσθηση για οκταπολικό και τετραπολικό κινητήρα

Εκτός από τις προ αναφέρουσες δυνάμεις, εμφανίζονται και τρεις ροπές περιστροφής περί τους κύριους άξονες. Το σχήμα 1.3.3.3 παρουσιάζει αυτές τις ροπές που ονομάζονται Roll, Pitch, Yaw :



**Σχήμα 1.3.3.3** ροπές Roll, Pitch, Yaw

Roll είναι η περιστροφή γύρω από τον άξονα x, Yaw είναι η περιστροφή γύρω από τον άξονα y και Pitch γύρω από τον άξονα z. Οι τιμές των ροπών αυτών μπορούν να βρεθούν με τη χρήση χωρικών μετασχηματισμών Fourier.

### 1.3.4 ΥΛΙΚΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Στους ευθύγραμμους κινητήρες το αγώγιμο στρώμα του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αποτελείται συνήθως τα εξής υλικά:

- Αλουμίνιο (Al) , με τιμή αγωγιμότητας  $\sigma = 3,6 \cdot 10^7$  S/m όπου  $1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$  και τιμή σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_r = 1$
- Χαλκός (Cu) , με τιμή αγωγιμότητας  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  S/m όπου  $1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$  και τιμή σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_r = 1$
- Σίδηρος (Fe – είτε χάλυβας είτε φύλλα μαλακού σιδήρου) , με τιμή αγωγιμότητας  $\sigma = 10^6$  S/m όπου  $1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$  και τιμή σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_r \approx 100 - 1000$  για το χάλυβα

Έχουμε αναφέρει ήδη πως μπορεί να υπάρχει επιπλέον υποστήριξη σιδήρου ενώ σε κάποιες εφαρμογές για το ρόλο του δευτερεύοντος χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά όπως:

- Μεταλλικό υγρό NaK με τιμή αγωγιμότητας  $\sigma = 2,46 \cdot 10^6$  S/m και που χρησιμοποιείται στις αντλίες υγρών μετάλλων (22% Na, 78% K)
- Θαλασσινό νερό με μέση αγωγιμότητα της τάξης των 5 S/m όπως αναφέραμε στους ευθύγραμμους επαγωγικούς κινητήρες, με την πρόωση όμως να παρουσιάζει προβλήματα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι επίπεδες αντλίες ρευστού μετάλλου, όπου το δευτερεύον δεν είναι ένα επίπεδο αγώγιμο φύλλο αλλά ένα επίπεδο στρώμα ρευστού μετάλλου, όπως επίσης και οι ευθύγραμμες επαγωγικές υδροδυναμικές γεννήτριες όπου το δευτερεύον είναι τα καυσαέρια μιας καύσης (συνήθως στερεών καυσίμων) εμπλουτισμένα με κατάλληλες ουσίες ώστε να γίνουν αγώγιμα.

## 1.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ:

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει ένας ευθύγραμμος και ένας περιστροφικός κινητήρας παρουσιάζουν πολλά κοινά σημεία. Υπακούνε στους ίδιους κανόνες ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενώ ο ευθύγραμμος μπορεί να προκύψει ως το ανάπτυγμα ενός περιστροφικού. Και οι δύο διαθέτουν ένα κινούμενο μέρος , το



δρομέα, ένα ακλόνητο μέρος, το στάτη, ενώ μεταξύ τους υπάρχει διάκενο. Υπάρχουν ακόμα πολλά ίδια είδη τόσο ευθύγραμμων όσο και περιστροφικών κινητήρων (όπως σύγχρονοι, επαγωγής κλπ.). Παρόλες όμως τις ομοιότητες που μπορεί να έχουν, οι διαφορές τους είναι ουσιώδεις καθιστώντας τους κάτι εντελώς διαφορετικά και επιτάσσοντας ένα διαφορετικό τρόπο για τη μελέτη τους. Η διαφορετικότητα τους αυτή εξάλλου έχει ουσιαστικό ρόλο για τη χρησιμοποίησή τους και σε διαφορετικές εφαρμογές αναλόγως με το τι εξυπηρετεί καλύτερα την εκάστοτε περίπτωση.

Η πρώτη μεγάλη διαφορά μεταξύ ευθύγραμμων και περιστροφικών κινητήρων έχει να κάνει ως προς το είδος κίνησης που παράγουν. Οι περιστροφικοί κινητήρες προκαλούν περιστροφική κίνηση. Ο δρομέας λοιπόν είναι τυλιγμένος ως προς το στάτη, η περιστροφική κίνηση του οποίου μεταδίδεται σε μία κινούμενη άτρακτο προκαλώντας τελικά την επιθυμητή κίνηση. Στον ευθύγραμμο κινητήρα όμως σκοπός είναι η γραμμική κίνηση. Η κατασκευή λοιπόν του ίδιου του κινητήρα είναι επίπεδη. Ο δρομέας είναι παράλληλος προς το στάτη με διάκενο ανάμεσα τους (μονό ή διπλό) που συνήθως είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του περιστροφικού. Λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου οι δυνάμεις που ασκούνται στο δρομέα τον αναγκάζουν να κινηθεί γραμμικά ως προς το στάτη, ολισθαίνοντας πάνω σε μία ράγα χωρίς να τον ακουμπάει. Αυτό επιτρέπει και την απευθείας σύνδεση του φορτίου στο δρομέα. Η διαφορά μεταξύ γραμμικής και περιστροφικής κίνησης μπορεί να γίνει άμεσα φανερή με την παράθεση των βασικών μεγεθών. Συγκεκριμένα στον περιστροφικό κινητήρα μας ενδιαφέρει η ροπή που προκαλεί την περιστροφή, η θέση που περιγράφεται με τη μέτρηση της γωνίας και η ταχύτητα που μετριέται σε στροφές ανά λεπτό. Από την άλλη πλευρά τώρα, στον ευθύγραμμο κινητήρα μας ενδιαφέρει η δύναμη που προκαλεί τη γραμμική κίνηση, η θέση που μετριέται σε απόσταση του δρομέα από την αρχική του και η ταχύτητα που μετριέται σαν μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Η θέση του δρομέα συχνά ελέγχεται μέσω ενός γραμμικού οπτικού κωδικοποιητή θέσης ενώ όταν τροφοδοτείται, είναι συνδεδεμένος με κατάλληλο καλώδιο το οποίο κινείται μαζί του. Έτσι επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες (της τάξης των 5 m/s) που θα μπορούσαν να είναι ακόμα μεγαλύτερες αν δεν υπήρχε το πρόβλημα της αντοχής των υλικών.

Η ύπαρξη μεγαλύτερου διακένου όπως είναι φυσικό μειώνει την απόδοση. Όμως οι ευθύγραμμοι κινητήρες υπερτερούν στο κομμάτι της ακρίβειας σε εφαρμογές που χρειάζεται γραμμική κίνηση. Οι περιστροφικοί για να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιες περιπτώσεις χρειάζονται σύστημα μετατροπής της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική. Αντιθέτως αυτό δε χρειάζεται στην περίπτωση των ευθύγραμμων, καθιστώντας τους αθόρυβους και περισσότερο ακριβείς. Βέβαια οι γραμμικοί κινητήρες έχουν αρχή και τέλος, ανάλογα με το μέγεθος τους, σε αντίθεση με τους περιστροφικούς που μπορούν να προκαλούν συνεχή περιστροφή.

Πέρα των όσων αναφέραμε υπάρχουν και άλλες διαφορές μεταξύ τους. Για να τις εντοπίσουμε θεωρούμε ένα περιστροφικό κινητήρα και ένα ευθύγραμμο κινητήρα ως ανάπτυγμα του πρώτου με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά δηλαδή διάκενο, πολικό βήμα, τυλίγματα κλπ.

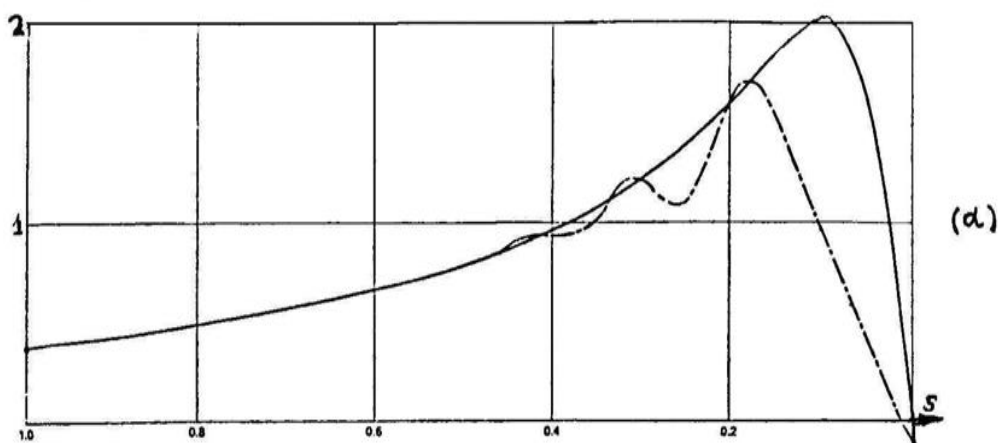
Η πρώτη διαφορά έγκειται στις διαφορετικές καμπυλότητες και τα φαινόμενα που αυτό συνεπάγεται. Στον ευθύγραμμο κινητήρα η καμπυλότητα

είναι μηδενική σε αντίθεση με τον περιστροφικό. Έτσι στην πρώτη περίπτωση η ανάλυση γίνεται χρησιμοποιώντας σειρές Fourier ενώ στη δεύτερη σειρές Bessel. Οι συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει η διαφορετική καμπυλότητα είναι ανεπαίσθητες λόγω του μικρού διακένου συγκρινόμενο με τη διάμετρο δρομέα και στάτη.

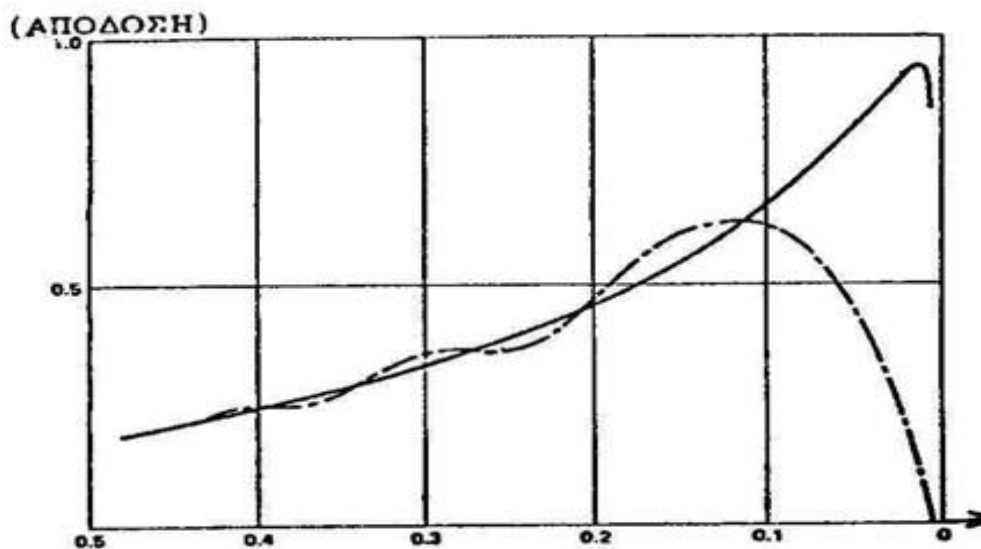
Η πεπερασμένη όμως δυνατότητας κίνησης ενός ευθύγραμμου επίπεδου κινητήρα παρουσιάζει και κάτι διαφορετικό επιπλέον. Αυτό είναι τα φαινόμενα που συμβαίνουν λόγω της ύπαρξης άκρων από ηλεκτρομαγνητική άποψη και δεν εμφανίζονται στους περιστροφικούς κινητήρες. Συγκεκριμένα υπάρχει άνιση κατανομή της μαγνητικής ροής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το η κίνηση του δρομέα έχει ως αποτέλεσμα να αφήνεται πίσω του μαγνητική ροή που συσσωρεύεται στο πίσω μέρος της μηχανής. Δημιουργείται λοιπόν άνιση κατανομή της μέσης πυκνότητας μαγνητικής ροής. Τα φαινόμενα αυτά που έχουν να κάνουν με τα άκρα του ευθύγραμμου κινητήρα ονομάζονται End Effects. Στους περιστροφικούς η πυκνότητα της μαγνητικής ροής είναι σταθερή δημιουργώντας μια διαφοροποίηση η οποία δε μπορεί να αμεληθεί. Οι επιδράσεις των φαινομένων αυτών στη λειτουργία των ευθύγραμμων κινητήρων τους καθιστά χειρότερους από άποψη ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς σε σύγκριση με τους περιστροφικούς.

Η συμπεριφορά του ευθύγραμμου κινητήρα είναι χειρότερη τόσο ως προς τη δύναμη ώθησης σε σύγκριση με την ροπή περιστροφής, τόσο ως προς την απόδοση αλλά όσο και προς τον συντελεστή ισχύος. Με την εύρεση τρόπων εξουδετέρωσης φαινομένων όπως τα End Effects είναι σίγουρο πως όλοι αυτοί οι παράμετροι θα μπορούσαν να είναι ανταγωνιστικοί συγκρινόμενοι με τους αντίστοιχους ενός περιστροφικού κινητήρα.

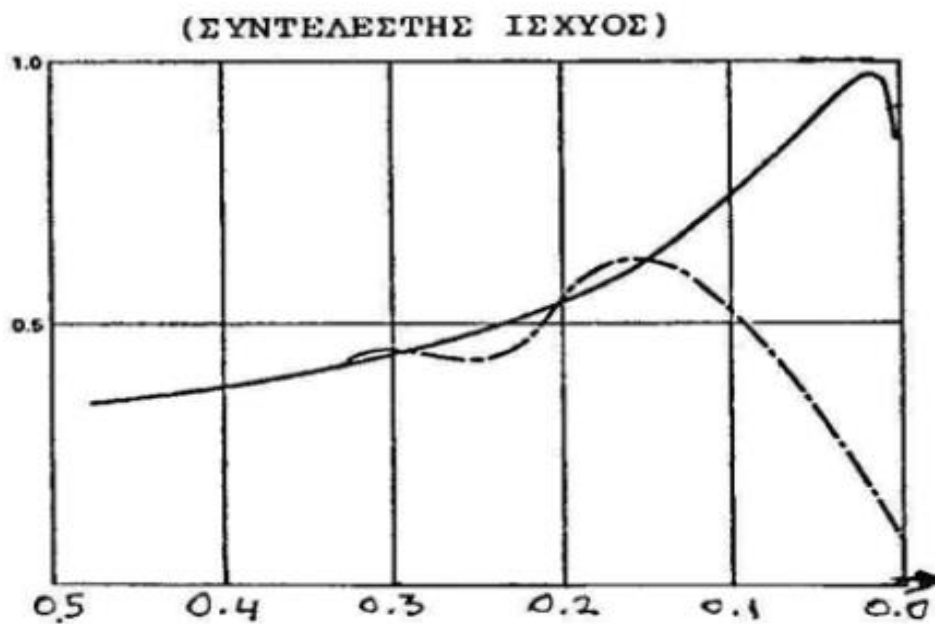
Για να κατανοήσουμε τα όσα αναφέραμε θα παραθέσουμε τρεις χαρακτηριστικές δύο κινητήρων επαγωγής, οκταπολικούς, για συχνότητα 50 Hz ο ένας ευθύγραμμος και ο άλλος περιστροφικός ( με διακεκομμένη γραμμή είναι ο ευθύγραμμος ενώ με συνεχή είναι ο περιστροφικός):



**Σχήμα 1.4.1** χαρακτηριστική δύναμης ώθησης και ολίσθησης



**Σχήμα 1.4.2** χαρακτηριστική απόδοσης και ολίσθησης



**Σχήμα 1.4.3** χαρακτηριστική συντελεστή ισχύος και ολίσθησης

Τη λειτουργική συμπεριφορά μιας μηχανής μπορούμε να διαπιστώσουμε με τον υπολογισμό ενός αριθμού ο οποίος λέγεται μαγνητικός αριθμός Reynolds. Για να είναι ικανοποιητική συμπεριφορά αυτή πρέπει ο αριθμός Reynolds να είναι τουλάχιστον 20. Αυτός υπολογίζεται από την εξής σχέση :

$$G = \frac{\sigma \cdot \mu_0 \cdot v_s^2}{\omega} \cdot \frac{d}{d + g}$$

όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,  $d$  το πάχος του δευτερεύοντος,  $\sigma$  η αγωγιμότητα του δευτερεύοντος,  $g$  το διάκενο,  $v_s$  η σύγχρονη ταχύτητα και  $\omega$  η κυκλική συχνότητα διέγερσης.

## 1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ:

### ➤ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέραμε πως οι ευθύγραμμοι κινητήρες παρουσιάζουν χειρότερη ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά σε σύγκριση με τους περιστροφικούς λόγω διαφόρων φαινομένων όπως τα End Effects. Παρόλα αυτά όμως διαθέτουν κάποια χαρακτηριστικά τα οποία τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές όπου απαιτείται γραμμική κίνηση.

Καταρχάς διαθέτουν μια απλή δομή. Όπως είδαμε αποτέλεσμα της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς είναι η απευθείας εμφάνιση γραμμικής κίνησης στο δρομέα. Δεν χρειάζονται λοιπόν μηχανισμοί μετατροπής της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική (όπως ball screws, κιβώτιο ταχυτήτων κλπ.). Αυτό απλοποιεί τη μηχανή ελατώνοντας παράλληλα και το βάρος της. Επιπλέον η άμεση εφαρμογή του φορτίου στο δρομέα επιτρέπει ώστε ένα μεγαλύτερο μέρος ενέργειας να προσδίδεται σε αυτό περιορίζοντας τις απώλειες.

Ως συνέπεια του προηγούμενου είναι και η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων. Η απουσία μηχανισμών μετατροπής της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική έχει ως αποτέλεσμα την μείωση ανάπτυξης θερμότητας και τριβών. Έτσι υπάρχει δυνατότητα για ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων με τους μόνους παράγοντες που τις περιορίζει να είναι η ταχύτητα απόκρισης των ηλεκτρονικών ελέγχου και η τάση του δικτύου. Τυπικές ταχύτητες είναι τα 3 m/s και κάποιες φορές και πάνω από 5 m/s.

Κάτι ακόμα που χαρακτηρίζει τους ευθύγραμμους κινητήρες είναι η υψηλή ακρίβεια. Η θέση τους μπορεί να προσδιοριστεί με απόλυτη ακρίβεια χρησιμοποιώντας συστήματα ανατροφοδότησης (feedback) ελέγχοντας επακριβώς τη θέση τους.

Στους ευθύγραμμους κινητήρες η απόκριση είναι γρήγορη. Ο ρυθμός απόκρισης ενός συστήματος ευθύγραμμου κινητήρα μπορεί να είναι ακόμα και

εκατό φορές μεγαλύτερο από ένα μηχανικό σύστημα μετάδοσης κίνησης κάτι που σημαίνει και μεγαλύτερες επιταχύνσεις.

Το διάκενο εμποδίζει την απευθείας επαφή δρομέα και στάτη. Έτσι οι τριβές περιορίζονται προσδίδοντας μεγαλύτερη ακρίβεια, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής με λιγότερες φθορές και συντηρήσεις. Το ότι δε διαθέτουν συνδεδεμένα εξαρτημένα μέρη επιτρέπει ώστε η συντήρηση και η επισκευή να είναι ανεξάρτητη. Επιπλέον οι ευθύγραμμοι κινητήρες έχουν το πλεονέκτημα της χρήσης σε εξωτερικούς και ακάθαρτους χώρους επειδή δα δύο μισά δεν ακουμπάνε μεταξύ τους επιτρέποντας έτσι στα πηνία να μονωθούν και να προστατευτούν έναντι του νερού, της υγρασίας και της διάβρωσής και αυξάνοντας το προσδόκιμο χρόνο παροχής υπηρεσιών.

Κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα είναι η ακαμψία και οι μηδενικοί κραδασμοί. Η έλλειψη μηχανικών συνδέσμων επιτρέπει τον περιορισμό των αναταράξεων που όμως σε περιπτώσεις διόρθωσης της πορείας είναι αναπόφευκτοι. Επιπλέον και ο θόρυβος περιορίζεται λόγω έλλειψης επιφανειών που η μία να ολισθαίνει στην άλλη.

## ➤ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες πέρα από τα πλεονεκτήματα τα οποία αναφέραμε παρουσιάζουν και σημαντικά μειονεκτήματα. Έτσι η χρήση τους δεν είναι κατάλληλη για όλες τις εφαρμογές που απαιτούν γραμμική κίνηση και η επιλογή γίνεται με την εξέταση βασικών παραμέτρων όπως το κόστος και η απόδοση.

Καταρχάς σημειώνουμε ότι η ανάπτυξη και χρήση ευθύγραμμων κινητήρων είναι μια ακριβή διαδικασία. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό όγκο προϊόντων που παράγονται και στη χρήση υλικών που σε πολλές περιπτώσεις ανεβάζουν την τιμή. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του κινητήρα με μακρύ πρωτεύοντος όπου απαιτείται μεγάλη ποσότητα υλικού ώστε να αναπτυχθεί σε όλο το μήκος της διαδρομής. Ωστόσο, όσο η δημοτικότητα των ευθύγραμμων κινητήρων μεγαλώνει και ο όγκος των προϊόντων αυξάνει είναι σίγουρο πως και το κόστος θα μειωθεί.

Η οδήγηση και ο έλεγχος είναι κάτι το οποίο είναι σημαντικό για ένα ευθύγραμμο κινητήρα. Θέλουμε να εξασφαλίσουμε την ακρίβεια ενώ επίσης και το γεγονός ότι ένας τέτοιος κινητήρας δεν μπορεί να κινηθεί σε απεριόριστο μήκος μας επιτάσσει την ύπαρξη οδήγησης και ελέγχου. Όμως το γεγονός ότι δεν υπάρχουν μηχανικά μέρη μεταξύ κινητήρα και φορτίου καθώς η κίνηση που παράγεται είναι απευθείας ευθύγραμμη, σημαίνει πως χρειαζόμαστε συστήματα οδήγησης και ελέγχου (όπως σέρβο) υψηλών απαιτήσεων και πολυπλοκότητας ώστε να πετύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Ένα στοιχείο στο οποίο υστερούν οι ευθύγραμμοι κινητήρες είναι η δύναμη ανά μονάδα φορτίου. Έχουμε αναφέρει πως η συμπεριφορά τους είναι χειρότερη από αυτή των περιστροφικών κινητήρων ως προς τη δύναμη ώθησης, την απόδοση και το συντελεστή ισχύος. Επιπλέον υπάρχουν και τα

φαινόμενα των άκρων και το φαινόμενο της οδόντωσης τα οποία έχουν δυσμενείς επιδράσεις στην απόδοση των ευθύγραμμων κινητήρων.

Οι μεγάλες θερμικές απώλειες είναι κάτι στο οποίο πρέπει να σταθούμε. Στις περισσότερες εφαρμογές ευθύγραμμων κινητήρων, το φορτίο είναι απευθείας συνδεδεμένο στο δρομέα. Έτσι οι μεγάλο μέρος των απωλειών με τη μορφή θερμότητας μεταδίδονται απευθείας στο φορτίο. Αν η εφαρμογή είναι ευαίσθητη στη θερμότητα, απαιτούνται συστήματα ψύξης και διαχείρισης θερμοκρασίας όπως αισθητήρες. Μέθοδοι ψύξης με αέρα ή νερό είναι οι πιο διαδεδομένες.

Τέλος η ελάχιστη τριβή μπορεί να μην ακούγεται σαν πρόβλημα αλλά μπορεί να γίνει σε κάποιες περιπτώσεις. Για παράδειγμα ένας ευθύγραμμος κινητήρας κινεί ένα φορτίο και κάποια χρονική στιγμή χάνεται η παροχή τάσης προς αυτόν. Αν δεν υπάρχει αντίσταση στο σύστημα θα πάρει μεγάλο χρονικό διάστημα πριν το φορτίο φτάσει στο τέλος της διαδρομής και σταματήσει. Επομένως, η ελάχιστη τριβή δυσκολεύει την πέδηση και τον έλεγχο της ταχύτητας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>:**

# **ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ:**

Στις σύγχρονες εφαρμογές πρόωσης χρησιμοποιούνται κατά κανόνα δύο είδη ευθύγραμμων κινητήρων. Ο σύγχρονος ευθύγραμμος κινητήρας με βραχύ δρομέα και ο ευθύγραμμος κινητήρας επαγωγής με βραχύ στάτη. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε σε περισσότερο βάθος τη λειτουργία του σύγχρονου ευθύγραμμου κινητήρα με την παράθεση των εξισώσεων, των ισοδύναμων διαγραμμάτων και των χαρακτηριστικών διαγραμμάτων ώστε να έχουμε πλήρη εικόνα για τη λειτουργία και τα μεγέθη ενός σύγχρονου ευθύγραμμου κινητήρα.

Όπως είχαμε αναφέρει και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην παράγραφο όπου περιγράψαμε τις κατηγορίες των ευθύγραμμων κινητήρων, υπάρχουν δύο σύγχρονων ευθύγραμμων κινητήρων. Αυτοί με υποστήριξη σιδήρου (συμβατικοί) και εκείνοι χωρίς σίδηρο (αέρα). Οι κινητήρες με υποστήριξη σιδήρου μπορούν να διαθέτουν είτε βραχύ πρωτεύον είτε βραχύ δευτερεύον όμως πιο συχνά συναντάμε αυτούς με βραχύ δευτερεύον. Οι κινητήρες αέρος τώρα, που δεν έχουν υποστήριξη σιδήρου, κατασκευάζονται με χρήση υπεραγώγιμων μαγνητών. Έτσι κατασκευάζονται με βραχύ δευτερεύον ώστε να μειωθεί ο αριθμός των υπεραγώγιμων μαγνητών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν και συνεπώς να μειωθεί και το κόστος κατασκευής τους.

Στο παρών κεφάλαιο θα μελετήσουμε και τα δύο είδη σύγχρονων ευθύγραμμων κινητήρων δηλαδή και τους συμβατικούς και τους αέρος αλλά μόνο στην περίπτωση του βραχέως δευτερεύοντος.

Έστω λοιπόν ένας σύγχρονος ευθύγραμμος κινητήρας. Το πρωτεύον του διαθέτει ένα μακρύ τριφασικό τύλιγμα και το οποίο δεν τροφοδοτείται συνεχώς αλλά τμηματικά δηλαδή ένα τμήμα τροφοδοτείται μόνο όταν περάσει

πάνω αυτό το δευτερεύον. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση των ωμικών και άεργων απωλειών του συστήματος.

Η πυκνότητα ρεύματος του ισοδύναμου φύλλου ρεύματος του πρωτεύοντος είναι:

$$\text{Real}(\sqrt{2} \cdot \overset{0}{I}_{y,1}(x) \cdot e^{j \cdot \omega t})$$

όπου:

$$\overset{0}{I}_{y,1}(x) = \sqrt{2} \cdot I \cdot e^{-j \cdot \kappa \cdot x} \quad I = 3 \cdot N \cdot K_w \cdot I_\Phi / (\pi \cdot \tau)$$

με  $K_w$  το συντελεστή τυλίγματος,  $N$  τον αριθμό αγωγών της μίας φάσης και  $\kappa = \pi/\tau$  με  $\tau$  το πολικό βήμα.

Αυτό που παρατηρούμε είναι πως η γραμμική πυκνότητα ρεύματος είναι ένα αρμονικό κύμα με κυματάρημο  $\kappa$ . Οι υπόλοιπες χωρικές αρμονικές, από τις οποίες η πέμπτη και η έβδομη είναι οι ισχυρότερες, εξουδετερώνονται λόγω του διπλού τυλίγματος τα οποία απέχουν  $\tau/5$  ή  $\tau/6$ . Έτσι συνήθως είναι :

$$K_w = \cos(\pi/10) \quad \dot{\eta} \quad \cos(\pi/12)$$

Προκύπτει ότι στο πεδίο Fourier η ισοδύναμη τάση του πρωτεύοντος θα είναι:

$$V_1(\alpha) = \sqrt{2} \cdot I \cdot (-\kappa) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \delta(\alpha + \kappa)$$

με συχνότητα  $\omega$ . Πρόκειται για ένα αρμονικό κύμα το οποίο οδεύει πάνω στη διεύθυνση  $x$  με σύγχρονη ταχύτητα  $u_s = \omega/\kappa$ .

Πραγματοποιώντας δισδιάστατη ανάλυση, παρατηρούμε πως το τύλιγμα του δευτερεύοντος αποτελείται από  $2n$  αγωγούς σε σειρά. Από αυτούς οι μισοί διαρρέονται από ρεύμα  $I_0$  και οι άλλοι μισοί από ρεύμα  $-I_0$ , δηλαδή αντίθετης φοράς.  $L$  είναι το πλάτος των αγωγών δευτερεύοντος και πρωτεύοντος ενώ η μέση απόσταση των αγωγών της μίας φοράς με τους αντίστοιχους της άλλης είναι  $\tau$  δηλαδή ίση με το πολικό βήμα. Έτσι η πυκνότητα ρεύματος είναι ένα στατικό κύμα που μετασχηματισμένη στο χώρο Fourier δίνεται από τη σχέση :

$$\overset{0}{I}_{y,2}(\alpha) = I_0 \cdot \sum_{m=1}^n e^{-j \cdot x_m \cdot \alpha} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\alpha \cdot \delta}{2}\right)}{\frac{\alpha \cdot \delta}{2}} \cdot 2 \cdot j \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \tau}{2}\right)$$



με  $\delta$  το πάχος του ισοδύναμου φύλλου ρεύματος του εκάστου αγωγού του δευτερεύοντος και  $\chi m$  η απόσταση του  $m$ -οστού πλαισίου από το μέσο του τυλίγματος.

Η ισοδύναμη τάση προκύπτει:

$$\overset{0}{V}_2(\alpha) = \alpha \cdot \overset{0}{I}_{y,2}(\alpha)$$

Το κύμα αυτό κινείται στη διεύθυνση  $\chi$  με ταχύτητα  $u$  και συχνότητα  $\omega' = -\alpha u$ .

Υπάρχουν λοιπόν δύο αλληλοεπιδρώντα κύματα σε σχέση με το ακίνητο πρωτεύον. Το ένα έχει συχνότητα  $\omega$  και το άλλο  $\omega'$ . Για να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα πρέπει  $\omega = \omega'$

Ο κυματάρριθμος του πρώτου κύματος είναι  $\alpha = -\kappa$ . Άρα θα πρέπει:

$\omega = \omega' = -\alpha u = -(-\kappa)u = \kappa u$  από όπου και προκύπτει ότι  $u = \omega/\kappa$  δηλαδή ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα  $u_s$ . Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το δευτερεύον πρέπει να κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Παρά την ίδια τους συχνότητα και ταχύτητα τα δύο κύματα παρουσιάζουν μια διαφορά φάσης  $\varphi$ . Άρα αν η τάση του πρωτεύοντος είναι:

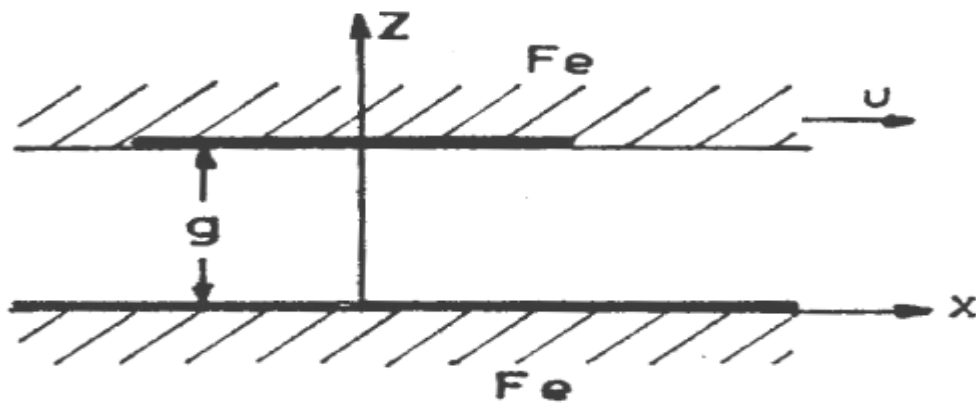
$$\overset{0}{V}_1(-\kappa) = \sqrt{2} \cdot I \cdot (-\kappa) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \delta(\alpha + \kappa)$$

Λόγω της διαφοράς φάσης αυτής η τάση του δευτερεύοντος θα είναι :

$$\overset{0}{V}_2(-\kappa) = \left| \overset{0}{V}_2(-\kappa) \right| \cdot e^{j\varphi} = V_2 \cdot \cos\varphi + j \cdot V_2 \cdot \sin\varphi$$

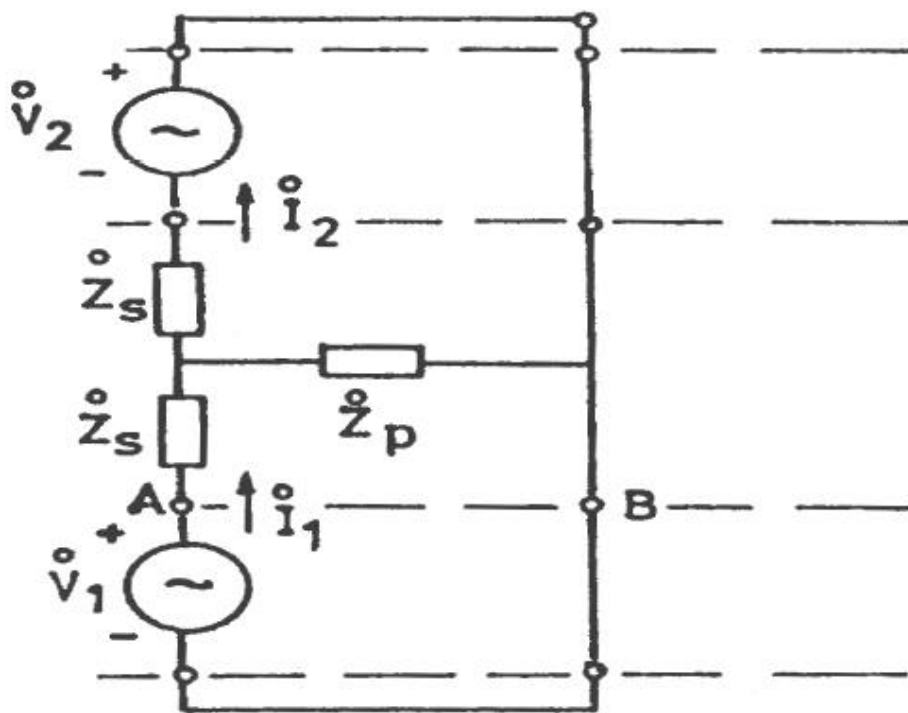
## 2.2 ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΙΔΗΡΟΥ:

Το ισοδύναμο κύκλωμα για ένα σύγχρονο ευθύγραμμο κινητήρα με υποστήριξη σιδήρου είναι:



**Σχήμα 2.2.1** κύκλωμα Σ.Ε.Κ με υποστήριξη σιδήρου

από όπου και προκύπτει:



**Σχήμα 2.2.2** ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Ε.Κ με υποστήριξη σιδήρου

Οι  $Z_s$  και  $Z_p$  είναι οι αντιστάσεις κατά Fourier του ισοδύναμου τετράπολου του διάκενου αέρος το οποίο έχει πάχος  $g$ . Επίσης αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι ο κυματάριθος  $\alpha = -\kappa$ . Προκύπτει:

$$Z_s = \frac{\kappa}{j \cdot \mu_0} \cdot \tanh\left(\frac{\kappa \cdot g}{2}\right) \quad Z_p = \frac{\kappa}{j \cdot \mu_0} \cdot \frac{1}{\sinh(\kappa \cdot g)}$$

Με δεδομένο τις τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος όπως τις περιγράψαμε προηγουμένως, δηλαδή:

$$\overset{\circ}{V}_1 = \sqrt{2} \cdot I \cdot \kappa \cdot 2 \cdot \pi \cdot \delta(\alpha + \kappa)$$

$$\overset{\circ}{V}_2 = \left| \overset{\circ}{V}_2(-\kappa) \right| \cdot e^{j\phi}$$

μπορούμε να αποδείξουμε ότι μετά την επίλυση του κυκλώματος πως το ρεύμα του πρωτεύοντος (που στο ισοδύναμο διάγραμμα το πάνω του επίπεδο είναι το AB) είναι:

$$\overset{\circ}{I}_1 = \frac{1}{Z_A} \cdot \left[ \frac{\overset{\circ}{V}_1}{\tanh(\kappa \cdot g)} + \frac{\overset{\circ}{V}_2}{\tanh(\kappa \cdot g)} \right]$$

όπου :

$$Z_A = \frac{\kappa}{j \cdot \mu_o}$$

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τους τύπους και έπειτα θα προβούμε στον υπολογισμό κάποιων βασικών μεγεθών:

- **Δύναμη ώθησης ανά m πλάτος:**

$$T = -\frac{1}{2} \cdot \text{Real} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overset{\circ}{V}_{AB}(\alpha) \cdot \overset{\circ}{I}_{AB}(\alpha)}{\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

Επομένως αντικαθιστώντας στον παραπάνω τύπο την τιμή τάσης και ρεύματος του πρωτεύοντος και όπου α το  $-\kappa$  έχουμε:

$$T = -\frac{1}{2} \text{Real} \left[ \frac{j \cdot \mu_o}{\kappa^2} \cdot \frac{\overset{\circ}{V}_2 \cdot V_1}{\sinh(\kappa \cdot g)} \right]$$

Όπου :

$$V_1 = \sqrt{2} \cdot I \cdot \kappa \quad I = \frac{3 \cdot N \cdot K_w \cdot I_\phi}{\pi \cdot \tau}$$

$$\overset{\circ}{V}_2 = V_2 \cdot e^{j\phi} \quad \mu\epsilon \quad V_2 = \left| \overset{\circ}{V}_2 (-\kappa) \right|$$

Τελικά προκύπτει:

$$T = \frac{\mu_o \cdot V_1 \cdot V_2}{2 \cdot \kappa^2 \cdot \sinh(\kappa \cdot g)} \cdot \sin \phi$$

• Ενεργός ισχύς P – Άεργος ισχύ Q:

$$P + jQ = \frac{1}{2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overset{\circ}{V}_{AB}(\alpha) \cdot \overset{\circ}{I}_{AB}^*(\alpha)}{\alpha^2} \cdot \omega \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

Αντικαθιστώντας και πάλι έχουμε :

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Real} \left[ \frac{j \cdot \mu_o}{\kappa^3} \cdot \frac{\overset{\circ}{V}_2 \cdot V_1 \cdot \omega}{\sinh(\kappa \cdot g)} \right] = \frac{\mu_o \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot v_s}{2 \cdot \kappa^2 \cdot \sinh(\kappa \cdot g)} \cdot \sin \phi$$

Για την άεργο ισχύ τώρα έχουμε 2 όρους τους Q1 και Q2. Ο Q1 εκφράζει την άεργο ισχύ από την αλληλεπίδραση πρωτεύοντος δευτερεύοντος και είναι:

$$Q_1 = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Jmag} \left[ \frac{j \cdot \mu_o}{\kappa^3} \cdot \frac{\overset{\circ}{V}_2 \cdot V_1 \omega}{\sinh(\kappa \cdot g)} \right] = \frac{\mu_o \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot v_s}{2 \cdot \kappa^2 \cdot \sinh(\kappa \cdot g)} \cdot \cos \phi$$

Το Q2 εκφράζει την άεργο ισχύ από την ίδια δράση του πρωτεύοντος και είναι:

$$Q_2 = \frac{\mu_o \cdot v_s \cdot V_1^2}{2 \cdot \kappa^2} \left( X_M + \left[ \frac{1}{\tanh(\kappa g)} - 1 \right] \cdot 2 \cdot p \cdot \tau \right)$$

όπου  $X_M$  είναι το τμήμα του το τμήμα του πρωτεύοντος στο οποίο υπάρχει τροφοδοσία η οποία γίνεται τμηματικά όπως αναφέραμε.

- **Δύναμη ανάρτησης ανά m πλάτος :**

Ισχύει:

$$L = \frac{\mu_o}{4} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{\left| \overset{\circ}{V}_{AB}(\alpha) \right|^2}{\alpha^2} - \frac{\left| \overset{\circ}{I}_{AB}(\alpha) \right|^2}{\mu_o^2} \right] \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

και κάνοντας τους υπολογισμούς προκύπτει:

$$L = -\frac{\mu_o}{4 \cdot \kappa^2 \cdot \sinh^2(\kappa \cdot g)} \left[ V_1 \cdot V_2 \cdot \cos\varphi \cdot \cosh(k \cdot g) + V_1^2 \cdot 2 \cdot p \cdot \tau \right]$$

Για  $\kappa g \ll 1$  είναι  $\sinh(\kappa \cdot g) \approx \kappa \cdot g$  και  $\cosh(\kappa \cdot g) \approx 1$  οπότε προκύπτει:

$$L \approx -\frac{\mu_o \cdot V_1}{2 \cdot \kappa^4 \cdot g^2} \cdot (V_2 \cdot \cos\varphi + V_1 \cdot 2 \cdot p \cdot \tau)$$

Όταν η τιμή της δύναμης αυτής είναι αρνητική τότε εκφράζει έλξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ενώ όταν είναι θετική είναι απωστική.

- **Βαθμός απόδοσης:**

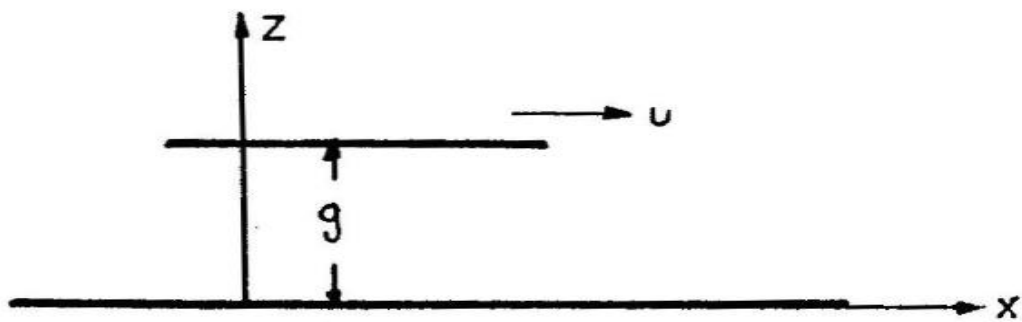
Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα είναι:

$$\eta = \frac{v_s \cdot T}{(v_s \cdot T) + P_L}$$

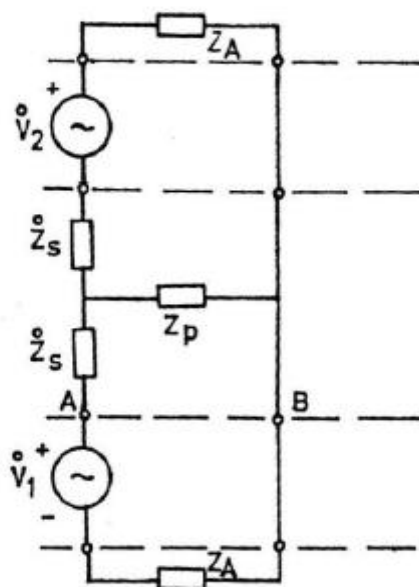
με  $P_L$  τις απώλειες του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν από τις αντιστάσεις των τυλιγμάτων τους καθώς και από την ένταση του ρεύματος που τα διαρρέει.

## 2.3 ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΕΡΟΣ:

Ξεκινώντας την ανάλυση για τους σύγχρονους ευθύγραμμους κινητήρες αέρος, στους οποίους υπάρχει διάκενο πλάτους  $g$ , θα παρουσιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα:

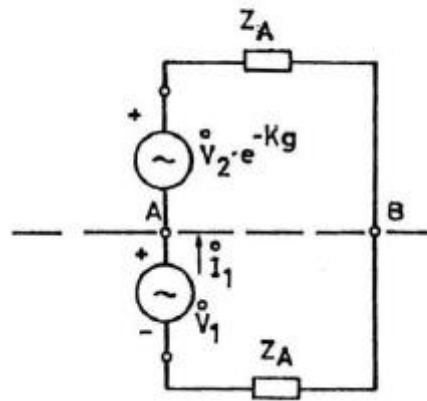


**Σχήμα 2.3.1** κύκλωμα Σ.Ε.Κ αέρος



**Σχήμα 2.3.2** ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Ε.Κ αέρος

Στο παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα τα σημεία A και B βοηθούν στην αναπαράσταση του επιπέδου πάνω από το πρωτεύον του κινητήρα. Εφαρμόζοντας το θεώρημα Thevenin στο κύκλωμα αυτό παίρνουμε το επόμενο απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα:



**Σχήμα 2.3.3** απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα Σ.Ε.Κ αέρος

Επομένως τώρα μπορούμε να βρούμε το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον το οποίο είναι:

$$\overset{\circ}{I}_1 = \frac{\overset{\circ}{V}_1 + \overset{\circ}{V}_2 e^{-|\alpha|g}}{2 \cdot Z_A}, \text{ με } Z_A = \frac{|\alpha|}{j \cdot \mu_o}$$

Έπειτα ακολουθεί ο υπολογισμός μεγεθών όπως των δυνάμεων ωθήσεως και ανάρτησης καθώς και της ισχύς:

• **Δύναμη ωθήσεως ανά m πλάτος:**

Ο τύπος για των υπολογισμό της δύναμης ωθήσεως T είναι ο ίδιος που παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι αντικαθιστώντας όπου V<sub>AB</sub> την V<sub>1</sub>, δηλαδή την τάση του πρωτεύοντος και όπου I<sub>AB</sub> την τιμή του ρεύματος πρωτεύοντος I<sub>1</sub> που υπολογίσαμε προηγουμένως έχουμε:

$$T = -\frac{1}{2} \text{Real} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overset{\circ}{V}_1^* \cdot \overset{\circ}{I}_{AB}}{\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi} \Rightarrow T = -\frac{1}{4} \text{Real} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{j \cdot \mu_o}{\alpha \cdot |\alpha|} \cdot \left( \left| \overset{\circ}{V}_{1(a)} \right|^2 + \overset{\circ}{V}_{1(a)}^* \cdot \overset{\circ}{V}_{2(a)} e^{-|\alpha|g} \right) \cdot \frac{d\alpha}{2\pi} \right] \Rightarrow$$

$$T = \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\mu_0}{\alpha \cdot |\alpha|} \text{Jmag} \left( \overset{\circ}{V}_{1(\alpha)} \overset{\circ}{V}_{2(\alpha)}^* e^{-|\alpha|g} \right) \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει στην παράγραφο 2.1, η τάση του πρωτεύοντος δίνεται από τη σχέση:

$$\overset{\circ}{V}_{1(\alpha)} = 2 \cdot \pi \cdot \delta(\alpha + \kappa) \cdot V_1$$

στην οποία  $V_1 = \sqrt{2} \cdot I \cdot \kappa$  και  $\alpha = -\kappa$  οπότε και προκύπτει ότι :

$$T = \frac{\mu_0 \cdot e^{-\kappa g}}{4 \cdot \kappa^2} \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot \sin\phi$$

- **Ενεργός ισχύς P :**

Για την ενεργό ισχύ πάλι ο τύπος είναι ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήσαμε στην παράγραφο 2.2 και τελικά προκύπτει:

$$P = \frac{\mu_0 \cdot v_s \cdot e^{-\kappa g}}{4 \cdot \kappa^2} \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot \sin\phi$$

- **Άεργος ισχύς Q:**

Η άεργος ισχύς δίνεται από τον εξής τύπο:

$$Q = \text{Jmag} \left[ \frac{1}{2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overset{\circ}{V}_{1(\alpha)} \cdot \overset{\circ}{I}_{AB(\alpha)}^* \cdot \omega}{\alpha^2} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi} \right]$$

όπου αντικαθιστώντας και πάλι όπου  $V_{AB}$  την  $V_1$ , δηλαδή την τάση του πρωτεύοντος και όπου  $I_{AB}$  την τιμή του ρεύματος πρωτεύοντος  $I_1$  που υπολογίσαμε πιο πάνω έχουμε:



$$Q = \frac{\mu_o \cdot \omega}{4} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|V_{1(\alpha)}|^2}{\alpha^2 \cdot |\alpha|} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi} + \text{Real} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V_{1(\alpha)}^* \cdot V_{2(\alpha)} e^{-|\alpha|g}}{\alpha^2 \cdot |\alpha|} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi} \right]$$

Όπως παρατηρούμε η άεργος ισχύς προκύπτει ως το άθροισμα δύο ολοκληρωμάτων. Το πρώτο ολοκλήρωμα το ονομάζουμε Q1 και το δεύτερο Q2. Τώρα θα προβούμε στον υπολογισμό τους υπενθυμίζοντας και πάλι ότι δεν τροφοδοτείται ολόκληρο το δευτερεύον αλλά η τροφοδοσία είναι τμηματική σε κομμάτι μήκους  $X_M$  :

$$Q_1 = \frac{\mu_o \cdot \omega}{4 \cdot \kappa^3} \cdot V_1^2 \cdot X_M = \frac{\mu_o \cdot v_s}{4 \cdot \kappa^2} \cdot V_1^2 \cdot X_M$$

$$Q_2 = \frac{\mu_o \cdot \omega \cdot e^{-\kappa \cdot g}}{4 \cdot \kappa^3} \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot \cos\varphi = \frac{\mu_o \cdot v_s \cdot e^{-\kappa g}}{4 \cdot \kappa^2} \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot \cos\varphi$$

- **Δύναμη ανάρτησης ανά m πλάτος :**

Εφαρμόζοντας τον τύπο της παραγράφου 2.2 και πάλι, προκύπτει :

$$L = -\frac{\mu_o \cdot e^{-\kappa \cdot g}}{8 \cdot \kappa^2} V_1 \cdot V_2 \cdot \cos\varphi$$

όπου με αρνητική τιμή η δύναμη είναι ελκτική ενώ με θετική είναι απωστική.

- **Βαθμός απόδοσης:**

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα είναι:

$$\eta = \frac{P}{P + P_L}$$

με  $P_L$  τις ωμικές απώλειες του πρωτεύοντος ενώ στο δευτερεύον οι απώλειες είναι μηδενικές.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>:

## ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ:

Ένας ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας αποτελείται από το πρωτεύον, το δευτερεύον και ένα διάκενο που τα χωρίζει. Το πρωτεύον διαθέτει τριφασικό τύλιγμα το οποίο και τροφοδοτείται από τριφασική πηγή ενώ διαθέτει και υποστήριξη σιδήρου. Το δευτερεύον είναι ένα αγωγίμο φύλλο το οποίο κινείται κατά την οριζόντια διεύθυνση. Έχει πάχος  $d$ , αγωγιμότητα  $\sigma$  και μεταξύ αυτού και του πρωτεύοντος υπάρχει διάκενο αέρα πάχους  $g$ . Επίσης κατά αντιστοιχία με το πρωτεύον και το δευτερεύον διαθέτει υποστήριξη σιδήρου σε επάλληλα μονωμένα φύλλα.

Συνήθως το τριφασικό τύλιγμα στο πρωτεύον είναι διπλής στρώσης και το μήκος στο οποίο φτάνει είναι  $2P\tau$  όπου  $P$  είναι τα ζεύγη των πόλων και  $\tau$  το πολικό βήμα. Έτσι δημιουργείται κύμα με πλάτος  $\sqrt{2} \cdot I$ , έχει κυματαριθμό  $k = \frac{\pi}{\tau}$  και κινείται με ταχύτητα  $u_s = \frac{\omega}{k} = 2 \cdot f \cdot \tau$  (ισχύει ότι  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ) η οποία είναι η σύγχρονη ταχύτητα. Βέβαια υπάρχει ολίσθηση σε αντίθεση με τους σύγχρονους κινητήρες και έτσι το δευτερεύον κινείται με ταχύτητα  $v_r = (1 - s)v_s$ . Για ένα επαγωγικό κινητήρα με τα χαρακτηριστικά που αναφέραμε και με βραχύ πρωτεύον, θα περιγράψουμε τώρα το αρμονικό κύμα αυτό.

Η συνάρτηση γραμμικής πυκνότητας ρεύματος είναι:

$$J(x, t) = \text{Real} \left[ \sqrt{2} \cdot I \cdot e^{j(\omega \cdot t - k \cdot x)} \right]$$

για την περιοχή ανάπτυξης του τυλίγματος δηλαδή για την περιοχή:

$$-p \cdot \tau \leq x \leq +p \cdot \tau$$

Επομένως μπορούμε να εξάγουμε στο χώρο Fourier τη διέγερση αυτής της γραμμικής πυκνότητας που είναι:

$$J(\alpha) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \frac{2 \cdot \sin[(\alpha + \kappa) \cdot p \cdot \tau]}{\alpha + \kappa}$$

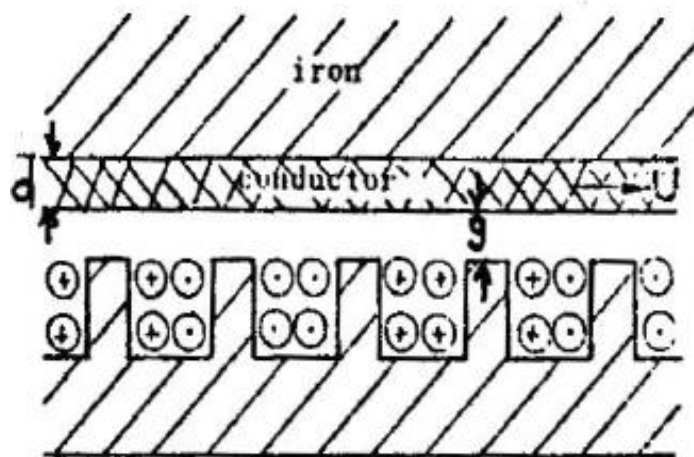
με  $I = \frac{3 \cdot N \cdot K_w \cdot I_\phi}{\pi \cdot \tau}$  όπου N ο αριθμός αγωγών ανά πόλο,  $K_w$  ο συντελεστής του τυλίγματος,  $I_\phi$  η ενεργός ένταση του φασικού ρεύματος κάθε φάσης.

Η τάση τώρα του πρωτεύοντος κατά Fourier είναι:

$$V(\alpha) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \alpha \cdot \frac{2 \cdot \sin[(a + k) \cdot p \cdot \tau]}{(a + k)}$$

Όπως αναφέραμε το  $g$  είναι το πλάτος του διακένου. Όμως πολλές φορές το πολλαπλασιάζουμε με ένα συντελεστή, το συντελεστή Carter, ώστε να λάβουμε υπόψιν τα φαινόμενα των αυλακιών και των οδόντων του πρωτεύοντος. Η τιμή του συντελεστή αυτού κυμαίνεται από 1.05 ως 1.10.

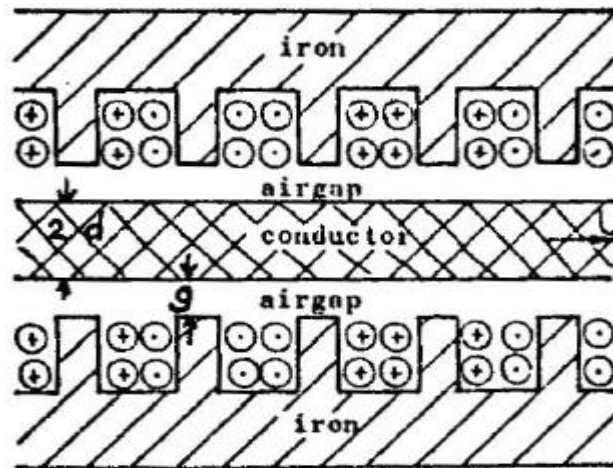
Υπάρχουν ευθύγραμμοι επαγωγικοί κινητήρες απλής όψεως και διπλής όψεως. Στην πρώτη κατηγορία υπάρχει ένα μόνο πρωτεύον και ένα δευτερεύον σε απόσταση  $g$  από αυτό και το οποίο έχει πάχος  $d$ . Αυτό παριστάνεται σχηματικά ως εξής:



**Σχήμα 3.1.1** Ε.Ε.Κ απλής όψεως

Υπάρχουν όμως και οι κινητήρες διπλής όψεως. Σε αυτούς υπάρχουν δύο πρωτεύοντα κάθε ένα από τα οποία διαθέτει το τύλιγμα του και φέρει υποστήριξη σιδήρου. Αυτά απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $2 \cdot (d + g)$ . Το δευτερεύον έχει πάχος  $2d$  και βρίσκεται ενδιάμεσα τους.

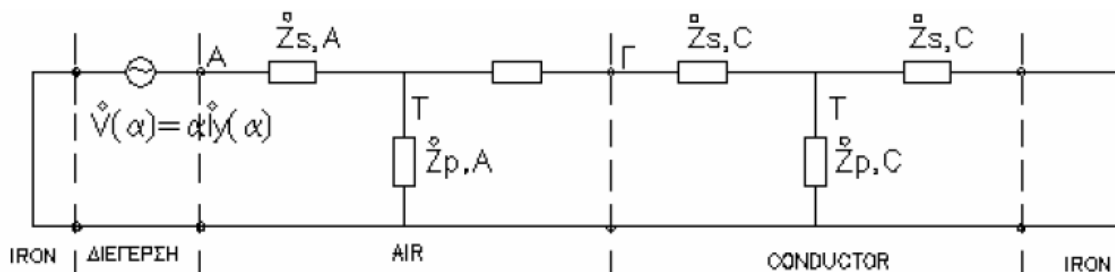
Σχηματικά αυτό φαίνεται παρακάτω(σχήμα 3.1.2):



**Σχήμα 3.1.2** Ε.Ε.Κ διπλής όψεως

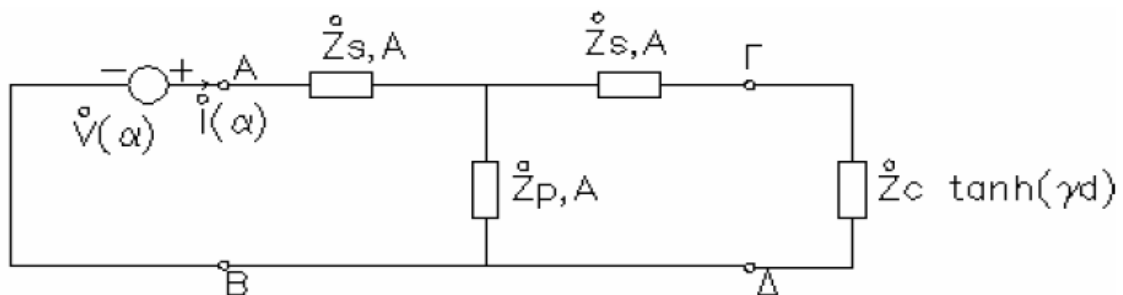
Λόγω της συμμετρίας, ένας ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας διπλής όψεως είναι ισοδύναμος με δύο κινητήρες απλής όψεως. Αυτό σημαίνει πως μελετώντας τον κινητήρα απλής όψεως μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα και για τον διπλής όψεως από τη στιγμή που μεγέθη όπως δύναμη ώθησης και ισχύς είναι σε αυτόν διπλάσια σε σύγκριση με τον πρώτο.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ευθύγραμμου επαγωγικού κινητήρα απλής όψεως είναι:



**Σχήμα 3.1.3** ισοδύναμο κύκλωμα Ε.Ε.Κ απλής όψεως

Το κύκλωμα του σχήματος 3.1.3 είναι ισοδύναμο με το παρακάτω κύκλωμα:



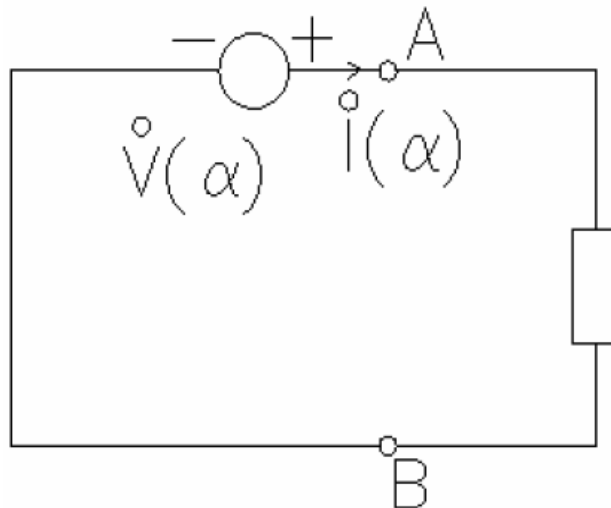
**Σχήμα 3.1.3** απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα Ε.Ε.Κ απλής όψεως όπου

$$\overset{\circ}{Z}_{S,A} = \overset{\circ}{Z}_A \cdot \tanh\left(d \cdot \frac{\gamma}{2}\right), \quad \overset{\circ}{Z}_{P,A} = \frac{\overset{\circ}{Z}_A}{\sinh(d \cdot \gamma)}$$

$$\gamma = \sqrt{a^2 + j \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot (\omega + \alpha \cdot v)}, \quad \overset{\circ}{Z}_A = \frac{\gamma}{j \cdot \mu_0}$$

με  $\mu_0$  τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού και  $v$  την ταχύτητα του δευτερεύοντος,

ενώ το κύκλωμα του σχήματος 3.1.3 είναι ισοδύναμο του κυκλώματος του σχήματος 3.1.4:



**Σχήμα 3.1.4** τελικό ισοδύναμο κύκλωμα Ε.Ε.Κ απλής όψεως

όπου:

$$\overset{\circ}{Z}_{ολ}(\alpha) = \frac{\overset{\circ}{Z}_A \cdot \tanh(|\alpha| \cdot g) + \overset{\circ}{Z}_C \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}{1 + \frac{\overset{\circ}{Z}_C}{\overset{\circ}{Z}_A} \cdot (\tanh(|\alpha| \cdot g) \cdot \tanh(\gamma \cdot d))}$$

και με τις προσεγγίσεις επειδή  $|\alpha| \cdot g \ll 1$  και  $|\gamma \cdot d| \ll 1$  γίνεται τελικά:

$$\overset{\circ}{Z}_{ολ}(\alpha) \cong \frac{1}{j \cdot \mu_0} \cdot \frac{\alpha^2 \cdot g + \gamma^2 \cdot d}{1 + \gamma^2 \cdot d \cdot g}$$

### 3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ:

Στην παράγραφο αυτή θα υπολογίσουμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός ευθύγραμμου επαγωγικού κινητήρα. Αυτά είναι η δύναμη ώθησης, η ισχύς, η δύναμη ανάρτησης, ο βαθμός απόδοσης και ο συντελεστής ισχύος.

- **Δύναμη ώθησης, ισχύς, δύναμη ανάρτησης:**

Ξεκινώντας θα παρουσιάσουμε τους γενικούς τύπους:

Δύναμη ωθήσεως ανά m πλάτους  $T = \frac{1}{2} \cdot \text{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overset{\circ}{I}_z(\alpha) \cdot \overset{\circ}{V}^*(\alpha)}{\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$

Ισχύς ανά m πλάτους  $P + j \cdot Q = \frac{\omega}{2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overset{\circ}{V}(\alpha) \cdot \overset{\circ}{I}^*(\alpha)}{\alpha^2} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$

Δύναμη αναρτήσεως ανά m πλάτους  $L = \frac{\mu}{4} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{|\overset{\circ}{V}(\alpha)|^2}{\alpha^2} - \frac{|\overset{\circ}{I}(\alpha)|^2}{\mu^2} \right] \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$

όπου στην περίπτωση ευθύγραμμου επαγωγικού κινητήρα με υποστήριξη σιδήρου στο πρωτεύον, οι τύποι γράφονται ως εξής:

$$T = -\frac{1}{2} \cdot \text{Real} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\overset{\circ}{V}(\alpha)|^2}{\alpha \cdot \overset{\circ}{Z}_{ολ}(\alpha)} \cdot \frac{d\alpha}{2 \cdot \pi}$$

$$P + j \cdot Q = \frac{1}{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left| \overset{0}{V}(\alpha) \right|^2}{\alpha^2 \cdot \overset{0}{Z}_{\alpha\lambda}(\alpha)} \cdot \omega \cdot \frac{d\alpha}{2 \cdot \pi}$$

$$L = \frac{\mu_o}{4} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left| \overset{0}{V}(\alpha) \right|^2 \cdot \left[ \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\mu_o^2 \cdot \left| \overset{0}{Z}_{\alpha\lambda}(\alpha) \right|^2} \right] \frac{d\alpha}{2 \cdot \pi}$$

Για τον ευθύγραμμο επαγωγικό κινητήρα της προηγούμενης παραγράφου που είναι και ο συνήθης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξής προσέγγιση για τη συνολική αντίσταση στο χώρο Fourier:

$$\overset{0}{Z}_{\alpha\lambda}(\alpha) \cong \frac{1}{j \cdot \mu_o} \cdot \frac{\alpha^2 \cdot g + \gamma^2 \cdot d}{1 + \gamma^2 \cdot d \cdot g}$$

Στη συνέχεια θα προβούμε στην παράθεση των παραπάνω μεγεθών, έχοντας αντικαταστήσει τη συνολική αντίστασης και την τάση πρωτεύοντος στο χώρο Fourier, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.1. Έτσι προκύπτει:

$$T = T_o \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-w \cdot G \cdot (w+1-w \cdot s)}{w^4 + G^2 \cdot (w+1-w \cdot s)^2} \cdot \left[ \frac{\sin((w+1) \cdot p \cdot \pi)}{(w+1) \cdot \pi} \right]^2 \cdot dw$$

$$P = T_o \cdot v_s \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G \cdot (w+1-w \cdot s)}{w^4 + G^2 \cdot (w+1-w \cdot s)^2} \cdot \left[ \frac{\sin((w+1) \cdot p \cdot \pi)}{(w+1) \cdot \pi} \right]^2 \cdot dw$$

$$Q = T_o \cdot v_s \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w^2 + \lambda^2 \cdot G^2 \cdot (w+1-w \cdot s)^2}{w^4 + G^2 \cdot (w+1-w \cdot s)^2} \cdot \left[ \frac{\sin((w+1) \cdot p \cdot \pi)}{(w+1) \cdot \pi} \right]^2 \cdot dw$$

Στο σημείο αυτό θα εξηγήσουμε τι σημαίνουν κάποιοι αριθμοί που εμφανίστηκαν παραπάνω:

- ✓ Το  $G$  είναι ο βαθμός ποιότητας ή μαγνητικός αριθμός Reynolds που είχαμε αναφέρει και στο πρώτο κεφάλαιο. Ισχύει:  $G = \frac{\sigma \cdot \mu_0 \cdot \omega}{\kappa^2} \cdot \frac{d}{d+g}$
- ✓ Το  $p$  είναι ο αριθμός των ζευγών πόλων.
- ✓  $s$  είναι η ολίσθηση με  $s = \frac{u_s - u}{u_s}$ . Από εδώ προκύπτει ότι η ταχύτητα η ταχύτητα του δευτερεύοντος σε m/s είναι :  
$$v_r = (1 - s)v_s$$
- ✓  $\lambda = \kappa \cdot \sqrt{g \cdot (g + d)}$
- ✓  $w = \frac{a}{k}$  και ονομάζεται σχετικός κυματικός αριθμός.

Επιπλέον:

$$T_o = \frac{I^2 \cdot G}{d \cdot \sigma \cdot f}$$

$$I = \frac{3 \cdot N \cdot K_w \cdot I\phi}{\pi \cdot \tau}$$

- **Βαθμός απόδοσης:**

Ο βαθμός απόδοσης ( $\eta$ ) του κινητήρα δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\eta = \frac{T\upsilon}{P}$$

με  $T$  τη δύναμη ώθησης,  $\upsilon$  την ταχύτητα και  $P$  τον αριθμό των ζευγών πόλων.

Ο τύπος αυτός μας δίνει τον βαθμό απόδοσης στην περίπτωση που οι απώλειες στο πρωτεύον και δευτερεύον λόγω εγκάρσιων ρευμάτων καθώς και οι απώλειες σιδήρου, έχουν αμεληθεί.

- **Συντελεστής ισχύος:**

Ο συντελεστής ισχύος είναι :



$$\cos(\varphi) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

με P ενεργό ισχύ και Q την άεργο.

Σημειώνεται πως και σε αυτή την περίπτωση αμελούνται οι απώλειες λόγω εγκάρσιων ρευμάτων και οι απώλειες σιδήρου καθώς και οι απώλειες λόγω του φαινομένου της οδόντωσης.

Παραπάνω αναφερθήκαμε σε ευθύγραμμο επαγωγικό κινητήρα στον οποίο υπήρχε υποστήριξη σιδήρου στο δευτερεύον. Στην περίπτωση όμως που κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει η συνολική ισοδύναμη αντίσταση που είχαμε υπολογίσει κατά την παρουσίαση του ισοδύναμου κυκλώματος αλλάζει. Στους τύπους για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του κινητήρα χρησιμοποιούμε την καινούρια ισοδύναμη αντίσταση της οποίας η τιμή στο πεδίο Fourier είναι:

$$\dot{Z}_{ολ(\alpha)} = \dot{Z}_3 = \frac{Z_2 + Z_A \cdot \tanh(g \cdot |\alpha|)}{1 + \frac{Z_2}{Z_C} \cdot \tanh(g \cdot |\alpha|)}$$

όπου:

$$Z_A(\alpha) = \frac{|\alpha|}{j\mu_0}$$

$$\gamma_C = \sqrt{\alpha^2 + j \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot (\omega + \alpha \cdot \nu)}$$

$$Z_C(\alpha) = \frac{\gamma_C}{j\mu_0}$$

$$\gamma_A = |\alpha|$$

$$V(\alpha) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \alpha \cdot \frac{2 \cdot \sin[(\alpha + \kappa) \cdot p \cdot \tau]}{(\alpha + \kappa)} \quad \text{όπου} \quad I = \frac{3 \cdot N \cdot I_\phi \cdot K_w}{\pi \cdot \tau}$$

$$\dot{Z}_1 = Z_A$$

$$\dot{Z}_2 = \frac{Z_A + Z_C \cdot \tanh(\gamma_C \cdot d)}{1 + \frac{Z_A}{Z_C} \cdot \tanh(\gamma_C \cdot d)}$$

καθώς και χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις :

$$\tanh(\gamma_C \cdot d) \simeq \gamma_C \cdot d \quad \text{και} \quad \tanh(g \cdot |\alpha|) \simeq g \cdot |\alpha|$$

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>:**

## **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ:**

Αποτρεπτικό στοιχείο για την ευρεία χρήση ευθύγραμμων κινητήρων σε εφαρμογές πρόωσης αποτέλεσε για πολλά χρόνια το μεγαλύτερο κόστος συγκριτικά με τους περιστροφικούς κινητήρες. Τα τελευταία χρόνια με την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, το κόστος περιορίστηκε ενώ παράλληλα αναπτύχθηκαν μέθοδοι ελέγχου των κινητήρων αυτών ξαναφέροντας τους στο φως της επικαιρότητας. Η υψηλή ακρίβεια αλλά και οι ταχύτητες που μπορούν να επιτευχθούν καθιστούν τους ευθύγραμμοι κινητήρες σοβαρό ανταγωνιστή των περιστροφικών σε εφαρμογές όπου απαιτείται γραμμική κίνηση. Υπενθυμίζουμε πως σε ένα ευθύγραμμο κινητήρα το φορτίο μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο δρομέα στον οποίο και ασκείται δύναμη ώθησης στη φορά της κίνησης απευθείας, χωρίς τη μεσολάβηση τροχών. Η χρήση τροχών περιορίζει τις δυνατότητες ανάπτυξης δύναμης κίνησης μεταξύ κινητού και ακίνητου μέρους. Επομένως η ύπαρξη τροχών μπορεί να αντικατασταθεί από κάποιο άλλο σύστημα ανάρτησης ενώ αν χρησιμοποιηθούν θα είναι για οδήγηση και όχι για τη μεταφορά των δυνάμεων της κίνησης.

Ένα μειονέκτημα τους είναι πως δεν είναι λειτουργικοί σε εφαρμογές που απαιτείται η τοποθέτηση τους στον κατακόρυφο άξονα. Η απουσία επαφής και πρόσφυσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος εμποδίζει τη διατήρηση της θέσης του δρομέα σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας του κινητήρα. Η δύναμη της βαρύτητας θα τον αναγκάσει να κινηθεί προς τα κάτω. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση κατάλληλου φρένου κάτι όμως που θα αύξανε σημαντικά το κόστος.

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες λοιπόν έχουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών καταρχάς στη βιομηχανία. Η μεγάλη ποικιλία διαφορετικών ειδών με διαφορετικά χαρακτηριστικά επιτρέπει τη χρήση τους σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις. Εκτός όμως από τη χρήση τους εντός των εργοστασίων, εκτεταμένη είναι και η χρήση τους εκτός αυτών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εφαρμογή τους στην ηλεκτροκίνηση. Οι ευθύγραμμοι κινητήρες συνδυαζόμενοι με συστήματα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης (MAGLEV SYSTEMS) αποτελούν την καλύτερη επιλογή για συστήματα μεταφοράς υψηλών ταχυτήτων.

Μια από τις πιο γνωστές εφαρμογές τους είναι λοιπόν στα ηλεκτρομαγνητικά τρένα μαγνητικής ανύψωσης. Σε αυτά ένα σύστημα μαγνητών-ηλεκτρομαγνητών είναι κατάλληλα τοποθετημένο στη βάση των βαγονιών και στις ράγες του τρένου. Αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση κάθετης δύναμης ανύψωσης στο βαγόνι και έτσι η κίνηση του δρομέα του ευθύγραμμου κινητήρα πραγματοποιείται χωρίς άλλα συστήματα ανάρτησης και συνεπώς και χωρίς τριβές. Χαρακτηριστικά της εφαρμογής αυτής είναι το οι υψηλές ταχύτητες, το χαμηλό λειτουργικό κόστος, η απουσία θορύβου, η άνεση στους επιβάτες αλλά και ταυτόχρονα το υψηλό κόστος κατασκευής του όλου συστήματος. Τέλος άλλες εφαρμογές των ευθύγραμμων κινητήρων είναι στην ιατρική, στην ψυχαγωγία, στην αεροπλοΐα σε άλλους τομείς οι οποίοι θα παρουσιαστούν αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

## 4.2 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ:

Η ώθηση για έρευνα παγκοσμίως σχετικά με τη χρήση ευθύγραμμων κινητήρων σε συστήματα μεταφορών προέκυψε από την ανάγκη για όχι μόνο για την ύπαρξη συστημάτων ανάρτησης χωρίς επαφές αλλά και για συστήματα προώθησης και πάλι χωρίς επαφές. Οι ευθύγραμμοι κινητήρες έχουν την ικανότητα να παράγουν μια άμεση δύναμη ώθησης χωρίς καμία μετατροπή της ενέργειας που προκαλεί περιστροφική κίνηση, σε γραμμική. Αυτό είναι ένα καίριο πλεονέκτημα των συστημάτων μεταφοράς καθώς η ώθηση είναι ανεξάρτητη του παράγοντα προσκόλλησης μεταξύ τροχών και γραμμών. Επιπλέον η δύναμη ανάρτησης που έχουμε περιγράψει, είναι ικανή να υποστηρίξει ένα αρκετά μεγάλο όχημα-φορτίο. Ως συνέπεια τα δύο κύρια πεδία της εφαρμογής τους στο χώρο των μεταφορών είναι τα υπερταχεία τρένα μαγνητικής ανύψωσης(maglev) και τα συμβατικά ηλεκτροκίνητα τρένα.

### ➤ Τρένα Maglev:



**Εικόνα 4.2.1** τρένο μαγνητικής ανύψωσης(maglev)

Για να περιγράψουμε ένα maglev τρένο, θα πρέπει να καλύψουμε δύο τομείς: Πως πραγματοποιείται η ανάρτηση και πως η πρόωση. Αρχικά θα αναφερθούμε στα συστήματα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης χωρίς επαφή, και τα οποία ονομάζονται όπως έχουμε αναφέρει maglev. Η ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση πρόκειται για το είδος ανάρτησης στο οποίο δεν χρησιμοποιούνται τροχοί αλλά πραγματοποιείται εξαιτίας των δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ δύο επιφανειών. Ο ρόλος των τροχών, αν υπάρχουν, είναι για οδήγηση ή υποστήριξη.

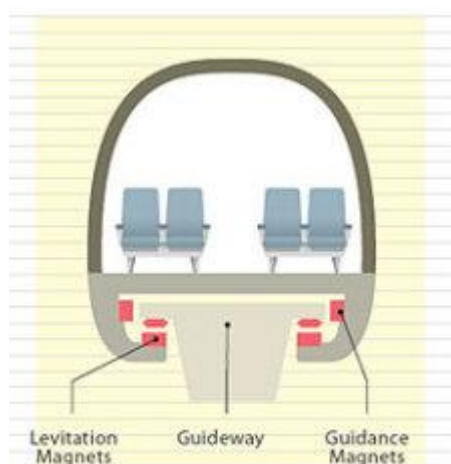
Υπάρχουν δύο συστήματα μέσω των οποίων πραγματοποιείται η ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση: τα στατικά και τα δυναμικά:

Στα στατικά: η ανάρτηση εξασφαλίζεται λόγω της άπωσης μόνιμων μαγνητών που είναι τοποθετημένοι στο στάτη και στο δρομέα (SPM). Το μοντέλο αυτό είναι δυσλειτουργικό λόγω του αυξημένου του μεγέθους.

Τα δυναμικά συστήματα: χωρίζονται σε ελκτικά και απωστικά. Η αρχή λειτουργίας του ελκτικού συστήματος, που είναι γνωστό και ως EMS, βασίζεται στην ελκτική δύναμη η οποία ασκείται μεταξύ ενός συνόλου ηλεκτρομαγνητών τοποθετημένων στη βάση του οχήματος και μιας σταθερής σιδηρομαγνητικής δοκού που εκτείνεται κατά μήκος της τροχιάς (σχήμα 4.2.2). Σε ένα ηλεκτροκίνητο τρένο η ελκτική αυτή δύναμη μεταξύ του κινητού μέρους και των ραγών δημιουργεί την ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση. Προσεγγιστικά η τιμή της ελκτικής δύναμης αυτής είναι:

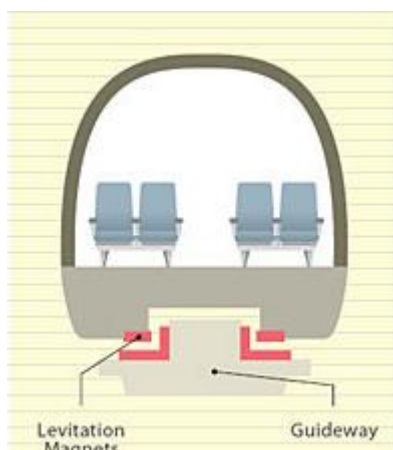
$$F = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \left( \frac{N \cdot I}{d} \right)^2$$

όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού,  $I$  το ρεύμα του ηλεκτρομαγνήτη,  $d$  το διάκενο,  $N$  τα ελίγματα του ηλεκτρομαγνήτου και  $S$  η επιφάνεια του πέλδου του ηλεκτρομαγνήτου.



**Σχήμα 4.2.2** EMS σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης

Όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω σχέση, το σύστημα είναι ασταθές. Δηλαδή αυξάνοντας το διάκενο μειώνεται η ελκτική δύναμη κάτι που οδηγεί σε περεταίρω αύξηση του διακένου. Ομοίως ελαττώνοντας το διάκενο, η ελκτική δύναμη αυξάνεται κάτι που οδηγεί σε επιπλέον μείωση του διακένου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου το οποίο μεταβάλλοντας το ρεύμα του ηλεκτρομαγνήτη επιτυγχάνει σταθερό διάκενο. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται διάκενο της τάξης των 10mm κάτι που δεν εμποδίζει όμως την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων.



**Σχήμα 4.2.3** EDS σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης

Στο ηλεκτροδυναμικό απωστικό σύστημα(EDS), η ανάρτηση πραγματοποιείται μέσω της απωστικής δύναμης(σχήμα 4.2.3) που αναπτύσσεται μεταξύ ενός αγώγιμου φύλλου (δευτερεύον) και ενός κινούμενου κλειστού αγωγού που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα μεγάλης έντασης(πρωτεύον). Το πρωτεύον διαθέτει ορθογώνια πλαίσια που διαρρέονται από ρεύμα μεγάλης έντασης ενώ το δευτερεύον είναι συνήθως φύλλο αλουμινίου. Έτσι επιτυγχάνονται διάκενα της τάξης των 5-20 cm, πολύ μεγαλύτερα εν συγκρίσει με το ελκτικό σύστημα. Μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η πιθανότητα αστάθειας λόγω δυνάμεων ανάσχεσης και πλάγιων δυνάμεων στις εγκάρσιες μετατοπίσεις. Αντιθέτως, επιτυγχάνονται πολύ μεγαλύτερα διάκενα με αυτή τη μέθοδο ανάρτησης. Για συστήματα με ταχύτητες μέχρι 500km/h χρησιμοποιείται το ελκτικό ενώ για συστήματα άνω των 500km/h το απωστικό.

Η πρόωση τώρα των συστημάτων αυτών πραγματοποιείται με τη χρήση ευθύγραμμων κινητήρων. Συνήθως οι δύο τύποι ευθύγραμμων κινητήρων που χρησιμοποιούνται είναι οι ευθύγραμμοι επαγωγικοί κινητήρες με βραχύ πρωτεύον και οι σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες με μακρύ πρωτεύον. Για μέσες ταχύτητες επιλέγεται κατά βάση ο πρώτος τύπος ενώ για μεγαλύτερες ο δεύτερος. Αναλυτική περιγραφή όλων των ειδών ευθύγραμμων κινητήρων που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροκίνηση ακολουθεί στη συνέχεια.

Τώρα θα αναφέρουμε δύο παραλλαγές συστημάτων μαγνητικής ανύψωσης maglev, οι οποίες είναι και οι πιο ευρέως διαδεδομένες. Πρόκειται

για τα συστήματα Transrapid και SC Maglev, τα οποία επιτυγχάνουν υπέρ-υψηλές ταχύτητες.

Το Transrapid ξεκίνησε από τη Γερμανία τα τέλη της δεκαετίας του 1970. Ένα τρένο Transrapid έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να περιβάλλει τη σιδηροτροχιά ενώ στο κάτω μέρος του υπάρχουν μόνιμοι μαγνήτες. Διαθέτει σύστημα ανάρτησης EMS και ευθύγραμμο σύγχρονο κινητήρα με μακρύ στάτη Η ανύψωση είναι της τάξης του 1cm. Χρησιμοποιείται επίσης τύλιγμα συνεχούς σε αύλακες μαλακού σιδήρου και η τροφοδότηση γίνεται από μπαταρίες που βρίσκονται στο όχημα. Η φόρτιση των μπαταριών αυτών πραγματοποιείται από ευθύγραμμη επαγωγική γεννήτρια η οποία διαθέτει πρωτεύον που είναι πάνω στο όχημα. Σήμερα συναντάμε πολλές διαφορετικές παραλλαγές του μοντέλου αυτού στα μαγνητικά τρένα, με πιο γνωστό το Transrapid στη Σαγκάη(εικόνα 4.2.4).

Εκτός από το Transrapid , η δεύτερη παραλλαγή είναι το SC Maglev (εικόνα 4.2.5), η προέλευση του οποίου είναι από την Ιαπωνία. Ένα maglev τρένο το οποίο είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με το μοντέλο SC Maglev χρησιμοποιεί EDS σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης και ευθύγραμμο σύγχρονο κινητήρα, U τύπου με μακρύ στάτη για προώθηση . Εγκατεστημένοι στο πάτωμα του τρένου υπάρχουν υπεραγωγιμοί μαγνήτες ενώ και στα πλάγια της σιδηροτροχιάς υπάρχουν πηνία και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται όχι μόνο η ανύψωση αλλά και η εξασφάλιση πως το τρένο δεν παρεκκλίνει από την τροχιά του. Η ανύψωση είναι 10cm ενώ ο τύπος του ευθύγραμμου κινητήρα που χρησιμοποιεί για την πρόωση είναι ο ευθύγραμμος σύγχρονος κινητήρας.

Τα maglev συστήματα μεταφορών είναι οι καλύτερες επιλογές όταν θέλουμε μεγάλες ταχύτητες. Βέβαια λόγω της αντίστασης του αέρα η μαγνητική ανύψωση θα ήταν αδύνατη για ταχύτητες μεγαλύτερες των 500km/h ενώ και η κάθε στάση πρέπει να απέχει από την επόμενη τουλάχιστον 100km.



**Εικόνα 4.2.4** Transrapid στη Σαγκάη





**Εικόνα 4.2.5** προσομοίωση τρένου SC maglev

Συνοπτικά τα maglev projects που είτε είναι υπό δοκιμή είτε υπό εφαρμογή, καθώς και ο τύπος ευθυγράμμου κινητήρα και το σύστημα μαγνητικής ανύψωσης που χρησιμοποιούν, φαίνονται στον πίνακα 4.2.6

System	Location	Country	Motor type	Suspension type	Operation / test velocity	Status
Transrapid	Emsland	Germany	Long-stator LSM	EMS	400 / 451 km/h	Test facility
Transrapid	Shanghai	China	Long-stator LSM	EMS	430 / 501 km/h	In operation
MLU	Yamanashi	Japan	Air-core long-stator LSM	EDS	n/a / 581 km/h	Test facility
HSST	Nagoya	Japan	Short-stator LIM	EMS	n/a / 80 km/h	Test facility
Linimo	Nagoya	Japan	Short-stator LIM	EMS	100 km/h / n/a	In operation
Korean Maglev	Daejeon	South Korea	Short-stator LIM	EMS	n/a / 110 km/h	Test facility
	Changsha	China	Short-stator LIM	EMS	n/a / 150 km/h	Test facility
	Tangshan	China	Short-stator LIM	EMS	Planned up to 150 km/h	Test facility under construction
	Dalian	China	Wheels and PM	EDS with PM	Planned up to 320 km/h	Test facility under construction
Magplane	Shanghai	China	Long-stator LSM	EDS	Planned up to 550 km/h	Abandoned
MagneMotion M3	Massachusetts	USA	Long-stator LSM	EMS with PM, control coils		Test facility
General Atomics	Pennsylvania	USA	Long-stator LSM	EDS with PM	n/a / 160 km/h	Test facility
American Maglev	Virginia, Georgia	USA	Short-stator LIM	EMS	n/a / 60-70 km/h	Test facility
Maglev 2000	Florida	USA	Long-stator LSM	EDS	Planned up to 500 km/h	In research
			Short-stator LIM or long-stator LSM			
Swissmetro		Switzerland	Short-stator LIM or long-stator LSM	EMS	Planned up to 500 km/h	Abandoned

**Πίνακας 4.2.6** λειτουργία, δοκιμές και έρευνα maglev projects ανά τον κόσμο

Εξαιτίας της όλο και αυξανόμενης ζήτησης για γρήγορες μεταφορές, μεγαλύτερων χωρητικότητας και φιλικών προς το περιβάλλον, τα maglev συστήματα προωθούμενα από ευθύγραμμους κινητήρες μπορούν να αποδειχτούν η λύση του προβλήματος. Τα πλεονεκτήματά τους είναι :



- ✓ Σύντομα ταξίδια λόγω επίτευξης μεγάλων ταχυτήτων
  - ✓ Ασφάλεια και άνεση
  - ✓ Χαμηλά λειτουργικά έξοδα και έξοδα συντήρησης
  - ✓ Φιλικά προς το περιβάλλον
  - ✓ Περιορισμός θορύβων
  - ✓ Ταχύτερη πέδηση
- Βέβαια υπάρχουν και μειονεκτήματα όπως :
- ✓ Μεγάλο αρχικό κόστος επένδυσης των γραμμών.
  - ✓ Αδυναμία εφαρμογής τους σε ήδη υπάρχουσες σιδηροδρομικές γραμμές οι οποίες θα έπρεπε να αντικατασταθούν.

### ➤ **Συμβατικές μορφές ηλεκτροκίνησης:**

Εκτός από τη χρήση των ευθύγραμμων κινητήρων σε συστήματα maglev, τους συναντάμε σε μεγαλύτερο βαθμό σε συμβατικά συστήματα ηλεκτροκίνησης όπως τα ηλεκτρικά τρένα. Σε αυτά δεν υπάρχει μαγνητική ανύψωση και ο ευθύγραμμος κινητήρες έχει σκοπό την προώθηση του οχήματος. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στα είδη κινητήρων που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της ηλεκτροκίνησης.

Όπως και στις περιστροφικές μηχανές, μια διάκριση πραγματοποιείται μεταξύ των κινητήρων που τροφοδοτούνται με DC ρεύμα και εκείνων που λειτουργούν με εναλλασσόμενο. Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε τους επαγωγικούς και τους σύγχρονους κινητήρες. Όμως διακρίσεις εντοπίζονται και σε άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους.

Έχουμε μιλήσει για ευθύγραμμους κινητήρες με βραχύ και μακρύ πρωτεύον. Στο κομμάτι του κόστους και της αξιοπιστίας υπερτερούν οι κινητήρες απλής όψης με υποστήριξη σιδήρου και βραχύ πρωτεύον. Σε αυτούς ο στάτης, που φέρει το τριφασικό τύλιγμα, βρίσκεται επί του οχήματος ενώ ο δρομέας είναι επί της τροχιάς. Όπως γίνεται αντιληπτό το όχημα πρέπει να διαθέτει σύστημα μέσω του οποίου θα επιτυγχάνεται η τροφοδότηση του τυλίγματος του. Σε κινητήρες με μακρύ πρωτεύον, το τριφασικό τύλιγμα είναι κατά μήκος της τροχιάς ενώ ο δρομέας είναι επί του οχήματος. Το γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται η τροφοδότηση του οχήματος είναι μεγάλο πλεονέκτημα που επιτρέπει την επίτευξη ταχυτήτων μεγαλύτερων των 500km/h. Από την άλλη μεριά το κόστος αυξάνεται σημαντικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πρωτεύον είναι αναπτυγμένο σε όλο το μήκος της διαδρομής. Εκτός από το κόστος και η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος θα ήταν μεγαλύτερη μειώνοντας το συντελεστή ισχύος. Για αυτό το λόγο σε περίπτωση χρήσης μακρύ δρομέα δεν υπάρχει ενιαία τροφοδότηση του αλλά τμηματική.

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες συνεχούς ρεύματος(DC) δεν είναι κατάλληλοι για ηλεκτροκίνητα συστήματα μεταφορών. Λόγω της εναλλασσόμενης πολικότητας, οι συλλέκτες μεταξύ πρωτεύοντος και

δευτερεύοντος προκαλούν εκκενώσεις τόξου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα συχνές συντηρήσεις και μειωμένη αξιοπιστία.

Οι σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες (LSM) με μακρύ πρωτεύον και συνδυσασμένοι με ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση χρησιμοποιούνται για συστήματα υψηλών ταχυτήτων(πάνω από 300km/h). Το μοντέλο αυτό είναι απλό και ελαφρύ με αυξημένο βαθμό απόδοσης και συντελεστή ισχύος. Μειονέκτημα αποτελεί το ότι το πρωτεύον που είναι απλωμένο σε όλο το μήκος της τροχιάς ανεβάζει σημαντικά το κόστος.

Μαζί με τους LSM μακριού πρωτεύοντος, οι πιο διαδεδομένοι ευθύγραμμοι κινητήρες είναι οι επαγωγής(LIM) με βραχύ πρωτεύον. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρότερων ταχυτήτων(μέχρι 300km/h). Δεδομένου ότι το πρωτεύον είναι επί του οχήματος και ότι το δευτερεύον είναι από ένα απλό αγώγιμο υλικό(αλουμίνιο, χαλκός), καθιστά το μοντέλο αυτό αρκετά οικονομικό. Επιπροσθέτως, ο βαθμός απόδοσης και ο συντελεστής ισχύος έχουν χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με τους LSM μακριού πρωτεύοντος.

Θα αναφερθούμε τώρα σε μερικές περιπτώσεις ηλεκτρικών τρένων, χωρίς μαγνητική ανύψωση, τα οποία χρησιμοποιούν ευθύγραμμους κινητήρες. Πρέπει να τονίσουμε πως όλα τα συστήματα αυτά πρόκειται για συστήματα υψηλών ταχυτήτων.



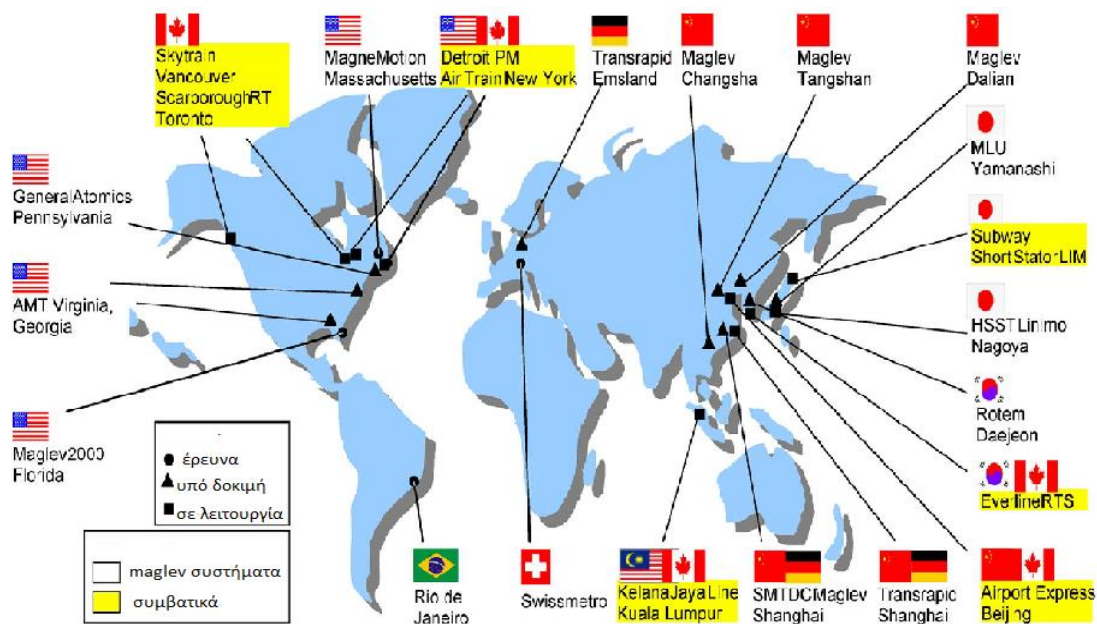
**Εικόνα 4.2.7** Bombardier Innovia Metro

Αρχικά έχουμε τα Innovia Metro κατασκευασμένα από την Bombardier Transportation. Η προώθηση του τρένου αυτού του τύπου, πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός επίπεδου ευθύγραμμου επαγωγικού κινητήρα. Ο στάτης αυτού αποτελείται από μία λεπτή αλουμινένια πλάκα και βρίσκεται ανάμεσα στις

μεταλλικές ράγες πάνω στις οποίες κινείται το τρένο. Το γεγονός ότι ο ευθύγραμμος κινητήρας είναι επίπεδος και έχει μικρό μέγεθος, επιτρέπει στο τρένο να είναι πολύ κοντά στο έδαφος. Επιπλέον υπάρχουν ειδικά φρένα στο όχημα για περιπτώσεις όπου απαιτείται απότομο φρενάρισμα. Τέτοια συστήματα μεταφορών συναντάμε σε πόλεις όπως το Βανκούβερ, το Τορόντο, το Ντιτρόιτ, η Νέα Υόρκη, το Πεκίνο και στην Κουάλα Λουμπόρ.

Εφαρμογές των ευθύγραμμων κινητήρων και σε άλλα συστήματα μεταφορών υψηλών ταχυτήτων, γνωστά και ως RT(rapid transit) συναντάμε και σε πολλά άλλα σιδηροδρομικά συστήματα κυρίως στην Κίνα και στην Ιαπωνία. Μερικά παραδείγματα είναι:

- Οσάκα (γραμμή Nagahori Tsurumi- ryokuchi)
- Τόκυο (γραμμή Toei Oedo)
- Κόμπτε (γραμμή Kaigan)
- Γιοκοχάμα( Green Line)
- Γραμμές 4,5 και 6 του Guangzhou Metro στην Κίνα



**Εικόνα 4.2.8** ηλεκτροκίνητα τρένα με ευθύγραμμους κινητήρες ανά τον κόσμο

➤ **Άλλα συστήματα μεταφορών:**

Τέλος υπάρχει ένα διαφορετικό σύστημα μεταφορών το οποίο διαφέρει και από τα maglev αλλά και από τα συμβατικά. Σε διεθνή ορολογία είναι γνωστό ως Monorail καθώς κινούνται πάνω σε μία ράγα και όχι σε δύο. Χαρακτηριστικό του είναι πως το πλάτος του οχήματος είναι μεγαλύτερος του

πλάτους του δρόμου οδήγησης στον οποίο κινείται. Ένα τέτοιο σύστημα δεν χρησιμοποιεί μαγνητική ανύψωση. Αντιθέτως, χρησιμοποιεί ευθύγραμμους κινητήρες για την πρόωση του. Μέσω δοκιμών που έγιναν διαπιστώθηκε πως σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως πάγου στις σιδηροδρομικές γραμμές, η πρόωση χρησιμοποιώντας τροχούς ήταν πολλές φορές ανεπαρκής. Αντιθέτως για την προώθηση και οδήγησή του, χρησιμοποιείται ένας ευθύγραμμος κινητήρας. Δεν απαιτείται λοιπόν μηχανικό σύστημα μετάδοσης της δύναμης καθώς η δύναμη προώθησης εφαρμόζεται μεταξύ του οχήματος και της ράγας στην οποία κινείται μειώνοντας τις τριβές και τη φθορά. Κατά βάση χρησιμοποιείται ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας ενώ έχουν επιτευχθεί ταχύτητες μέχρι και 400km/h.



**Εικόνα 4.2.9** Monorail τρένο

Εκτός από τα τρένα, υπάρχουν εφαρμογές των ευθύγραμμων κινητήρων και σε άλλα μέσα μεταφορών. Μία τέτοια περίπτωση είναι το σύστημα ατομικής, γρήγορης μετακίνησης PRT (personal rapid transit, εικόνα 4.2.10). Πρόκειται για ένα καινοτόμο δημόσιο σύστημα μεταφοράς το οποίο αναπτύχθηκε από τις εταιρείες Pininfarina και Vectus Intelligent Transport. Κάθε τέτοιο όχημα είναι ελαφρύ και δεν απαιτεί τη χρήση οδηγού.

Ένα τέτοιο όχημα μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι 3 ή 6 επιβαίνοντες και είναι μια καλή λύση για εξυπηρέτηση μεταφορών όπως εντός πανεπιστημίων, πάρκων, εμπορικών κέντρων και αεροδρομίων. Η ταχύτητα του είναι 16 – 26 km/h ενώ η κατανάλωση ενέργειας είναι μόλις 0,24 Wh/km με πλήρες φορτίο. Είναι ηλεκτροκίνητο και για μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το βάρος του, αντί να χρησιμοποιούνται μπαταρίες πάνω στο όχημα, γίνεται χρήση ευθύγραμμου επαγωγικού κινητήρα. Ο σχεδιασμός του κινητήρα αυτού δε διαφέρει σε τίποτα σε σχέση με όσα έχουμε αναφέρει για τους ευθύγραμμους επαγωγικούς κινητήρες. Επιπλέον είναι πιθανό στο όχημα να υπάρχει μια μικρή μπαταρία ώστε σε περιπτώσεις ανάγκης να βοηθήσει το όχημα να φτάσει στην επόμενη στάση.





**Εικόνα 4.2.10** όχημα personal rapid transit (PRT)

### ➤ Εφαρμογές υπό έρευνα:

Θα αναφέρουμε τώρα δύο projects τα οποία είναι υπό έρευνα, είναι πολύ πιθανόν να αποτελούν μέρος των μεταφορών στο μέλλον και τα οποία χρησιμοποιούν ευθύγραμμους κινητήρες. Πρόκειται για το σύστημα μεταφορών Hyper loop και τα μαγνητικά αυτοκίνητα:

Το Hyperloop είναι σύστημα μεταφορών υπέρ-υψηλής ταχύτητας και πρώτος το περιέγραψε ο επιχειρηματίας Elon Musk. Θα αποτελείται από βαγόνια-κάψουλες τα οποία θα κινούνται μέσα σε αγωγούς μειωμένης πίεσης. Η ταχύτητα του θα φτάνει τα 1.220 km/h δηλαδή θα μπορεί να καλύψει αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων μέσα σε λίγα λεπτά. Τέτοιες ταχύτητες όμως οι τροχοί δεν μπορούν να αντέξουν λόγω των καταπονήσεων από τις τριβές. Επιπλέον χρησιμοποιώντας μαγνητική ανύψωση το όλο σύστημα θα γινόταν υπερβολικά ακριβό. Έτσι η ιδέα που υπάρχει είναι η χρήση ρουλεμάν αέρος. Αυτά θα παρέχουν ένα λεπτό στρώμα αέρος εμποδίζοντας την επαφή της κάθε κάψουλας με τον αγωγό μέσα στον οποίο και θα κινείται. Η πρόωση τώρα θα πραγματοποιείται με τη χρήση ευθύγραμμου επαγωγικού κινητήρα. Παράλληλα, θα δεσμεύεται ηλιακή ενέργεια, θα παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα και με την χρήση inverters θα γίνεται η τροφοδότηση που απαιτείται για τη λειτουργία του κινητήρα. Σύμφωνα με τον ίδιο τον Musk, το Hyperloop θα είναι ασφαλέστερο, ταχύτερο, φθηνότερο, πιο άνετο, απρόσβλητο από τις καιρικές συνθήκες, ενεργειακά αυτόνομο, ανθεκτικό στους σεισμούς και δεν θα παρεμποδίζει την κίνηση άλλων μέσων μεταφοράς σε σύγκριση με τα συμβατικά τραίνα.

Φτάνοντας στο τέλος, θα αναφερθούμε σε ένα project το οποίο υπάρχει μόνο σε θεωρητικό επίπεδο αλλά είναι πιθανό να το δούμε σε πλήρη εφαρμογή στο άμεσο μέλλον. Αναφερόμαστε σε ένα είδος αυτοκινήτων που στο μέλλον μπορεί και να αντικαταστήσει τα συμβατικά. Ονομάζονται μαγνητικά αυτοκίνητα(εικόνα 4.2.11) ενώ οι ευθύγραμμοι κινητήρες αποτελούν και πάλι μέρος αυτής της ιδέας. Την ιδέα εμπνεύστηκε ένας Γερμανός σχεδιαστής, ο Κρίστιαν Φόργκ. Η ιδέα του ήταν αντί να υπάρχει ένας ηλεκτρικός κινητήρας

εντός του αυτοκινήτου, να υπάρχει κάτω από το δρόμο. Συγκεκριμένα κάτω από το δρόμο θα υπάρχει το πρωτεύον του ευθύγραμμου κινητήρα το οποίο θα τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο που θα παράγεται θα είναι ικανό να κινεί το δευτερεύον το οποίο θα είναι ενσωματωμένο σε κάθε ένα από τα μαγνητικά αυτά αυτοκίνητα. Έτσι θα εμφανίζεται η δύναμη ώθησης η οποία και θα προωθεί τα αυτοκίνητα αυτά. Σύμφωνα με τον εμπνευστή της ιδέας, θα μπορούμε να χρησιμοποιούμε και τα συμβατικά αυτοκίνητα αλλά και τα μαγνητικά στους ίδιους δρόμους αφού οι ευθύγραμμοι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν και με τους υπάρχοντες δρόμους αρκεί να γίνει κατάλληλη επένδυση κάτω από αυτούς. Επιπλέον μέσω της κίνησης αυτής θα μπορεί να υπάρξει και φόρτιση μπαταριών στο αυτοκίνητο που θα του επιτρέπει να κινηθεί και χωρίς τον ευθύγραμμο κινητήρα σε λειτουργία.



**Εικόνα 4.2.11** μαγνητικό αυτοκίνητο με ευθύγραμμο κινητήρα

### 4.3 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ:

Ένας άλλος τομέας στον οποίο συναντάμε τη χρήση ευθύγραμμων κινητήρων είναι αυτός της ιατρικής. Οι ευθύγραμμοι κινητήρες προσφέρουν ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών περιστροφικών κινητήρων για την εκτέλεση κινήσεων με ακρίβεια σε εφαρμογές ιατρικών συσκευών. Ως αποτέλεσμα, σταδιακά γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς στους κατασκευαστές ιατρικών συσκευών. Η ακρίβεια, ο μικρός χρόνος αντίδρασης και η έλλειψη μηχανικών μερών είναι τα κύρια τους πλεονεκτήματα. Αποτέλεσμα είναι ο προσδοκώμενος χρόνος ζωής τους να είναι μεγαλύτερος, οι φθορές όλο και πιο σπάνιες και οι συντηρήσεις όλο και λιγότερες. Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματά τους αυτά είναι:

- ✓ Απλή κατασκευή: Η ύπαρξη λίγων κινητών μερών καθώς το φορτίο μπορεί να προσαρμοστεί άμεσα στο δρομέα καθιστά το σχεδιασμό της μηχανής απλό και συνεπώς επιτρέπει τη χρήση της σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

- ✓ Βελτιωμένη ακρίβεια θέσης: Το γεγονός ότι με σε έναν ευθύγραμμο κινητήρα η δύναμη εφαρμόζεται απευθείας στο κινητό του μέρος, αναγκάζοντας το να κινηθεί γραμμικά εκμηδενίζει την ανάγκη να χρησιμοποιηθούν επιπρόσθετοι μηχανισμοί μετάδοσης της κίνησης. Αυτό εξασφαλίζει την ακρίβεια καθώς στοιχεία για μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική δεν είναι πια αναγκαία, αποκλείοντας την ύπαρξη όποιων σπασμωδικών κινήσεων.
- ✓ Μεγάλο εύρος ταχυτήτων: Με ένα ευθύγραμμο κινητήρα μπορούν να επιτευχθούν από πολύ μικρές ταχύτητες που είναι αναγκαίες σε κάποιες εφαρμογές στις οποίες έμφαση δίνεται στην ακρίβεια, αλλά και πολύ μεγάλες για εφαρμογές που θέλουμε μικρό χρόνο αντίδρασης.
- ✓ Λιγότερες συντηρήσεις: Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν περιστροφικά μέρη όπως γρανάζια, μειώνει τις καταπονήσεις με αποτέλεσμα και οι συντηρήσεις να είναι όλο και πιο αραιές. Επιπλέον το γεγονός πως δεν υπάρχει επαφή μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δεν καθιστά τη χρήση λιπαντικών ουσιών απαραίτητη. Τέλος, και η μη επιθυμητή ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών περιορίζεται εξαιτίας των μειωμένων τριβών.
- ✓ Δυνατότητα αποστείρωσης. Η ύπαρξη διακριτών μερών όπως του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, καθιστά πιο εύκολη την αποδόμηση τους για τις ανάγκες της αποστείρωσης, κάτι πολύ σημαντικό στις ιατρικές εφαρμογές.

### ➤ Τομογράφοι:

Αρχικά θα μιλήσουμε για τρία είδη τομογράφων στα οποία απαιτείται γραμμική κίνηση και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευθύγραμμοι κινητήρες για αυτό το σκοπό:

### ΑΞΟΝΙΚΟΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΟΣ:



**Εικόνα 4.3.1** Αξονικός τομογράφος

Η αξονική τομογραφία ή Υπολογιστική τομογραφία (στα Αγγλικά αρχικά Axial Tomography, σήμερα Computed Tomography - CT) είναι ακτινολογική μέθοδος εξέτασης του ανθρώπινου σώματος. Μπορεί να απεικονίσει σε κάθετες τομές ολόκληρο το σώμα, χρησιμοποιώντας την ακτινοβολία Χ. Η αξονική τομογραφία εισήχθη στην ιατρική διαγνωστική τη δεκαετία του 1970 (για την ακρίβεια το 1968) και έφερε επανάσταση στο χώρο. Ξεκίνησε από τις ΗΠΑ και το πρώτο όργανο που μελετήθηκε με αυτήν ήταν ο εγκέφαλος. Η μέθοδος έτυχε ταχέως καθολικής αποδοχής, κυρίως, για το ότι δεν προκαλεί καμία ταλαιπωρία στους ασθενείς και έχει μεγάλη διαγνωστική ακρίβεια. Οι αξονικές τομογραφίες λαμβάνονται με ένα μεγάλο όργανο, που καλείται αξονικός τομογράφος. Ο εξεταζόμενος τοποθετείται σε ύπτια θέση σε ένα κινούμενο κάθισμα το οποίο αργά διέρχεται μέσω μιας κυκλικής τρύπας του μηχανήματος. Αποφεύγεται να ακτινοβοληθούν οι οφθαλμοί, γι' αυτό και το κεφάλι τοποθετείται με κλίση  $15^\circ$ . Όση ώρα ο εξεταζόμενος βρίσκεται μέσα στην κυκλική περιοχή ακτινοβολείται με ακτίνες Χ ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Με αυτήν τη μέθοδο λαμβάνονται κάθετες λεπτές τομές (μεταξύ 0,6-10 χιλιοστών) του ανθρώπινου σώματος, οι οποίες αποτυπώνονται σε φιλμ και εκτυπώνονται σε ειδικό χαρτί, με χρώμα μαύρο - άσπρο και διαφανές. Τα συμπαγή μόρια φαίνονται καλύτερα. Έτσι απεικονίζεται το εσωτερικό του σώματος και επιτρέπεται στον εξεταστή να αναζητήσει βλάβες μέσα στα όργανα ή να εντοπίσει ανωμαλίες σε σημεία που ήταν αδιανόητο να εντοπιστούν με την απλή ακτινογραφία. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα διαμόρφωσης εντυπωσιακών εικόνων τριών διαστάσεων (3D), που βοηθούν πολύ στην ορθοπεδική και στην αγγειολογία-καρδιολογία.

Η χρήση ενός ευθύγραμμου κινητήρα αφορά την επίτευξη αυτής ακριβώς της γραμμικής κίνησης του κινούμενου καθίσματος του ασθενή. Συγκεκριμένα ο ασθενής τοποθετείται ξαπλωμένος με μια κλίση στο κεφάλι του όπως αναφέραμε πριν. Το κάθισμα αυτό κινείται πολύ αργά και περνάει μέσα από την τρύπα του τομογράφου. Η εξέταση μπορεί να αφορά όλο το σώμα ή μόνο ένα συγκεκριμένο σημείο. Κατά μέσο όρο η όλη διαδικασία διαρκεί 15 με 30 λεπτά. Επειδή ακριβώς η κίνηση είναι γραμμική και αναλογιζόμενοι τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρησιμοποίησή του, τον καθιστά ως σοβαρό υποψήφιο κινητήριο σύστημα του φορείου του ασθενή στην εξέταση αυτή. Επιπλέον είναι πιθανό να χρειαζόμαστε η κίνηση αυτή να γίνεται με σταθερό βήμα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε γραμμικό βηματικό κινητήρα. Ο κινητήρας αυτός πραγματοποιεί και πάλι γραμμική κίνηση η οποία δεν είναι συνεχόμενη αλλά έχει βήμα. Συγκεκριμένα μετατρέπει τους ηλεκτρικούς παλμούς σε διακριτές κινήσεις. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε το συνεχές σταμάτημα και εκκίνηση του κινητήρα καθώς το επιθυμητό επιτυγχάνεται μέσω του γραμμικού βηματικού κινητήρα.

## ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΟΣ:

Μαγνητική Τομογραφία (MRI) είναι μια διαγνωστική τεχνική σάρωσης που βασίζεται στις αρχές του μαγνητικού συντονισμού. Η Μαγνητική



Τομογραφία (MRI) χρησιμοποιεί ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο κυμάτων και ραδιοσυχνοτήτων να παράγει λεπτομερείς εικόνες των εσωτερικών οργάνων και ιστών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση σχεδόν σε κάθε μέρος του σώματος και πιο συχνά χρησιμοποιείται για να εξετάσει τον εγκέφαλο, τις αρθρώσεις και στους δίσκους της σπονδυλικής στήλης. Ο εξεταζόμενος σε μία μαγνητική τομογραφία δεν εκτίθεται σε ιοντίζουσα ακτινοβολία.

Οι Μαγνητικοί Τομογράφοι με ισχυρό μαγνητικό πεδίο 1,5 Tesla απεικονίζουν με πολύ υψηλή ακρίβεια, περιορίζουν τον χρόνο εξέτασης στο 1/8 των παλαιότερων μηχανημάτων, μειώνουν σημαντικά το θόρυβο και προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη άνεση στον εξεταζόμενο. Οι μαγνητικοί τομογράφοι έχουν δυνατότητα απεικόνισης σε Νευρολογικές, Ορθοπαιδικές, Αγγειολογικές, Ογκολογικές, Ουρολογικές και Καρδιολογικές εξετάσεις. Με την συνεχή αναβάθμιση των δυνατοτήτων τους μπορούν να προσφέρουν σύγχρονες εξειδικευμένες εξετάσεις όπως μαστογραφία, προστάτη, τρακτογραφίας και ελέγχου αιμάτωσης.

Και σε αυτό τον τύπο τομογράφου, ένας ευθύγραμμος κινητήρας μπορεί να μετακινήσει γραμμικά το κρεβάτι του ασθενούς ώστε να πραγματοποιηθεί η εξέταση. Επιπλέον και η χρήση βηματικού γραμμικού κινητήρα είναι πιθανή στην περίπτωση που υπάρχει ανάγκη κίνησης με βήμα.

## ΤΟΜΟΓΡΑΦΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΠΟΖΙΤΡΟΝΙΩΝ:

Η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET) είναι μια εξειδικευμένη διαδικασία ακτινολογίας χρησιμοποιείται για να εξετάσει διάφορους ιστούς του σώματος για τον εντοπισμό ορισμένων ασθενειών. PET μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να ακολουθήσει την πρόοδο της θεραπείας ορισμένων ασθενειών. Ενώ PET είναι πιο συχνά χρησιμοποιείται στους τομείς της νευρολογίας, της ογκολογίας, και την καρδιολογία, εφαρμογές σε άλλους τομείς που μελετάται.

Η τομογραφία PET λειτουργεί χρησιμοποιώντας μια συσκευή σάρωσης (μια μηχανή με μια μεγάλη τρύπα στο κέντρο του) για την ανίχνευση ποζιτρονία (υποατομικά σωματίδια) που εκπέμπεται από ένα ραδιονουκλίδιο στο όργανο ή τον ιστό που εξετάζεται. Τα ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιούνται στην τομογραφία PET είναι χημικές ουσίες, όπως γλυκόζη, άνθρακα ή οξυγόνο χρησιμοποιείται φυσικά από το συγκεκριμένο όργανο ή ιστό κατά τη διάρκεια μεταβολική διαδικασία του. Μία ραδιενεργός ουσία συνδέεται προς το χημικό που απαιτούνται για τις συγκεκριμένες δοκιμές. Για παράδειγμα, σε σαρώσεις PET του εγκέφαλου, ένα ραδιενεργό ουσία εφαρμόζεται σε γλυκόζη για να δημιουργήσουν ένα ραδιονουκλίδιο που ονομάζεται φθοριοδεοξυγλυκόζη (FDG), επειδή ο εγκέφαλος χρησιμοποιεί τη γλυκόζη για το μεταβολισμό του. FDG χρησιμοποιείται ευρέως σε σάρωση PET. Σε γενικές γραμμές, σαρώσεις PET μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση οργάνων και / ή ιστών για την παρουσία της νόσου ή άλλες ασθένειες. PET μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της λειτουργίας των οργάνων, όπως η καρδιά ή τον εγκέφαλο.

Μία άλλη χρήση των σαρώσεις PET είναι στην αξιολόγηση της θεραπείας του καρκίνου. Η κίνηση του ασθενή δια μέσου της συσκευής σάρωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ευθύγραμμου κινητήρα ο οποίος και κινεί το φορέο του γραμμικά ομοίως με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις τομογράφων.

### ➤ Άλλες ιατρικές συσκευές:

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε μια μεγάλη ποικιλία και άλλων ιατρικών συσκευών διευκολύνοντας τη ζωή των γιατρών, των ασθενών και των νοσοκόμων. Η ακρίβεια στην κίνηση καθώς και τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα που έχουμε αναφέρει, έχουν ως αποτέλεσμα οι κινητήρες αυτοί να αποπνέουν εμπιστοσύνη.

### ΙΑΤΡΙΚΑ ΚΡΕΒΑΤΙΑ-ΚΑΡΕΚΛΕΣ:

Πρώτο παράδειγμα αποτελούν τα ιατρικά κρεβάτια και οι ιατρικές καρέκλες. Τα παλαιότερης τεχνολογίας κρεβάτια για να ανυψωθούν χρησιμοποιούσαν γρανάζια τα οποία μετέτρεπαν την περιστροφική κίνηση μέσω της ροπής που ασκούνταν σε ένα μοχλό, σε γραμμική ανυψώνοντας το κρεβάτι. Αυτή ήταν μια επίπονη διαδικασία με συχνά προβλήματα στα γρανάζια καθιστώντας το επιθυμητό αποτέλεσμα αδύνατο. Αντιθέτως η κίνηση γίνεται πολύ εύκολη με ένα ευθύγραμμο κινητήρα. Κατά μέσο όρο οι ευθύγραμμοι κινητήρες που χρησιμοποιούνται παράγουν δύναμη ώθησης που φτάνει τα 6.000 N και είναι δυνατόν να εξυπηρετηθεί φορτίο που φτάνει τα 150 Kg. Ομοίως ευθύγραμμοι κινητήρες κινούν και καθίσματα ασθενών όπως τις οδοντιατρικές καρέκλες. Η δύναμη και εδώ είναι κατά μέσο όρο 8.000 N με ταχύτητες από 7 ως 18 mm/s καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευθύγραμμοι κινητήρες με διαφορετικά χαρακτηριστικά αναλόγως της χρήσης που είναι αναγκαία να πραγματοποιηθεί.

### ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ LASER- ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ:

Σήμερα στην ιατρική χρησιμοποιείται εξοπλισμός ο οποίος λειτουργεί με ακτίνες laser. Μια μεγάλη ποικιλία θεραπειών περιλαμβάνει τη χρήση ακτινών laser, χρησιμοποιώντας μηχανήματα στα οποία η ακρίβεια της θέσης είναι απολύτως αναγκαία. Αν παράγοντες όπως η ταχύτητα, η ακρίβεια θέσης και η ευστάθεια δεν μπορούν να ελεγχθούν τότε μπορεί να προκληθεί κάποιο πρόβλημα στους ασθενείς. Με τη χρήση ευθύγραμμων κινητήρων σε τέτοιες συσκευές οι παράγοντες αυτοί παρακολουθούνται και ελέγχονται καθιστώντας τους πολύ πιο αξιόπιστες. Οι συσκευές laser χρησιμοποιούνται σε πολλά είδη επεμβάσεων όπως:

- ✓ Αισθητική χειρουργική
- ✓ Χειρουργικές επεμβάσεις στα μάτια
- ✓ Οδοντιατρικές επεμβάσεις
- ✓ Γενική χειρουργική

Εκτός όμως των επεμβάσεων με χρήση laser, υπάρχουν και οι επεμβάσεις με χρήση robot στις οποίες απαιτείται απόλυτη ακρίβεια. Παλιότερα σε μία επέμβαση ο χειρουργός έπρεπε να είναι παρών. Σήμερα όμως αυτό δεν είναι αναγκαίο σε πολλές περιπτώσεις. Μπορεί να πραγματοποιεί επεμβάσεις με ακρίβεια και πλήρη έλεγχο και από μακριά. Μέσω κονσόλων ελέγχου και οθονών, ένας γιατρός μπορεί να κατευθύνει το robot ώστε αυτό να πραγματοποιήσει την εγχείρηση. Η κίνηση αυτών των robot μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κατάλληλων ευθύγραμμων κινητήρων στις περιπτώσεις εκείνες που απαιτείται γραμμική κίνηση με απόλυτη ακρίβεια.

## 4.4 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

### ➤ Μηχανήματα Packaging :

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες έχουν πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία. Στο κομμάτι όμως στο οποίο η συμβολή τους είναι καθοριστική είναι στο κομμάτι του packaging, δηλαδή της διαδικασίας με την οποία τα προϊόντα τοποθετούνται σε συσκευασίες προκειμένου να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Το packaging είναι αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής. Η μεγάλη ποικιλία προϊόντων που συναντάμε κάθε μέρα, έχει ως αποτέλεσμα μια μεγάλη ποικιλία ειδών packaging. Όχι μόνο η λειτουργικότητα και ο σχεδιασμός ενός πακέτου είναι σημαντικός, αλλά επίσης και η ίδια του η παραγωγή. Πρέπει να είναι εφικτό τεχνολογικά και με το κατάλληλο κατασκευαστικό κόστος. Για να γίνουν πράξη αυτές οι απαιτήσεις, καινοτόμες, ευέλικτες και απόλυτα αυτοματοποιημένες μηχανές packaging απαιτούνται.

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές packaging, μπορούν να επιτύχουν ταχύτητες ακόμα και μεγαλύτερες των 10m/s καθώς και υψηλές επιταχύνσεις ενώ και η ακρίβεια τους είναι υψηλή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευθύγραμμοι κινητήρες που να είναι επίπεδοι καθώς και ευθύγραμμοι κινητήρες που έχουν U σχήμα.

Χρησιμοποιώντας επίπεδους κινητήρες, το σύστημα γίνεται πιο αποδοτικό ως προς το κόστος ενώ η ικανότητα ως προς το φορτίο είναι μεγαλύτερη. Αντιθέτως χρησιμοποιώντας τους U-shape κινητήρες, εξαφανίζεται το φαινόμενο της οδόντωσης κάτι που καθιστά την κίνηση πιο στρωτή. Επιπλέον, το κινούμενο κομμάτι του κινητήρα μπορεί να είναι μικρότερο και συνεπώς λιγότερο ακριβό.



**Εικόνα 4.4.1** Επίπεδος ευθύγραμμος κινητήρας U-shape ευθύγραμμος κινητήρας

Οι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται ευθύγραμμοι κινητήρες σε μηχανές packaging είναι:

- ✓ Για την αύξηση του αριθμού των προϊόντων που περνάνε μέσα από το σύστημα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καθώς μπορούν να επιτύχουν υψηλές ταχύτητες και υψηλές επιταχύνσεις.
- ✓ Για την αύξηση της αξιοπιστίας της διαδικασίας επειδή στους κινητήρες αυτούς δεν υπάρχουν μηχανικά μέρη για τη μετάδοση της κίνησης.
- ✓ Για την αύξηση της ακρίβειας.
- ✓ Δυνατότητα χρησιμοποίησής τους στο τραχύ βιομηχανικό περιβάλλον.



**Εικόνα 4.4.2** Μεταφορέας κιβωτίων υψηλής ταχύτητας

Η εφαρμογή τους σε τέτοια συστήματα είναι αρκετά απλή. Το κινούμενο μέρος του ευθύγραμμου κινητήρα μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα ώστε να αποτελέσει μια κινούμενη πλατφόρμα στην οποία θα βρίσκονται τοποθετημένα τα προϊόντα. Επιπλέον οι ευθύγραμμοι κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιούν και encoders, δηλαδή αισθητήρες με τους οποίους μπορεί να γίνει εύκολη παρακολούθηση της λειτουργίας τους. Συγκεκριμένα οι αισθητήρες που είναι προσαρμοσμένοι στον κινητήρα μπορούν να εντοπίσουν τη θέση και να τη μετατρέψουν σε σήμα το οποίο να διαβάζεται από τον κατάλληλο ελεγκτή της κίνησης.

Πιο συγκεκριμένα τώρα, θα παραθέσουμε μερικούς τομείς της βιομηχανίας στην οποία κατά αντιστοιχία με τις εφαρμογές packaging, γίνεται χρήση ευθύγραμμων κινητήρων:

### ➤ **Επεξεργασία και συσκευασία τροφίμων:**

Τα περισσότερα είδη τροφίμων τα οποία χρησιμοποιούμε δεν προέρχονται πλέον κατευθείαν από τον παραγωγό. Αντιθέτως προηγείται βιομηχανική επεξεργασία και διάφορα στάδια για τη συσκευασία του πριν να εμφανιστούν στα ράφια των καταστημάτων. Η τεχνολογία αυτοματισμού είναι θεμελιώδης για την επεξεργασία των τροφίμων και για τη συσκευασία τους μέσω μηχανών packaging. Οι συχνές αλλαγές στα πακέτα σε μικρότερες δόσεις τεμαχίων ή οι μεγαλύτερες ποσότητες παραγωγής είναι μερικές από τις πιο σημαντικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές τέτοιων μηχανών. Μια επιπλέον ανάγκη είναι η παρακολούθηση και καταγραφή της όλης διαδικασίας. Αυτό που σε κάθε εργοστάσιο πρέπει να επιτυγχάνεται είναι η ασφαλής και ελεγχόμενη παραγωγή και συσκευασία των τροφίμων. Επιπλέον για την ασφάλεια του καταναλωτή πρέπει η όλη διαδικασία να υπακούει σε όλους τους κανόνες υγιεινής.

Οι γραμμικοί κινητήρες αποτελούν κατάλληλες μηχανές για αυτό το σκοπό, δηλαδή για να θέσουν τις διαδικασίες παρασκευής και packaging σε κίνηση στη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων. Υπάρχουν πολλά είδη ευθύγραμμων κινητήρων τα οποία είναι κατασκευασμένα και από ατσάλι. Με αυτό τον τρόπο είναι ανοξείδωτα ενώ παράλληλα καλύπτουν και τις υψηλές απαιτήσεις υγιεινής που αναφέραμε προηγουμένως. Με τη χρησιμοποίησή τους μπορεί να επιτευχθεί η γραμμική κίνηση η οποία είναι και η επιθυμητή. Τα προϊόντα κινούνται πάνω σε γραμμές και η επεξεργασία τους είτε μέσω των κατάλληλων μηχανημάτων είτε απευθείας από το προσωπικό του εργοστασίου, καθίσταται δυνατή. Όπως γίνεται αντιληπτό η χρήση ευθύγραμμου κινητήρα είναι πιο βολική με τη χρήση περιστροφικών κινητήρων καθώς με τους τελευταίους θα έπρεπε να υπάρχουν και μηχανισμοί μετατροπής της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική. Επιπλέον οι λιγότερες τριβές, η βολική τοποθέτησή τους, και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, αποτελούν επιπλέον κίνητρα.

Οι τομείς στους οποίους η κίνηση που προσφέρει ο κινητήρας καθώς και ο έλεγχος που συνοδεύει αυτή είναι στην εμφιάλωση μπουκαλιών, στην τοποθέτηση των προϊόντων σε πακέτα, στο μέτρημα τους, στην απόρριψη των

ελαττωματικών, στο κόψιμο τους, στη συσκευασία τους, στη σφράγιση τους καθώς και σε πολλούς άλλους.

Με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούνται οι ευθύγραμμοι κινητήρες στη βιομηχανία των τροφίμων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε πολλούς άλλους κλάδους της βιομηχανίας όπως:

- ❖ Επεξεργασία ξύλου
- ❖ Αυτοκινητοβιομηχανία
- ❖ Κλωστοϋφαντουργία
- ❖ Εργαστηριακές δοκιμές
- ❖ Εκτυπώσεις και κατασκευή ετικετών

### ➤ **Κοπτικές μηχανές:**

Ο σκοπός σε κάθε κοπτική μηχανή είναι να επιτύχει κατάλληλες τομές σε ένα υλικό με ακρίβεια και ταχύτητα ενώ παράλληλα ελέγχεται όλη η διαδικασία αυτή. Για να επιτευχθεί αυτό υπάρχουν αρκετοί τρόποι. Παραδοσιακά, με τους περιστροφικούς κινητήρες, η επιθυμητή κίνηση του κοπτικού τμήματος της μηχανής πραγματοποιούνταν μέσω μηχανικών μερών. Επίσης πολλές μηχανές χρησιμοποιούν υδραυλικά συστήματα για την κίνηση του στην επιθυμητή θέση. Άλλες χρησιμοποιούν κατάλληλα γρανάζια και σερβοκινητήρες ώστε να μεταφραστεί η περιστροφική κίνηση σε ακριβή γραμμική κίνηση του κοπτικού μέρους. Με τη χρήση όμως ευθύγραμμων κινητήρων μπορεί να εξασφαλιστεί η λειτουργία και τέτοιων κοπτικών μηχανών.

Με τους ευθύγραμμους κινητήρες το σύστημα γίνεται πολύ πιο απλό. Επιπλέον η ικανότητα τους για επίτευξη υψηλών ταχυτήτων και επιταχύνσεων, καθιστά την όλη διαδικασία πολύ πιο σύντομη. Το κοπτικό εξάρτημα τοποθετείται στο δρομέα απευθείας. Με την τροφοδότηση της μηχανής, ο δρομέας κινείται επιτυχάνοντας παράλληλα και τις επιθυμητές τομές. Επομένως έχει διπλό ρόλο: Κινείται λόγω της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής αλλά φέρει και εξάρτημα κοπής.

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες όμως μπορούν να εφαρμοστούν και σε μηχανές κοπής υλικών που λειτουργούν με laser. Η μεγάλη τους ακρίβεια και η ταχύτητα τους, τους καθιστά αξιόπιστους. Σε τέτοιες εφαρμογές στόχος είναι η επίτευξη ακρίβειας της τάξης του  $\pm 3$  to  $5 \mu\text{m}$ . Επομένως η ακρίβεια τους καθώς και η δυνατότητα επίτευξης ταχυτήτων μεγαλύτερων από  $1000\text{mm/s}$  καλύπτουν τις απαιτήσεις των μηχανών κοπής laser.

### ➤ **Αυτοκινητοβιομηχανία:**

Η ύπαρξη των ευθύγραμμων κινητήρων στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι μέσω των δοκιμών ασφαλείας των αυτοκινήτων

(crash tests). Η πιο συνήθης μορφή αυτών των δοκιμών είναι μέσω της πρόσκρουσης αυτοκινήτων σε εμπόδια ώστε να γίνει έλεγχος κάποιων παραμέτρων ασφαλείας όπως αερόσακων. Το αυτοκίνητο επιταχύνεται και προσκρούεται έχοντας την επιθυμητή ταχύτητα για τη συγκεκριμένη δοκιμή χωρίς να φέρει κάποιον επιβαίνοντα. Η κίνηση στις περισσότερες περιπτώσεις είναι γραμμική οπότε ένας ευθύγραμμος κινητήρας αποτελεί την κατάλληλη λύση για την επιτάχυνση του αυτοκινήτου της δοκιμής καθώς μπορεί να επιτύχει υψηλές ταχύτητες.



➤ **Εικόνα 4.4.3** ευθύγραμμος κινητήρας σε crash test αυτοκινήτου

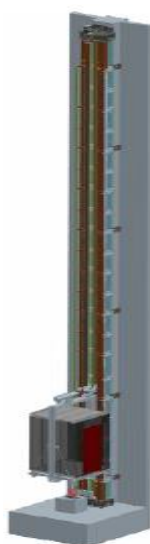
Σε ένα crash test λοιπόν, ο ευθύγραμμος κινητήρας τοποθετείται κάτω από το επίπεδο του πατώματος. Πάνω από αυτόν βρίσκεται το αυτοκίνητο το οποίο έχει συνδεθεί με το δρομέα του κινητήρα. Επομένως όταν ο κινητήρας τεθεί σε λειτουργία και ο δρομέας αρχίσει να κινείται, παρασύρει μαζί του και το αυτοκίνητο το οποίο και συγκρούεται έχοντας αποκτήσει την επιθυμητή ταχύτητα με το εμπόδιο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι πρόκειται για ένα εύκολο και αποδοτικό τρόπο κίνησης σε συστήματα δοκιμών ασφαλείας.

#### ➤ **Ανύψωση φορτίων:**

Ευθύγραμμοι κινητήρες χαμηλής επιτάχυνσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ανύψωσης φορτίων. Η ιδιαιτερότητα τους είναι πως σε αυτές τις εφαρμογές δεν είναι τοποθετημένοι παράλληλα ως προς το έδαφος αλλά κάθετα σε αυτό. Με τη χρήση ενός περιστροφικού κινητήρα για την ανύψωση ενός φορτίου, όπως για παράδειγμα σε ένα ανελκυστήρα, απαιτούνταν και άλλα μηχανικά μέρη.

Στους ανελκυστήρες αυτούς η λειτουργία τους πραγματοποιείται ως εξής: Ένας περιστροφικός ηλεκτροκινητήρας δημιουργεί περιστροφική κίνηση. Αποτέλεσμα τα συρματόσχοινα που ενώνουν τον κινητήρα με το θάλαμο και μέσω μιας τροχαλίας, να τον κινούν προς τα πάνω ή προς τα κάτω ανάλογα με το πώς περιστρέφεται ο κινητήρας. Επιπλέον υπάρχει αντίβαρο το οποίο

κινείται αντιθέτως με την κίνηση του θαλάμου. Η ύπαρξη του αποσκοπεί στην διευκόλυνση της κίνησης του θαλάμου και συνεπώς μειώνεται η ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργήσει ο κινητήρας. Με ένα ευθύγραμμο κινητήρα όμως ολόκληρος ο μηχανισμός κίνησης διαφοροποιείται. Κατά μήκος της τροχιάς κίνησης μπορεί να υπάρχει στερεωμένος καθέτως ως προς το έδαφος ο στάτης του κινητήρα. Επιπλέον ο δρομέας θα είναι προσαρμοσμένος απευθείας πάνω στον θάλαμο. Με την κίνηση λοιπόν του δρομέα κινείται και ο θάλαμος.



**Σχήμα 4.4.4** ανελκυστήρας με ευθύγραμμο κινητήρα

Η ερώτηση η οποία γεννάται είναι τι συμβαίνει όταν για κάποιο λόγο διακοπεί η παροχή ρεύματος προς το κινητήρα. Με τους συμβατικούς, ο θάλαμος απλώς ακινητοποιούνται. Με τους ευθύγραμμους όμως, λόγω της δύναμης τη βαρύτητας, το κινούμενο μέρος μαζί με το θάλαμο θα κινούνται ανεξέλεγκτα προς το έδαφος. Επομένως η χρήση κατάλληλων φρένων είναι εξαιρετικής σημασίας σε εφαρμογές όπως αυτές.

Εφαρμογές ανύψωσης φορτίου με ευθύγραμμους κινητήρες συναντάμε κυρίως σε ορυχεία. Ο τύπος κινητήρα που συναντάται κατά βάση είναι ο ευθύγραμμος σύγχρονος κινητήρας(ΣΕΚ). Αποτέλεσμα είναι να εκλείπει η ύπαρξη υδραυλικών συστημάτων, αντίβαρων, τροχαλιών και αντίβαρων ενώ επίσης τα φορτία που μπορούν να μεταφερθούν είναι σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα τώρα στις υπάρχουσες εφαρμογές ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από τα εξής μέρη:

Ο στάτης του ΣΕΚ είναι τοποθετημένος ακλόνητα κατά μήκος της επιθυμητής τροχιάς μαζί με τις ράγες οδήγησης. Σε αυτόν υπάρχει και το τριφασικό τύλιγμα. Στο θάλαμο μεταφοράς του φορτίου, συνδεδεμένο με το δρομέα, για την κίνηση του πάνω στις ράγες αυτές. Επίσης είναι δυνατόν σε μεγάλου μήκους εφαρμογές, να υπάρχουν περισσότεροι από ένας θάλαμοι και με κατάλληλα συστήματα να ελέγχονται ανεξάρτητα. Κάθε θάλαμος μπορεί να

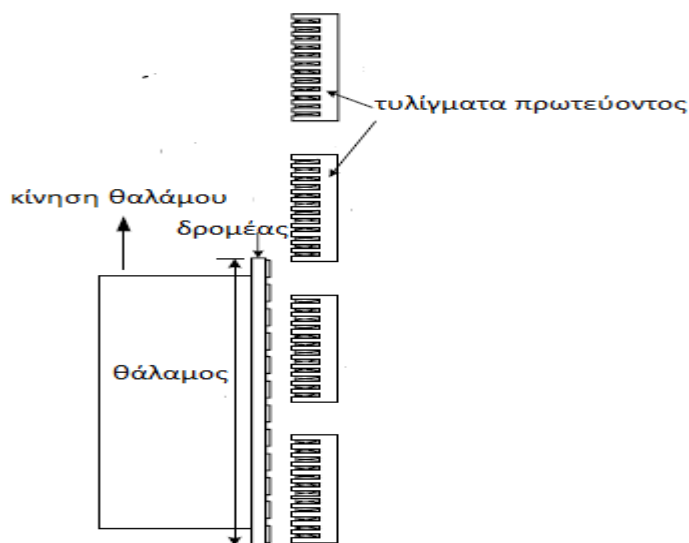


φέρει γεννήτρια η οποία συλλέγει τα επαγωγικά ρεύματα και καλύπτει τις ανάγκες του όπως για φως, επικοινωνία κ.α.

Τα φρένα είναι το πιο σημαντικό κομμάτι του συστήματος καθώς καθορίζουν το πόσο ασφαλές θα είναι. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός μηχανικών φρένων με δυνατότητα ενεργοποίησης όταν σταματήσει η παροχή ρεύματος στον κινητήρα.

Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος είναι:

- ✓ Δεν υπάρχουν συρματόσχοινα. Το μήκος της τροχιάς κίνησης μεγαλώνει μπορεί να μεγαλώσει με κατάλληλη προσαρμογή στον αριθμό των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος.
- ✓ Λίγα έξοδα συντηρήσεων. Η ύπαρξη λίγων κινούμενων μερών αυξάνουν την αξιοπιστία ενώ μειώνουν την ανάγκη για συχνή συντήρηση. Επιπλέον σε περίπτωση βλάβης επιτρέπεται η γρήγορη αντικατάσταση κάποιου εξαρτήματος.
- ✓ Αυξημένη ταχύτητα και χωρητικότητα. Το πρώτο είναι σημαντικό στις περιπτώσεις όπου απαιτείται μεταφορά φορτίων με υψηλό ρυθμό. Όσο για το δεύτερο επιτυγχάνεται μέσω της δυνατότητας για ταυτόχρονη ύπαρξη παραπάνω του ενός θαλάμου.



**Σχήμα 4.4.5** ανελκυστήρας ευθύγραμμου κινητήρα με διακριτά τυλίγματα πρωτεύοντος

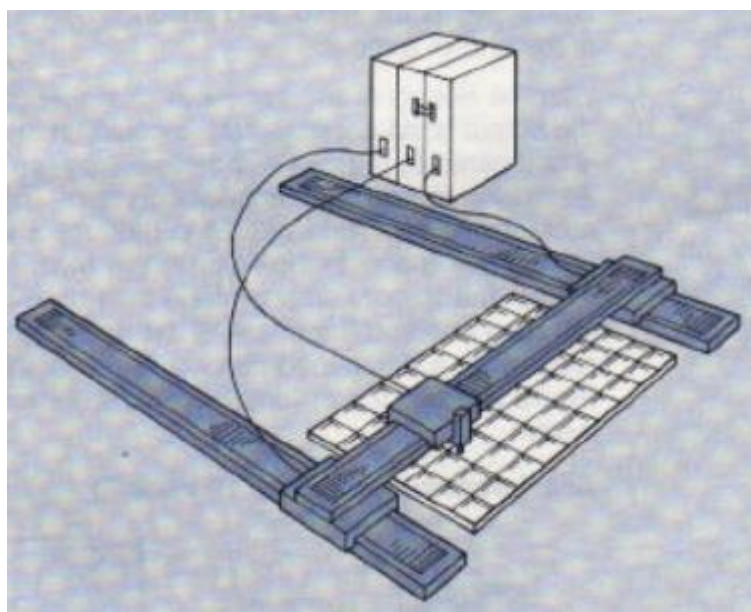
### ➤ Ευθύγραμμοι κινητήρες και ηλεκτρονική:

Η βιομηχανία ημιαγωγών και η τεχνολογία αυτοματισμού σταδιακά χρειάζονται όλο και πιο ακριβείς και γρήγορες μηχανές ώστε να ικανοποιήσουν την αυξανόμενη ζήτηση που αφορά τη μείωση του μεγέθους, την πολύ καλή

ποιότητα και την μείωση του κατασκευαστικού κόστους. Οι ευθύγραμμοι κινητήρες σταδιακά γίνονται όλο και πιο σημαντικοί σε τέτοιες εφαρμογές. Τα κέρδη είναι οι χαμηλές φθορές, η λιγότερη συντήρηση και η μεγαλύτερη παραγωγικότητα. Από την άλλη πλευρά όμως, η αύξηση της παραγωγικότητας είναι εφικτή μόνο όταν η λειτουργία του κινητήρα, το κατασκευαστικό του πλαίσιο, ο έλεγχος του και οι κωδικοποιητές, όπως εκείνοι της θέσης, είναι βέλτιστα προσαρμοσμένα το ένα με το άλλο. Συγκεκριμένα οι κωδικοποιητές πρέπει:

- Να εξασφαλίζουν τα βέλτιστα σήματα των μετρήσεων τους.
- Να μειώνουν τις δονήσεις στο πλαίσιο της μηχανής.
- Να εμποδίζουν την υπερβολική εμφάνιση θορύβου από τους εξαρτώμενους της ταχύτητας ήχους του κινητήρα.
- Να εμποδίζουν την επιπρόσθετη παραγωγή θερμότητας.
- Να επιτρέπουν στον κινητήρα να εμφανίσει τη μέγιστη μηχανική του ικανότητα.

Στο σχήμα 4.4.6 βλέπουμε ένα X-Y σύστημα κίνησης το οποίο είναι κατασκευασμένο με τρεις γραμμικούς κινητήρες. Αποτέλεσμα είναι μέσω του συστήματος αυτού να επιτρέπεται η κίνηση σε δύο διευθύνσεις: και στην οριζόντια και στην κάθετη. Τέτοια συστήματα είναι πολύ χρήσιμα στο χώρο της ηλεκτρονικής και συγκεκριμένα για την κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων καθώς και σε εφαρμογές δισδιάστατης ή τρισδιάστατης εκτύπωσης.



**Σχήμα 4.4.6**, X-Y σύστημα κίνησης με ευθύγραμμους κινητήρες

## 4.5 ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### ➤ Ηλεκτρομαγνητικό σύστημα απογείωσης αεροσκαφών:

Ένας άλλος τομέας στον οποίο μπορούν να εφαρμοστούν οι ευθύγραμμοι κινητήρες είναι σε συστήματα απογείωσης αεροσκαφών γνωστά και ως EMALS( Electromagnetic Aircraft Launch Systems). Σήμερα για την απογείωση ενός αεροσκάφους, η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται αποκλειστικά από την καύση μεγάλων ποσοτήτων καυσίμων. Αυτό μπορεί να περιοριστεί όταν η επιθυμητή πρόωση για την απογείωση γίνει μέσω ηλεκτροκινητήρων και συγκεκριμένα ευθύγραμμων κινητήρων όπως ακριβώς συμβαίνει και στο EMALS.

Σε ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιείται ένας ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας, ο οποίος βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του εδάφους και στην οριζόντια διεύθυνση. Ο στάτης διαθέτει το τριφασικό τύλιγμα ενώ ο δρομέας έχει την δυνατότητα να συνδεθεί απευθείας με το αεροσκάφος(εικόνα 4.5.1).



**Εικόνα 4.5.1** απογείωση αεροσκάφους με χρήση του συστήματος EMALS

Στην εικόνα φαίνεται ένα σύστημα EMALS. Συγκεκριμένα βλέπουμε την μπροστινή ρόδα του αεροσκάφους να στερεώνεται σε μια προεξοχή του δρομέα του ευθύγραμμου κινητήρα. Ο ίδιος ο δρομέας καθώς και ο στάτης εκτείνονται κατά μήκος της τροχιάς απογείωσης και κάτω από το επίπεδο του εδάφους. Όταν ο ευθύγραμμος κινητήρας τροφοδοτηθεί με ηλεκτρικό ρεύμα, ο δρομέας αρχίζει να κινείται. Αποτέλεσμα είναι η προεξοχή του αυτή να

παρασύρει μαζί της και το αεροσκάφος προσδίδοντας του την ίδια ταχύτητα. Όταν η ταχύτητα πλέον του αεροσκάφους έχει την κατάλληλη τιμή, ο κυβερνήτης μπορεί να αποδεσμεύσει τη ρόδα από τον ευθύγραμμο κινητήρα και το αεροπλάνο να απογειωθεί.

Ένας ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας με μήκος 90 μέτρων έχει την ικανότητα να προσδώσει σε αεροσκάφος βάρους 45 τόνων ταχύτητα 240km/h, ικανή ώστε αυτό να απογειωθεί. Το σύστημα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί και για απογείωση αεροσκαφών σε αεροπλανοφόρα. Επειδή όμως απαιτείται μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, δεν τροφοδοτείται ολόκληρο το τύλιγμα του στάτη. Αντιθέτως χωρίζεται σε μικρότερα μέρη και καθένα τροφοδοτείται όταν σε αυτό βρίσκεται το φορτίο τη συγκεκριμένη στιγμή. Επιπλέον επειδή ειδικά στα πλοία τα αποθέματα ενέργειας είναι συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται ειδικές γεννήτριες ώστε να μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και έτσι να τροφοδοτείται ο ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας. Η χρήση τέτοιων συστημάτων προς το παρών δεν είναι εκτεταμένη. Αντιθέτως έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές επιτυχημένες προσπάθειες όπως η απογείωση ενός F-35C στις 18 Νοεμβρίου του 2011.

Μερικά πλεονεκτήματα τους είναι η δυνατότητα επίτευξης υψηλών ταχυτήτων, η εξοικονόμηση καυσίμων, ο περιορισμός των εξόδων για συντηρήσεις και μεγαλύτερο εύρος φορτίων που μπορεί να υποστηρίξει. Αντιθέτως για την απογείωση ενός αεροπλάνου από ένα αεροδιάδρομο απαιτείται η κατανάλωση σημαντικού μέρους των καυσίμων ενώ από ένα αεροπλανοφόρο απαιτείται η χρήση συστημάτων ατμού τα οποία καταναλώνουν 614 kg ατμού ανά απογείωση ενώ παράλληλα διαθέτουν και άλλα μηχανικά και υδραυλικά υποσυστήματα.

### ➤ **Roller Coasters:**



**Εικόνα 4.5.2** Roller Coaster



Τα Roller Coasters είναι τα γνωστά σε όλους τρενάκια των λούνα πάρκ. Πρόκειται για μικρά βαγόνια στα οποία υπάρχουν θέσεις για τους επιβαίνοντες και τα οποία κινούνται πάνω σε ράγες. Οι ράγες αυτές δεν είναι ανάγκη να κλείνουν κάποιο κύκλο. Επιπλέον διαθέτουν μεγάλη ποικιλία ως προς την κλίση τους κατά τη διάρκεια της διαδρομής. Αποτέλεσμα είναι το κάθε βαγόνι να κινείται είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω επιτυγχάνοντας αρκετά υψηλές ταχύτητες.

Η κίνηση του μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ευθύγραμμων κινητήρων. Τα είδη τα οποία συναντάμε κατά επί των πλείστων είναι οι ευθύγραμμοι επαγωγικοί κινητήρες και οι ευθύγραμμοι σύγχρονοι κινητήρες. Με τους ευθύγραμμους κινητήρες μπορούν να εξασφαλιστούν πολύ υψηλές ταχύτητες καθώς και πολύ πιο συναρπαστικές διαδρομές. Με τη χρήση παλαιότερων τεχνολογιών η κίνηση των roller coasters απαιτούσε τη χρήση πολλαπλών καλωδιώσεων, τροχαλιών και τεράστιων αντίβαρων. Επιπλέον οι ταχύτητες τις οποίες επιτύγχαναν ήταν περιορισμένες ενώ αποτελούσαν εφιάλτη και ως προς τις εργασίες συντήρησης. Αντιθέτως η χρήση ευθύγραμμων κινητήρων σε πολλά πάρκα του κόσμου εδώ και 19 χρόνια, έχει αλλάξει ολόκληρη τη βιομηχανία που αφορά τα τρενάκια αυτά. Έχουν γίνει γρήγορα προσδίδοντας μοναδικές εμπειρίες ενώ αν και τα συστήματα αυτά είναι ακριβά ως προς το χειρισμό τους, το αποτέλεσμα το υπερκαλύπτει.



**Εικόνα 4.5.3** σύστημα μεταφοράς αποσκευών σε αεροδρόμιο

Οι ευθύγραμμοι επαγωγικοί κινητήρες χρησιμοποιούν πολλαπλά σετ από ηλεκτρομαγνήτες τοποθετημένους στις ράγες. Ένα κενό αφήνεται μεταξύ του κάθε σετ. Εναλλασσόμενο εφαρμόζεται σε αυτούς δημιουργώντας ένα

μαγνητικό πεδίο. Ένα μεταλλικό στρώμα είναι τοποθετημένο κάτω από το τρένο και στο οποίο η επίδραση του μαγνητικού πεδίου προκαλεί την επιτάχυνση ή επιβράδυνση. Το 1996 στο Kings Island έγινε η πρώτη χρήση ευθύγραμμων επαγωγικών κινητήρων σε roller coasters.

Στους σύγχρονους ευθύγραμμους κινητήρες, ισχυροί, μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο τρένο. Όπως ακριβώς και με τους επαγωγικούς κινητήρες, στις ράγες υπάρχουν ηλεκτρομαγνήτες. Όταν το τρένο προσεγγίζει κάποιο ηλεκτρομαγνήτη στις ράγες, τότε η πολικότητα του προσαρμόζεται ώστε να ασκείται ελκτική δύναμη στο τρένο. Αντιθέτως όταν τον περάσει τότε η πολικότητα του αντιστρέφεται ώστε να το απωθεί. Όπως γίνεται αντιληπτό, πρέπει να υπάρχουν πολλαπλά σετ ηλεκτρομαγνητών κατά μήκος της τροχιάς και οι οποίοι να αλλάζουν πολικότητα πολύ γρήγορα χρησιμοποιώντας κατάλληλα υπολογιστικά συστήματα. Στη Valencia, California υπάρχει το πρώτο roller coaster που χρησιμοποιώντας ευθύγραμμο επαγωγικό κινητήρα έφτασε ταχύτητα 100mph δηλαδή 160km/h.

Κλείνοντας πρέπει να αναφέρουμε ότι ευθύγραμμοι κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε δύο άλλες εφαρμογές: Στις συρόμενες πόρτες και στα συστήματα μεταφοράς χειραποσκευών στα αεροδρόμια (εικόνα 4.5.3) καθώς και στις δύο αυτές περιπτώσεις δεν μας ενδιαφέρει η περιστροφική αλλά η γραμμική κίνηση των φορτίων.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κύριος στόχος της εργασίας αυτής ήταν η παρουσίαση των βασικών αρχών που διέπουν τη λειτουργία των ευθύγραμμων κινητήρων καθώς και τις εφαρμογές που μπορεί να έχουν σε σύγχρονα τεχνολογικά συστήματα.

Οι ευθύγραμμοι ηλεκτροκινητήρες χαρακτηρίζονται από την ευθύγραμμη κίνηση μεταξύ δρομέα και στάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η κίνηση η οποία παράγεται να είναι απευθείας γραμμική χωρίς επομένως να απαιτούνται περεταίρω υποσυστήματα για αυτό. Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με το ότι συμβαίνει στους περιστροφικούς κινητήρες, στους οποίους η κίνηση του δρομέα είναι περιστροφική ως προς το στάτη και συνεπώς δημιουργώντας την ανάγκη ύπαρξης και άλλων μηχανικών μερών για την παραγωγή γραμμικής κίνησης. Αυτή είναι η κύρια λειτουργική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών ειδών ηλεκτροκινητήρων όμως έχουν και μία βασική ομοιότητα. Χαρακτηρίζονται από τους ίδιους κανόνες ηλεκτρομηχανικής μετατροπής. Έτσι συναντάμε ευθύγραμμους κινητήρες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς και σύγχρονους και επαγωγικούς κατά αντιστοιχία με τους περιστροφικούς. Βεβαίως αυτές δεν είναι οι μόνες διαφορές μεταξύ ευθύγραμμων και περιστροφικών κινητήρων. Υπάρχουν περισσότερες οι οποίες έχουν αναλυθεί στην εργασία και αφορούν διαφορές στην απόδοση, στην συμπεριφορά κ.α.

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες χαρακτηρίζονται από μια μεγάλη ποικιλία ως προς τα είδη τους. Καταρχάς έχουμε κινητήρες με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όπως με το στάτη παράλληλο στο δρομέα( επίπεδους ) με μονό ή διπλό διάκενο, σωληνοειδής, με βραχύ πρωτεύον η δευτερεύον. Επιπλέον διαφοροποίηση τους προκύπτει και με βάση τον τρόπο τροφοδοσίας τους, δηλαδή αν τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα( ευθύγραμμοι DC κινητήρες) ή αν τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα( ευθύγραμμοι AC κινητήρες). Στη δεύτερη περίπτωση διακρίνουμε τους σύγχρονους ευθύγραμμους κινητήρες(ΣΕΚ) και τους ευθύγραμμους επαγωγικούς κινητήρες(ΕΕΚ). Λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει το εναλλασσόμενο ρεύμα έναντι του συνεχούς, οι δύο κινητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στις εφαρμογές που απαιτείται γραμμική κίνηση είναι οι ΣΕΚ και ΕΕΚ.

Με αυτόν τον τρόπο οδηγούμαστε στο δεύτερο κομμάτι της εργασίας. Σε αυτό πραγματοποιείται η ανάλυση στους συνήθεις σύγχρονους ευθύγραμμους κινητήρες και στους ευθύγραμμους επαγωγικούς κινητήρες. Χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς Fourier εξάγονται τα ισοδύναμα κυκλώματα λειτουργίας τους ενώ πραγματοποιείται και υπολογισμός των χαρακτηριστικών τους μεγεθών. Αυτά είναι η δύναμη ώθησης τους, η ισχύς τους, η δύναμη ανάρτησης τους και ο βαθμός απόδοσης τους.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος παρουσιάζονται οι εφαρμογές των ευθύγραμμων κινητήρων σε αρκετούς τομείς της τεχνολογίας σήμερα. Η ικανότητα τους για επίτευξη πολύ υψηλών ταχυτήτων τους καθιστά κατάλληλους για εφαρμογές γραμμικής κίνησης όπου απαιτούνται υψηλές

επιταχύνσεις. Αντιθέτως, η πολύ υψηλή ακρίβεια τους επιτρέπει τη χρήση τους σε εφαρμογές χαμηλών επιταχύνσεων αλλά αυξημένης ακρίβειας. Έτσι ευθύγραμμοι κινητήρες χρησιμοποιούνται καταρχάς στον τομέα των μεταφορών. Τα τρένα μαγνητικής ανύψωσης (maglev) αποτελούν την πιο χαρακτηριστική περίπτωση ύπαρξης ευθύγραμμων κινητήρων όμως δεν αποκλείονται και από τα συμβατικά ηλεκτροκίνητα τρένα. Η αυξημένη ακρίβεια λόγω της απουσίας μηχανικών μερών για μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε γραμμική αποτελεί το πιο δυνατό τους πλεονέκτημα για την εισχώρηση τους και στην ιατρική.

Από σύνθετα συστήματα όπως τομογράφοι και χειρουργικά εργαλεία μέχρι πολύ πιο απλά όπως κρεβάτια είτε είδη χρησιμοποιούν ευθύγραμμους κινητήρες είτε υπάρχει προοπτική για να συμβεί κάτι τέτοιο στο μέλλον. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και στο χώρο της βιομηχανίας. Το εύρος της χρήσης τους είναι τεράστιο. Από μηχανές συσκευασίας προϊόντων και ανύψωσης φορτίων ως και στο χώρο της ηλεκτρονικής.

Τέλος ευθύγραμμοι κινητήρες χρησιμοποιούνται και σε πολλά συστήματα που είναι γύρω μας όπως στα τρενάκια των λούνα πάρκ ή στη μεταφορά αποσκευών στα αεροδρόμια. Όμως τα πλεονεκτήματά τους έχουν κάνει τους επιστήμονες να σκέφτονται πως μπορούν να επεκτείνουν τη χρήση τους και σε άλλους τομείς.

Είναι συνεπώς πολύ πιθανόν στο μέλλον πολλές από τα υπάρχοντα τεχνολογικά συστήματα να τροποποιηθούν για λόγους βελτίωσης των δυνατοτήτων τους ή για λόγους εξοικονόμησης χρημάτων και οι ευθύγραμμοι κινητήρες να αποτελούν πλέον τη βάση τους. Δε μένει παρά να δούμε που μπορεί να φτάσει αυτός ο ερχομός των ευθύγραμμων κινητήρων στο προσκήνιο τις τελευταίες δεκαετίες.



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μαρία Γ. Ιωαννίδου, Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών, ΕΜΠ, Αθήνα 2003
- [2] Χρήστος Δ. Παπαγεωργίου, Ευθύγραμμοι Κινητήρες
- [3] Ι.Α Τεγόπουλος, Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β΄, Μόνιμη κατάσταση, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [4] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, Εισαγωγή Στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010
- [5] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, Electric Machinery, McGraw-Hill sixth edition
- [6] Π. Γιαννοπούλου- Λασκαράτου, Θεωρία και Ασκήσεις στις Ηλεκτρικές Μηχανές I & II
- [7] I.Boldea, S.A Nasar, Linear Motion Electromagnetic Devices, Taylor & Francis, USA 2011
- [8] Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003
- [9] Aerotech, Linear Motor Application Guide, United Kingdom 2005
- [10] Α. Μανούδης, Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ψηφιακού Ελεγκτή για Σύγχρονο Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη Γραμμικής Κίνησης, Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη 2009
- [11] Γ.Δ. Λιάλιος, Ευθύγραμμοι Κινητήρες σε Ηλεκτρομαγνητικά Τρένα, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2011
- [12] Ν.Γ. Παπαμακάριος, Transrapid Ηλεκτρομαγνητική Ανάρτηση και Ευθύγραμμοι Κινητήρες στην Υπηρεσία των Μεταφορών, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2011
- [13] Hyung-Woo Lee, Chan-Bae Park, Byung-Song Lee, Thrust Performance Improvement of a Linear Induction Motor, Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 6, 2011
- [14] Xudong Wang, Research on Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Rope-less Hoist System, Journal of Computers, vol. 7, 2012
- [15] R. Hellinger, P. Mnich, Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status and Future Outlook, Proceedings of the IEEE, Vol. 97, November 2009
- [16] S. DeHart, S. Chropa, H. Daepf, Motors
- [17] N. Ahmadinia, The Linear Induction Motor (LIM) & Single Linear Induction Motor (SLIM), American Journal of Electrical Power and Energy Systems. Vol. 3, 2014

- [18] P. Hannifin, J. Barrett, T. Harned, J. Monnich, Linear Motor Basics
- [19] N. Weisenberg, Coasters 101, third edition
- [20] Kinjal K. Patel, A Prototype of a Modular Linear Motor
- [21] J. Gieras, Z. Piech, B. Tomczuk, Linear Synchronous Motors

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ**

- [22] [http://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_motor)
- [23] <http://www.elevatorworld.com/magazine/synchronous/>
- [24] <http://www.productionmachining.com/articles/linear-motors-on-multis>
- [25] <http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf>
- [26] [http://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_induction\\_motor](http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_induction_motor)
- [27] <http://www.explainthatstuff.com/linearmotor.html>
- [28] <http://electrical4u.com/linear-induction-motor/>
- [29] <http://machinedesign.com/linear-motion/difference-between-linear-motors-and-linear-mechanical-devices>
- [30] [http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_Aircraft\\_Launch\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_Aircraft_Launch_System)
- [31] <http://www.parkermotion.com/engineeringcorner/linearmechanics.html>
- [32] <http://www.linearmotiontips.com/linear-motor-vs-ball-screw/>
- [33] <http://www.processonline.com.au/articles/30297-Linear-motors-complement-today-s-linear-motion-technologies>
- [34] [http://www.swewe.net/word\\_show.htm/?321929\\_1&Linear\\_motor](http://www.swewe.net/word_show.htm/?321929_1&Linear_motor)
- [35] <http://www.productionmachining.com/articles/linear-motor-basics>
- [36] [http://www.slideshare.net/Eng\\_Ahmad/linear-motor-in-maglev-train](http://www.slideshare.net/Eng_Ahmad/linear-motor-in-maglev-train)
- [37] <http://www.monorails.org/tmspages/TPTTrVpr.html>
- [38] [http://el.wikipedia.org/wiki/Αξονική\\_τομογραφία](http://el.wikipedia.org/wiki/Αξονική_τομογραφία)
- [39] <http://www.wired.com/2009/08/magnetic-slot-cars/>
- [40] <http://g.elobot.co.uk/thema/anisychia/tomografia-ekpompis-pozitronion-ret-scan-diadikasia>
- [41] <http://www.rundalinearactuators.com/>