Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας ηλεκτρικών βιομηχανικών διατάξεων και συστημάτων αποφάσεων

ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΡΕΝΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γρηγόριος Δ. Λιάλιος

Επιβλέπων : Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2011

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομεας Ηλεκτρικων Βιομηχανικων Διαταξεων
και Συστηματων Αποφασεων

ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΡΕΝΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γρηγόριος Δ. Λιάλιος

Επιβλέπων : Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....
Αθήνα, 2011
.....
Μ. Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π
.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.
.....
Π. Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π

.....

Γρηγόριος Δ. Λιάλιος

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

Copyright © Γρηγόριος Δ. Λιάλιος, 2011.

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 στο τρόπο λειτουργίας ενός ευθύγραμμου, ή αλλιώς, γραμμικού κινητήρα και την εφαρμογή που αυτός έχει στα ηλεκτρομαγνητικά τρένα. Ένας ευθύγραμμος κινητήρας είναι μία ηλεκτρική μηχανή που έχει το στάτη και το δρομέα του ‘ατύλιχτο’ έτσι ώστε αντί να παράγεται ροπή παράγει ευθύγραμμη δύναμη κατά μήκος του.

Αρχικά γίνεται μία γενική εισαγωγή για τους ευθύγραμμους κινητήρες, στα είδη και στα επί μέρους στοιχεία τους.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην εκκίνηση γραμμικού κινητήρα, στη συμπεριφορά της γραμμικής μηχανής ως γεννήτρια και κινητήρας και στα μεταβατικά φαινόμενα που τη διέπουν.

Στη πορεία αναφέρονται τα φαινόμενα τους μαγνητισμού και της μαγνητικής ανύψωσης για να εισάγει την εφαρμογή των ευθύγραμμων κινητήρων στα τρένα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης.

Τέλος γίνεται αναφορά σε διάφορα χαρακτηριστικά που διέπουν την τεχνολογία των μαγνητικών τρένων όπως το προωθητικό σύστημα, οι επικρατούσες μορφές γραμμικών κινητήρων κατά την ηλεκτροκίνηση, καθώς και τις εφαρμογές και την προοπτική των τρένων μαγνητικής αιώρησης.

Λέξεις κλειδιά

Ευθύγραμμος κινητήρας, γραμμική μηχανή, μαγνητισμός, μαγνητική ανύψωση, μαγνητική αιώρηση, μαγνητικά τρένα

Abstract

The aim of this diploma thesis is to present the linear motors and the application of them to maglev (magnetic levitation) trains. A linear motor is an electric motor that has had its stator and rotor "unrolled" so that instead of producing a torque (rotation) it produces a linear force along its length.

Initially becomes a general introduction for the linear motors, the types and their uses.

Afterwards reports the start of a linear motor, in the way of response as motor or generator and the transitional pnenomenon.

The phenomenon of magnetism and magnetic levitation are reported in order to introduce the application of linear motors to the maglev trains.

Finally becomes report to features of maglev trains such as propellant system, the prevailing types of linear motors in the electrification and the applications and prospects of maglev trains.

Key words

Linear motors, linear machine, magnetism, magnetic levitation, maglev trains

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτριά μου Κα. Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την εκπόνιση της παρούσας εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα κοντινά μου πρόσωπα, που με την αμέριστη υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξαν καθόλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου συνέβαλλαν αποφασιστικά στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Στους γονείς μου,

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Ο ευθύγραμμος κινητήρας και τα επί μέρους στοιχεία του

1.1. Εισαγωγή

1.2 Χαρακτηριστικά ευθύγραμμων κινητήρων

1.3 Είδη και μορφές γραμμικών κινητήρων

1.4 Σύγκριση περιστροφικού και ευθύγραμμου κινητήρα

1.5 Οι δυνάμεις στον ευθύγραμμο κινητήρα

1.6 Τα υλικά του ευθύγραμμου κινητήρα

1.7 μετατροπή ευθύγραμμων κινητήρων.

Κεφάλαιο 2

2.1 Εκκίνηση μιας γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος

2.2 Η γραμμική μηχανή συνεχούς ρεύματος ως κινητήρας

2.3 Η γραμμικής μηχανή συνεχούς ρεύματος ως γεννήτρια

2.4 Προβλήματα κατά την εκκίνηση της γραμμικής μηχανής

2.5 Μεταβατικά φαινόμενα κατά τη λειτουργία της γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος

Κεφάλαιο 3:Μαγνητισμός

3.1 Ορισμός

3.2 Μαγνητική επαγωγή

3.3 Μαγνήτες

3.4 Μαγνήτιση

3.5 Μαγνητική διαπερατότητα –μαγνητική επιδεκτικότητα

Κεφάλαιο 4: Μαγνητική Ανύψωση.

4.1 Ορισμός

4.2 Θεώρημα του Earnshaw

4.3 Εξαιρέσεις του Θεωρήματος

4.4 Μέθοδοι Μαγνητικής Ανύψωσης

4.5 Το φαινόμενο του Meissner

4.6 Μαγνητικά Τρένα

Κεφάλαιο 5: Τεχνολογία Μαγνητικών Τρένων

5.1 Οι Επικρατούσες Μορφές Ευθύγραμμων Κινητήρων για την Ηλεκτροκίνηση

5.2 Τύποι Τεχνολογιών Μαγνητικής Ανύψωσης Maglev

5.3 Πλεονεκτήματα Και Μειονεκτήματα Των Διαφορετικών Τεχνολογιών Ανύψωσης

5.4 Προωθητικό Σύστημα –Σταθερότητα-Καθοδήγησης

5.5 Εφαρμογές Και Προοπτική Των Τραίνων Ήλεκτρο-Μαγνητικής Ώθησης Και Ανάρτησης (Maglevs)

Βιβλιογραφία.....

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1) Ο ευθύγραμμος κινητήρας και τα επί μέρους στοιχεία του

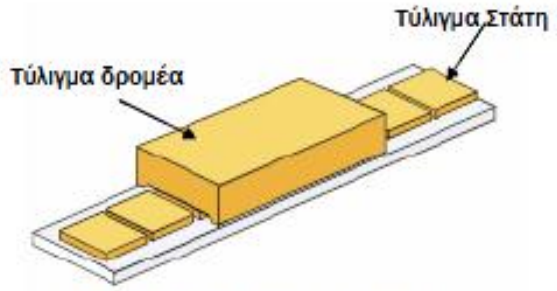
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας των κινητήρων στους οποίους η κίνηση μεταξύ του δρομέα και στάτη είναι ευθύγραμμη καθώς και των σημαντικότερων απ' τις εφαρμογές τους. Στην ξένη βιβλιογραφία οι κινητήρες αυτοί αναφέρονται σαν LINEAR MOTORS, όμως η μετάφραση ως "γραμμικοί κινητήρες" είναι πιστεύω αδόκιμη γιατί μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση όσον αφορά τον τρόπο κίνησης με τη συμπεριφορά της διάταξης από ηλεκτρική άποψη. Βέβαια από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε στους εν λόγω κινητήρες είτε ως γραμμικούς είτε ως ευθύγραμμους και θα εννοούμε το ίδιο ακριβώς πράγμα. Η ανακάλυψη των ευθύγραμμων κινητήρων είναι χρονικά πολύ παλιά και γίνεται σχεδόν σύγχρονα με την ανακάλυψη των περιστροφικών ηλεκτρικών μηχανών.

Εν τούτοις ενώ οι περιστροφικές μηχανές βρίσκουν ένα τεράστιο πλήθος από εφαρμογές που αυξάνουν με τη συνεχώς διευρινόμενη χρήση του ηλεκτρισμού, ο ευθύγραμμος κινητήρας ξεχνιέται για αρκετές δεκαετίες και ξανάρχεται στο φως της επικαιρότητας τις τρεις τελευταίες δεκαετίες. Η σκέψη για τη δημιουργία των πρώτων γραμμικών κινητήρων προήλθε από τη δυσκολία που υπάρχει,σε κάποιες εφαρμογές,να μετατρέπεται η στρεφόμενη κίνηση του εκάστοτε κινητήρα σε γραμμική για την εξυπηρέτηση γραμμικών κινήσεων και φορτίων. Η δυσκολία προκύπτει από τη χρήση γραναζιών, κιβωτίου ταχυτήτων, ειδικού ιμάντα και σε κάποιες περιπτώσεις ειδικών κατασκευών για την μετατροπή της στρεφόμενης κίνησης σε γραμμική. Ένας ακόμη παράγοντας που δυσκολεύει τις παραπάνω μεθόδους είναι και η απαραίτητη μετατροπή όλων των στρεφόμενων μεγεθών μέτρησης στα αντίστοιχα γραμμικά που οδηγεί σε πιο σύνθετη ανάλυση. Έτσι καμία από τις παραπάνω μεθόδους μετατροπής της κίνησης δεν ήταν απόλυτα ακριβής και ικανοποιητική ειδικά σε εφαρμογές που απαιτούσαν απόλυτη ακρίβεια στην γραμμική κίνηση. Για τον σκοπό αυτό διάφοροι ερευνητές προσπάθησαν να δημιουργήσουν κινητήρες που να κινούνται απευθείας στο γραμμικό άξονα.

Οι πρώτοι γραμμικοί κινητήρες βασίστηκαν στην ιδέα ενός κομμένου στη μέση στρεφόμενου κινητήρα και απλωμένου κατά μήκος έτσι ώστε ο πυρήνας (δρομέας) να βρίσκεται ανάμεσα στα τυλίγματα του στάτη δημιουργώντας έναν γραμμικό κινητήρα διπλού διακένου (single-sided flat motor), όπως στο Σχ. 1.2 . Επίσης κατά αντιστοιχία με τους στρεφόμενους κινητήρες, έχουν δημιουργηθεί επωγικοί και σύγχρονοι γραμμικοί κινητήρες ανάλογα με την λειτουργία του δρομέα και του στάτη. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω και με την έξαρση που παρουσιάζει η χρήση γραμμικών κινητήρων την τελευταία δεκαετία, έχουν

δημιουργηθεί διάφορα είδη γραμμικών κινητήρων (επαγωγικοί με τυλίγματα και στο δρομέα και στο στάτη, σύγχρονοι με τυλίγματα είτε στο δρομέα είτε στον στάτη και DC διέγερση ή μόνιμους μαγνήτες αντίστοιχα στο άλλο τμήμα, καθώς και πολλές παραλλαγές αυτών ανάλογα με την χωροθέτηση του δρομέα και του στάτη) όλοι χωρίς ψύκτρες (brushless).

Σχ.1.1 Γραμμικός κινητήρας διπλού διακένου (*double-sided U-channel motor*)



Σχ.1.2 Γραμμικός κινητήρας απλού διακένου (*single-sided flat motor*)

Ωστόσο ο πιο διαδεδομένος τύπος γραμμικού κινητήρα είναι ο σύγχρονος διπλού διακένου (U-channel Σχ. 1.1) με τριφασικό AC τύλιγμα στο δρομέα και μόνιμους μαγνήτες για την DC διέγερση στον στάτη καθώς προσφέρει καλύτερη αξιοποίηση της μαγνητικής ροής στο διάκενο και ευκολία στην κίνηση του δρομέα, όπως θα αναλυθείς καλύτερα παρακάτω.

Η χρησιμοποίηση των γραμμικών κινητήρων αυξάνεται συνεχώς λόγω της συνεχούς βελτίωσης στην απόδοσή τους και τείνουν να αντικαταστήσουν πλήρως τους στρεφόμενους σε όλες τις εφαρμογές που απαιτούν γραμμική κίνηση.

1.2 Χαρακτηριστικά γραμμικών κινητήρων

Όπως γίνεται κατανοητό από όλα τα παραπάνω οι γραμμικοί κινητήρες δεν διαφέρουν ουσιαστικά στον τρόπο λειτουργίας τους από τους γνωστούς στρεφόμενους. Βασίζονται όπως είναι φυσικό στους ίδιους κανόνες μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική

χρησιμοποιώντας την μαγνητική ενέργεια και το μαγνητικό πεδίο ως μέσα αποθήκευσης και σύζευξης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων τους,αντίστοιχα. Οι διαφορές μεταξύ τους οφείλονται κυρίως στην γραμμικότητα της κίνησης και στην επίπεδη κατασκευή των γραμμικών κινητήρων. Αυτό γίνεται άμεσα φανερό και από την διαφορά τους στις μονάδες μέτρησης βασικών μεγεθών (κυρίως όσων εξαρτώνται από το είδος της κίνησης) όπως φαίνεται στον πίνακα 1.1

Μεγέθη	Μονάδες Μέτρησης	
	Γραμμικός κινητήρας	Στρεφόμενος κινητήρας
Ροπή	-	Nm
Δύναμη	N	-
Θέση	m	Deg (rad)
Ταχύτητα	m/sec	rpm
Επιτάχυνση	m/sec^2	Deg/sec^2 (rad/sec^2)

Πίνακας 1.1 Μονάδες μέτρησης βασικών μεγεθών για γραμμικούς και στρεφόμενους κινητήρες

1.2.1 Στοιχεία γραμμικών κινητήρων - Διαφορές με στρεφόμενους

Η γραμμική κίνηση των κινητήρων αυτών είναι αποτέλεσμα κυρίως της επίπεδης κατασκευής (ο δρομέας παράλληλα ή ανάμεσα στον στάτη) τους καθώς η μαγνητική ροή που εμπλέκεται μεταξύ των δύο πεδίων αναγκάζει το δρομέα να κινηθεί γραμμικά σε σχέση με τον στάτη. Ο δρομέας είναι συνήθως στερεωμένος επάνω σε μία ράγα που ολισθαίνει χωρίς να ακουμπάει επάνω από τον στάτη. Με τον τρόπο αυτό καθώς και με την χρήση κατάλληλων λιπαντικών μέσων επιτυγχάνονται χαμηλές τριβές κατά την κίνηση του κινητήρα. Με την κατάλληλη στήριξη του δρομέα δημιουργείται το επιθυμητό διάκενο (μονό ή διπλό) που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των στρεφόμενων μηχανών. Αυτό είναι αποτέλεσμα της κατασκευής των γραμμικών κινητήρων ωστόσο υπάρχουν μέθοδοι αντιμετώπισης των προβλημάτων που αυτό δημιουργεί (κυρίως στο βαθμό απόδοσης).

Για τον ακριβή έλεγχο των γραμμικών κινητήρων είναι απαραίτητος ένας γραμμικός αποκωδικοποιητής θέσης (linear optical encoder), εγκατεστημένος επάνω στον δρομέα, η λειτουργία του οποίου αναλύεται στο κεφ. 1.4. Επειδή στις περιπτώσεις που υπάρχει τροφοδοσία στον δρομέα το καλώδιο που τον συνδέει κινείται μαζί του, πρέπει να είναι κατάλληλα κατασκευασμένο ώστε να αντέχει στις καταπονήσεις αυτές. Στις μέρες μας οι γραμμικοί κινητήρες μπορούν να φτάσουν σε ταχύτητες της τάξης των 5 m/s με πολύ υψηλές επιταχύνσεις που αγγίζουν τα 5 g. Θεωρητικά οι κινητήρες αυτοί θα μπορούσαν να πιάσουν επιταχύνσεις

μέχρι 20 g με ταχύτητες 40 m/s εντούτοις η αντοχή των υλικών περιορίζει αισθητά αυτές τις δυνατότητες.

Σύμφωνα με πειράματα και μελέτες που έχουν γίνει οι γραμμικοί κινητήρες, αν και έχουν μεγαλύτερο διάκενο και άρα χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με τους στρεφόμενους, είναι πιο αθόρυβοι και αξιόπιστοι για εφαρμογές που απαιτούν γραμμική κίνηση. Οι στρεφόμενοι κινητήρες για να χρησιμοποιηθούν σε γραμμικές εφαρμογές απαιτούν την μετατροπή της στρεφόμενης κίνησης σε γραμμική, πράγμα που περιπλέκει την εγκατάσταση και μειώνει την ακρίβεια του συστήματος. Μία βασική διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δύο ειδών κινητήρων είναι ότι οι γραμμικοί έχουν αρχή και τέλος και δεν μπορούν να περιστρέφονται επ αόριστον (το μήκος τους κυμαίνεται από ο,3 έως 2,5 m). Για τον λόγο αυτό οι γραμμικοί οπτικοί αποκωδικοποιητές είναι κατάλληλα ρυθμισμένοι ώστε να στέλνουν ένα μήνυμα όταν ο δρομέας πλησιάζει την αρχή ή το τέλος της διαδρομής του. Τέλος στους γραμμικούς κινητήρες συνηθίζεται ο δρομέας μια είναι πιο πλατύς από τον πυρήνα του στάτη βοηθώντας με τον τρόπο αυτό στην ελαχιστοποίηση της cogging ροπής στους σύγχρονους κινητήρες.

1.2.2 Εφαρμογές των γραμμικών κινητήρων

Με την συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας και των μεθόδων ελέγχου των γραμμικών κινητήρων το κόστος των κινητήρων αυτών, που τα προηγούμενα χρόνια ήταν εμπόδιο για την επιλογή τους, έχει μειωθεί πλέον σημαντικά. Επιπλέον οι εξαιρετικές δυνατότητες που δίνουν οι γραμμικοί κινητήρες στον ακριβή έλεγχο της κίνησής τους καθώς και στις αρκετά υψηλές δυνατότητες τους σε λειτουργία υπό φορτίο τους καθιστούν πλέον αξιόλογους αντιπάλους των στρεφόμενων κινητήρων σε γραμμικές εφαρμογές.

Ένα μειονέκτημα των γραμμικών κινητήρων είναι ότι δεν μπορούν να λειτουργήσουν στον κατακόρυφο άξονα,καθώς λόγω της μη επαφής του δρομέα με τον στάτη, αν ο κινητήρας τεθεί εκτός λειτουργίας ο δρομέας θα κατρακυλήσει και θα χάσει την θέση του. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας του στον κατακόρυφο άξονα με την χρήση κατάλληλου φρένου που δεν θα επιτρέπει να συμβεί το παραπάνω φαινόμενο, θα αυξάνει όμως την πολυπλοκότητα του συστήματος. Έτσι σε περιπτώσεις σχετικά χαμηλού φορτίου και όπου δεν απαιτείται κατακόρυφη κίνηση οι γραμμικοί κινητήρες βρίσκουν στις μέρες μας πολλές εφαρμογές σε βιομηχανίες και εργοστάσια. Υπάρχουν άλλωστε πολύ διαφορετικοί τύποι γραμμικών κινητήρων που μπορούν να καλύψουν κάθε πιθανή εφαρμογή ανάλογα με τις απαιτήσεις και το περιβάλλον εργασίας.

Μία σημαντική και γνωστή εφαρμογή της τεχνολογίας των ευθύγραμμων κινητήρων είναι τα τρένα maglev όπου ένα σύστημα μαγνητών-ηλεκτρομαγνητών κατάλληλα τοποθετημένο στη βάση των βαγονιών και

στις ράγες του τρένου επιβάλλει κάθετη δύναμη και υψώνει το βαγόνι, ώστε η κίνηση του γραμμικού κινητήρα να γίνεται χωρίς τριβές. Τα τρένα αυτά μπορούν να αναπτύξουν πολύ υψηλές ταχύτητες (500 km/h) με χαμηλό επίπεδο θορύβου, άνεση για τους επιβάτες και χαμηλό λειτουργικό κόστος. Ωστόσο το πολύ υψηλό κόστος κατασκευής τα καθιστά απαγορευτικά για μεγάλες αποστάσεις.

1.3 Είδη και μορφές γραμμικών κινητήρων

Οι γραμμικοί κινητήρες έχουν εξελιχθεί σε διάφορες μορφές αλλά οι πιο συνήθεις που έχουν ανακύψει είναι σωληνοειδούς τύπου, επίπεδη ή U CHANNEL οι οποίοι απαντώνται σε αυξανόμενη χρήση χάρη στην υψηλή έξοδο που παράγουν. Μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι περισσότεροι ευθύγραμμοι κινητήρες,για έλεγχο κίνησης,χρησιμοποιούν τεχνολογία χωρίς ψήκτρα.

Ο δρομέας αποτελείται από πηνία και ο 'δρόμος' κατασκευάζεται με την τοποθέτηση μαγνητών στο χάλυβα. Ο δρομέας του κινητήρα περιέχει τις περιελήξεις,την πινακίδα φαινομένου Hall και τις ηλεκτρικές συνδέσεις. Στους κυλινδρικούς κινητήρες, ο δρομέας και ο στάτης απαιτούν περιστροφικό ρουλεμάν, για να υποστηρίξουν τον κινητήρα, και να διατηρήσουν το κενό αέρος ανάμεσα στα κινούμενα μέρη. Κατά τον ίδιο τρόπο οι γραμμικοί κινητήρες απαιτούν ευθύγραμμο οδηγό με ράγες ο οποίος θα διατηρεί τη θέση του δρομέα στο μαγνητικό πεδίο της μαγνητικής τροχιάς. Την ίδια στιγμή οι περιστροφικοί σερβοκινητήρες έχουν κωδικοποιητές τοποθετημένους σε αυτούς για να δώσουν feedback θέσης στον άξονα. Οι ευθύγραμμοι (γραμμικοί) κινητήρες χρειάζονται feedback θέσης στην ευθύγραμμη κατεύθυνση και υπάρχουν αρκετοί linear encoders στην αγορά για αυτή στις μέρες μας. Με τη χρήση γραμμικού αποκωδικοποιητή (linear encoder), η θέση μετριέται κατευθείαν από το φορτίο και αυτό αυξάνει την ακρίβεια της μέτρησης της θέσης.

Ο έλεγχος για τους ευθύγραμμους κινητήρες είναι πανομοιότυπος με αυτόν στους περιστροφικούς κινητήρες. Όπως σε έναν περιστροφικό κινητήρα χωρίς ψήκτρα ο δρομέας και ο δρόμος δεν έχουν καμία μηχανική σύνδεση μεταξύ τους. Σε αντίθεση με τους περιστροφικούς κινητήρες όπου ο δρομέας περιστρέφεται και ο στάτης κρατιέται σταθερός, ένας σύστημα ευθύγραμμου κινητήρα μπορεί έχει είτε το δρομέα είτε το μαγνητικό δρόμο σε κίνηση.

Οι περισσότερες εφαρμογές για ευθύγραμμους κινητήρες, τουλάχιστον στα συστήματα θέσης, χρησιμοποιούν ένα κινούμενο δρομέα και στατικό δρόμο, αλλά στους ευθύγραμμους μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κινούμενο δρόμο και στατικό δρομέα. Στον κινητήρα με κινούμενο δρομέα η βαρύτητα του δρομέα είναι μικρότερη συγκριτικά με το φορτίο. Ωστόσο, υπάρχει η ανάγκη για ένα καλωδιακό σύστημα διαχείρισης με καλώδια που κάμπτονται εύκολα, από τη στιγμή που το καλώδιο πρέπει

να ακολουθεί τον κινούμενο δρομέα. Με έναν κινούμενο δρόμο, ο κινητήρας πρέπει να κινεί το φορτίο συν τη μάζα του μαγνητικού δρόμου. Ωστόσο υπάρχει το πλεονέκτημα ότι κανένα σύστημα καλωδίωσης δεν απαιτείται.

Παρόμοιες ηλεκτρομηχανολογικές αρχές εφαρμόζονται είτε ο κινητήρας είναι γραμμικός είτε περιστροφικός. Η ίδια ηλεκτρομαγνητική δύναμη που παράγει ροπή σε έναν περιστροφικό κινητήρα η ίδια παράγει και στο γραμμικό ανάλογό της.

Ως εκ τούτου, ο ευθύγραμμος κινητήρας χρησιμοποιεί τους ίδιους ελέγχους και προγραμματιζόμενο positioning όπως ο περιστροφικός κινητήρας. Σε ένα περιστροφικό κινητήρα η ροπή μετριέται σε Nm (lb-ft) και στον ευθύγραμμο η δύναμη μετριέται σε N (lb). Η ταχύτητα μετριέται σε rev/min για τους περιστροφικούς και σε m/sec (ft/sec) για τους ευθύγραμμους. Duty cycle μετριέται με τον ίδιο τρόπο και στα δύο είδη κινητήρα.

Ένας ευθύγραμμος κινητήρας μπορεί να είναι, επίπεδος, U-channel (ο σύγχρονος διπλού διακένου), ή σωληνοειδής ως προς το σχήμα. Η διαμόρφωση που είναι πιο κατάλληλη για μία ειδικότερη εφαρμογή εξαρτάται από τις προδιαγραφές και το λειτουργικό περιβάλλον.

Ευθύγραμμοι κινητήρες κυλινδρικού μαγνήτη

Σε αυτούς τους κινητήρες, ο δρομέας είναι κυλινδρικός στην κατασκευή και μετακινούν κινούν πάνω και κάτω μία κυλινδρική ράβδο η οποία έχει μέσα τους μαγνήτες. Αυτοί οι κινητήρες ήταν μεταξύ των πρώτων που βρήκαν εμπορική εφαρμογή αλλά δεν καταλαμβάνουν όλο το χώρο αφήνοντας χαρακτηριστικά για τα άλλα είδη.

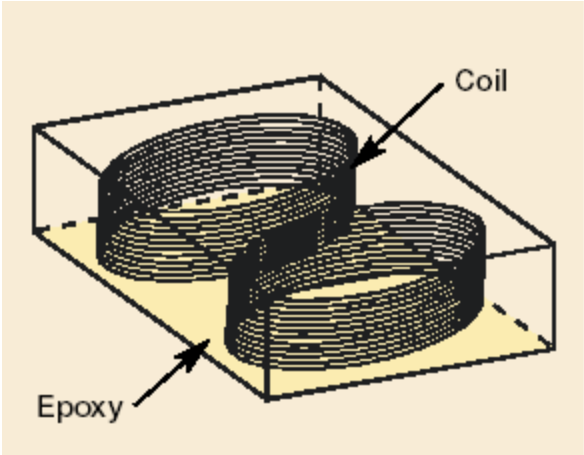
Το μαγνητικό κύκλωμα του ευθύγραμμου κινητήρα κυλινδρικού μαγνήτη είναι όμοιο με αυτό ενός κινούμενου-μαγνήτη ταλαντωτή. Η διαφορά είναι ότι τα πηνία είναι φτιαγμένα για να αυξήσουν το χτύπο. Η περιέληξη των πηνίων αποτελείται τυπικά από 3 φάσεις, με εναλλαγή χωρίς ψήκτρα με τη χρήση συσκευών που βασίζονται στο φαινόμενο Hall.

Ο δρομέας είναι κυκλικός και κινείται πάνω και κάτω στη μαγνητική ράβδο. Αυτή η ράβδος δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές ευαίσθητες στη μαγνητική διαρροή και προστασία πρέπει να ληφθεί για να βεβαιωθεί ότι τα δε γίνεται να παγιδευτούν ανάμεσα στη μαγνητική ράβδο και μία ελκόμενη επιφάνεια. Ένα σημαντικό πρόβλημα με τη σχεδίαση σωληνοειδών κινητήρων εμφανίζεται όταν το μήκος των ταξιδιών αυξάνει. Εξαιτίας του γεγονότος ότι ο κινητήρας είναι πλήρως κυκλικός και ταξιδεύει πάνω και κάτω στη ράβδο, το μόνο σημείο υποστήριξης για τη σχεδίαση είναι στα τέλη. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει πάντα ένα όριο στο μήκος πριν η εκτροπή στη μπάρα κάνει τους μαγνήτες να έρθουν σε επαφή με το δρομέα.

Σύγχρονος διπλού διακένου ευθύγραμμος κινητήρας

Αυτού του τύπου ο ευθύγραμμος κινητήρας έχει δύο παράλληλα μαγνητικά κομμάτια αντικριστά το καθένα με το δρομέα ανάμεσα στις πλάκες. Ο δρομέας υποστηρίζεται στο μαγνητικό δρόμο από ένα σύστημα ρουλεμάν.

Οι δρομείς είναι χωρίς υποστήριξη σιδήρου, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει ελκτική δύναμη και παρασιτικές δυνάμεις ανάμεσα στο δρομέα και το μαγνητικό δρόμο. Η σπείρα χωρίς υποστήριξη σιδήρου έχει μικρή μάζα επιτρέποντας έτσι πολύ υψηλή επιτάχυνση.



Τυπικά, η περιέληξη του τυλίγματος είναι τριφασική με εναλλαγή χωρίς ψήκτρα. Αυξημένη απόδοση μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη συστήματος ψύξης στον κινητήρα. Αυτό το είδος κινητήρα ταιριάζει καλύτερα στη μειωμένη μαγνητική διαρροή εξαιτίας του ότι οι μαγνήτες είναι αντικριστά μεταξύ τους και βρίσκονται σε ένα U' shaped channel.

Αυτό επίσης ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο να παγίδευσης από πολύ δυνατούς μαγνήτες.

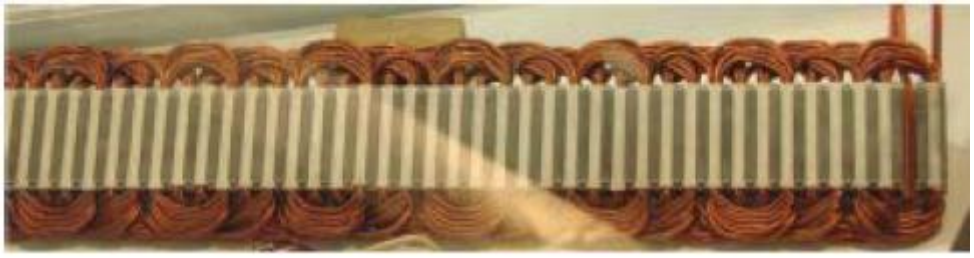
Χάρη στη σχεδίαση του μαγνητικού δρόμου, μπορούν να προστεθούν μαζί για να αυξήσουν το μήκος του ταξιδιού, με μόνο όριο στο μήκος λειτουργίας να είναι το μήκος του καλωδιακού συστήματος.

Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη γραμμικής κίνησης

Ο πιο διαδεδομένος ευθύγραμμος κινητήρας που χρησιμοποιείται για εφαρμογές μεγάλης ακρίβειας σε συνδυασμό με κάποιο ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα οδήγησης είναι ο σύγχρονος με μόνιμους μαγνήτες είτε στο δρομέα είτε στον στάτη και τριφασική περιέλιξη αντίστοιχα στο άλλο τμήμα.

Στις ηλεκτρικές μηχανές μόνιμου μαγνήτη, το πεδίο διέγερσης δημιουργείται από μαγνήτες που βρίσκονται είτε στο στάτη είτε στο δρομέα. Είναι συνηθέστερο να χρησιμοποιούνται τέτοιοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες στο στάτη και περιέλιξη στο δρομέα λόγω του όγκου των περιελίξεων όταν αυτές βρίσκονται στο στάτη. Ωστόσο αυτή η διάταξη έχει το μειονέκτημα ότι το καλώδιο που συνδέεται στο δρομέα πρέπει να ακολουθεί την κίνησή του, δημιουργώντας έτσι ειδικές απαιτήσεις αντοχής για το καλώδιο αυτό.

Χαρακτηριστικό των κινητήρων αυτών είναι ότι το ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς των τυλιγμάτων πρέπει να αλλάζει πολικότητα σε συγχρονισμό με το πεδίο του μαγνήτη έτσι ώστε η παραγόμενη δύναμη να έχει πάντοτε σταθερό πρόσημο. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μετάβαση. Επειδή οι κινητήρες αυτοί δεν έχουν σύστημα συλλέκτη ψυκτρών (brushless), η αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος γίνεται μέσω τη μονάδας οδήγησης και ο συγχρονισμός του κυκλώματος ελέγχου, με τη θέση του δρομέα επιτυγχάνεται μέσω ειδικού αισθητήρα ταχύτητας και θέσης που είναι εγκατεστημένος πάνω στο δρομέα.



Εικ:Περιέλιξη στάτη

Η λειτουργία ωστόσο των κινητήρων αυτών είναι αρκετά απλή και έχει χαρακτηριστικά όμοια με τις κλασικές σύγχρονες μηχανές με τύλιγμα διέγερσης. Μια σημαντική διαφορά παρατηρείται κυρίως ως προς το γεγονός ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσου ελέγχου του πεδίου διέγερσης, καθώς αυτό παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες.

Ανάλογα με το είδος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που επάγεται στα τυλίγματα του στάτη, λόγω της κίνησης του δρομέα, υπάρχουν ημιτονοειδής, τετραγωνικού παλμού και τραπεζοειδής σύγχρονοι μαγνήτες μόνιμου μαγνήτη γραμμικής κίνησης. Επίσης όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν κινητήρες απλού και διπλού διακένου με επιφανειακούς ή εσωτερικά τοποθετημένους μαγνήτες. Οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε σερβοκινητήρια συστήματα και παρουσιάζουν μεγάλες τιμές βαθμού απόδοσης, πυκνότητας ισχύος και τον βαθμό απόδοσης, ενώ η απουσία ψυκτρών μηδενίζει το κόστος συντήρησης. Ωστόσο το κόστος κατασκευής μίας τέτοιας μηχανές αυξάνεται λόγω του υψηλού κόστους και του πλήθους των μόνιμων μαγνητών, του αισθητήρα θέσης και του ψηφιακού ελεγκτή που απαιτείται για την λειτουργία του.

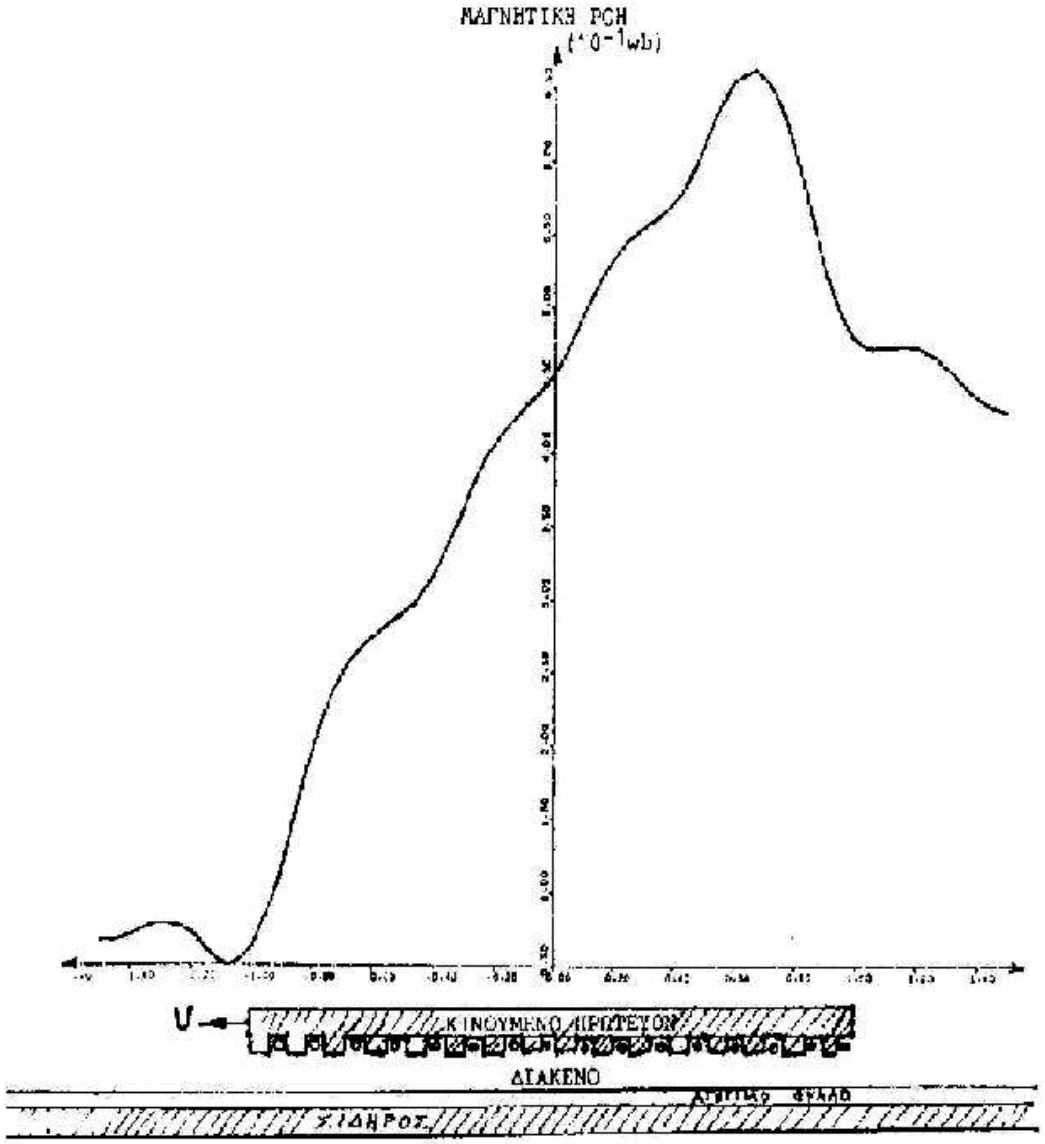
1.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ας θεωρήσουμε ένα περιστροφικό κινητήρα και το ιδεατό ανάπτυγμά του με το οποίο δημιουργείται ο αντίστοιχος ευθύγραμμος κινητήρας, όπως δείχνεται στο σχήμα (1) που προηγήθηκε, και ας επιχειρήσουμε μια κατ' αρχή σύγκριση των δύο κινητήρων. Δηλαδή ας συγκρίνουμε τον περιστροφικό και τον αντίστοιχο ευθύγραμμο κινητήρα, με τις ίδιες γεωμετρικές διαστάσεις (διάκενο, πολικό βήμα, τύλιγμα, κ.λ.π.).

Υπάρχει κατ' αρχή μια διαφορά όσον αφορά τις καμπυλότητες. Δηλαδή στον περιστροφικό κινητήρα οι καμπυλότητες πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι διαφορετικές πράγμα που από αναλυτική μαθηματική άποψη συνεπάγεται ότι οδηγούμαστε σε λύση όρων της σειράς Bessel, ενώ στην περίπτωση του γραμμικούκινητήρα η καμπυλότητα είναι μηδενική πράγμα που σημαίνει ότι οδηγούμαστε σε λύση σειράς Fourier. Όμως η διαφορά που προκύπτει αν στον περιστροφικό κινητήρα εφαρμόζουμε σειρές Fourier αντί Bessel είναι χωρίς μεγάλες συνέπειες γιατί το διάκενο είναι συνήθως πολύ μικρό σε σχέση προς τη μέση διάμετρο (δρομέα και στάτη). Έτσι, η σημαντικότερη διαφορά προέρχεται απ' τα άκρα.

Πραγματικά, ο περιστροφικός κινητήρας δεν έχει άκρα, ενώ ο αναπτυγμένος ευθύγραμμος κινητήρας έχει άκρα και από την άποψη αυτή οι δυο διατάξεις δεν είναι ισοδύναμες. Αμελώντας τα φαινόμενα των διαφορετικών καμπυλοτήτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως ένας περιστροφικός κινητήρας είναι ισοδύναμος με ένα ευθύγραμμο κινητήρα απείρου μήκους στο στάτη και στο δρομέα που επαναλαμβάνεται περιοδικά με μήκος κύματος το μήκος της μέσης περιφέρειας στάτη και

δρομέα. Έτσι στη συνήθη περίπτωση κινητήρα με βραχύ πρωτεύον και σχετική κίνηση μεταξύ δρομέα και στάτη, το βραχύ πρωτεύον, καθώς κινείται αφήνει πίσω του Μαγνητική ροή, η οποία συγκεντρώνεται στο πίσω μέρος της μηχανής. Έτσι η μέση (ενεργός) πυκνότητα μαγνητικής ροής κατανέμεται άνισα όπως φαίνεται στο σχήμα

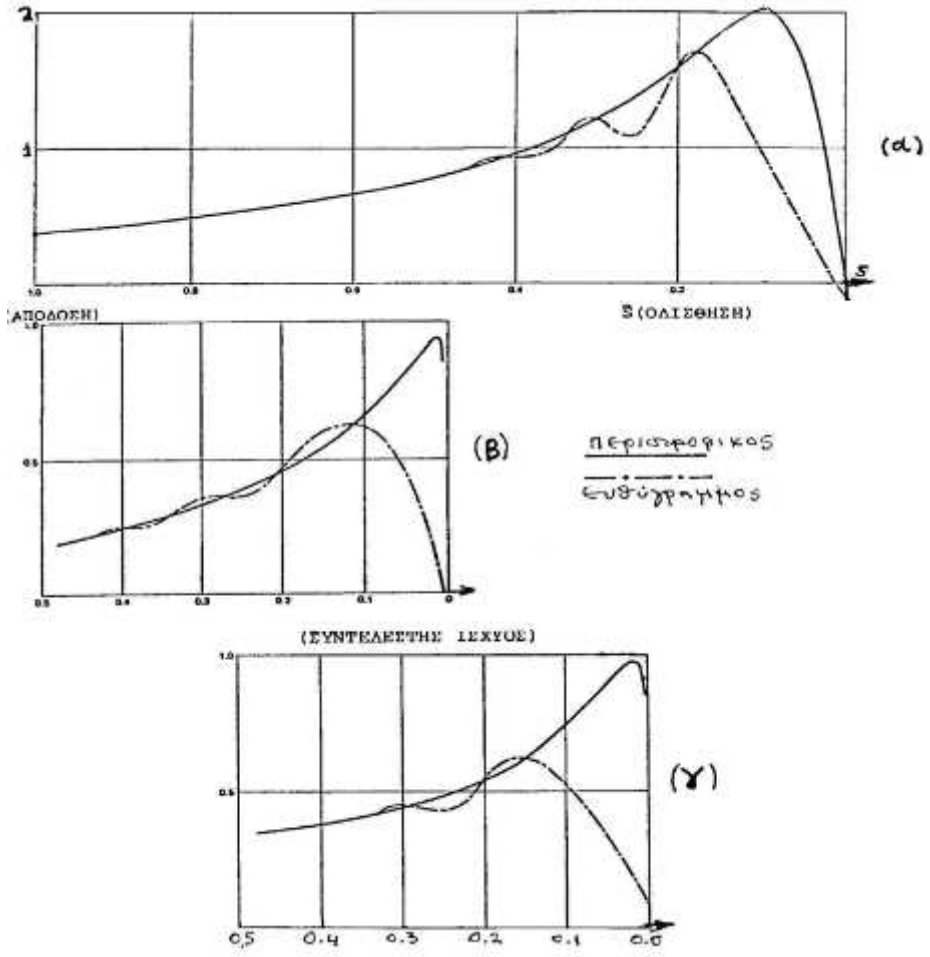


Ενεργός μαγνητική ροή στο διάκενο ευθύγραμμου κινητήρα επαγωγής με βραχύ πρωτεύον

Αυτό βέβαια δεν συμβαίνει στον περιστροφικό κινητήρα όπου η μέση (ενεργός) πυκνότητα μαγνητικής ροής σε κάθε περίπτωση είναι σταθερή σ' όλο το μήκος της περιφερείας του. Αυτή λοιπόν η άνιση κατανομή της ροής δημιουργεί τελικά τις διαφορές στη λειτουργία των περιστροφικών με τους ευθύγραμμους κινητήρες. Τα φαινόμενα αυτά που σχετίζονται με

τα άκρα του ευθύγραμμου κινητήρα (END EFFECTS) και οι επιδράσεις τους στη λειτουργία του είναι ο κύριος λόγος που ο ευθύγραμμος κινητήρας έχει τελικά πολύ χειρότερη ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά απ' ότι ο αντίστοιχος του περιστροφικός κινητήρας.

Στο σχήμα φαίνονται οι χαρακτηριστικές δύο κινητήρων επαγωγής ενός περιστροφικού και ενός ευθύγραμμου για λειτουργία με σταθερό ρεύμα. Οι κινητήρες είναι επαγωγικοί ασύγχρονοι με σύγχρονη ταχύτητα 150m/s για συχνότητα 50Hz και 8 πόλους. Το δευτερεύον και για τους δύο είναι φύλλο αλουμινίου πάχους 10mm.



α) Χαρακτηριστική ωθήσεως - ολισθήσεως για οκταπολικό ευθύγραμμο επαγωγικό κινητήρα με 150m/s σύγχρονη ταχύτητα στα 50Hz, διακεκομμένη μαζί με τη χαρακτηριστική του αντίστοιχου περιστροφικού κινητήρα επαγωγής.

β) Ομοίως χαρακτηριστικές αποδόσεως – ολισθήσεως

γ) και χαρακτηριστικές συντελεστού ισχύος - ολισθήσεως.

Οι κυριότερες διαφορές στις χαρακτηριστικές τους είναι:

• Για το ασταθές τμήμα λειτουργίας του στο ευθύγραμμο κινητήρα υπάρχουν τοπικά μέγιστα και ελάχιστα τα οποία δεν υπάρχουν βέβαια στον περιστροφικό κινητήρα.

• Η μέγιστη ροπή, ο μέγιστος βαθμός αποδόσεως και ο μέγιστος συντελεστής ισχύος του ευθύγραμμου κινητήρα είναι αισθητά ελαττωμένοι σε σχέση με τον περιστροφικό κινητήρα και επιτυγχάνονται σε σχετικά μεγαλύτερες τιμές ολίσθησης

δηλαδή για μικρότερες ταχύτητες.

• Για μηδενική ολίσθηση η δύναμη ώθησης είναι εν γένει διάφορη του μηδενός,

ενώ στον περιστροφικό κινητήρα είναι πάντοτε μηδέν.

• Τέλος για ολίσθηση ίση προς τη μονάδα (δηλαδή για ακίνητο πρωτεύον σε σχέση με το δευτερεύον) οι δύο δυνάμεις είναι περίπου ίσες. Σαν τελικό γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι η συμπεριφορά του γραμμικού κινητήρα είναι χειρότερη απ' τη συμπεριφορά του περιστροφικού κινητήρα και ως προς τη δύναμη ωθήσεως και ως προς την απόδοση και ως προς το συντελεστή ισχύος. Αυτό ήταν ένας από τους βασικούς λόγους που μέχρι τώρα οι εφαρμογές των ευθύγραμμων κινητήρων είναι σχετικά περιορισμένες. Όλη λοιπόν η σχετική θεωρητική και πειραματική προσπάθεια έχει συγκεντρωθεί στη μελέτη και στην ανεύρεση τρόπων εξουδετέρωσης αυτών των φαινόμενων των άκρων και των δυσμενών τους επιδράσεων στην απόδοση του ευθύγραμμου κινητήρα. Ένα βασικό ποιοτικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας ενός οποιουδήποτε κινητήρα είναι ο βαθμός ποιότητας (Goodness factor) G ο οποίος καλείται και μαγνητικός αριθμός Reynolods. Ο αριθμός αυτός είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και δίνεται από τη σχέση :

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

Όπου:

μο= μαγνητική διαπερατότητα του κενού

d= πάχος δευτερεύοντος

σ= η αγωγιμότητα του δευτερεύοντος

g= απόσταση μεταξύ σιδήρου πρωτεύοντος και δευτερεύοντος (gap)

υs= σύγχρονη ταχύτητα

ω= κυκλική συχνότητα διέγερσης

Οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική μηχανή για να έχει μια σχετικά ικανοποιητική λειτουργική συμπεριφορά πρέπει να έχει βαθμό ποιότητας G που να υπερβαίνει τουλάχιστον τον αριθμό 20.

1.5 ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Σ’ ένα περιστροφικό κινητήρα βασικά ενδιαφερόμαστε για τη ροπή περιστροφής του δρομέα, που αντιστοιχεί στον ευθύγραμμο κινητήρα, στη δύναμη πρόωσης. Το πρόβλημα του αν υπάρχουν και άλλες δυνάμεις παρέμεινε τελείως θεωρητικού ενδιαφέροντος για τον περιστροφικό κινητήρα αφού η συμμετρική τοποθέτηση του δρομέα ως προς το στάτη εξισορροπεί τις ακτινικές δυνάμεις και μηδενίζει τις αξονικές. Έτσι μένουν μόνο οι περιφερειακές δυνάμεις που δημιουργούν και τη ροπή περιστροφής που ονομάζεται δύναμη ώθησης και συμβολίζεται με T (Thrust). Σ’ ένα ευθύγραμμο κινητήρα όμως κατ' αρχήν δεν εξισορροπούνται οι "ακτινικές" δυνάμεις οι οποίες, με την ανάπτυξη του περιστροφικού κινητήρα σε ευθύγραμμο, γίνονται όλες συν παράλληλες. Η συνολική αυτή δύναμη είναι ή απωστική (θετική) ή ελκτική (αρνητική) και ονομάζεται δύναμη ανάρτησης και συμβολίζεται με L (Lift).

Μπορούμε να πούμε ότι γενικά και για όλα τα είδη ευθυγράμμων κινητήρων θα Ισχύουν τα εξής όσον αφορά την δύναμη ανάρτησης: Υπάρχουν γενικά δύο αντίθετες δυνάμεις σε όλα τα είδη των ευθύγραμμων κινητήρων:

• Ελκτική δύναμη μεταξύ στάτη και δρομέα, κυρίως σαν αποτέλεσμα της ύπαρξης Σιδήρου στο πρωτεύον και στο δευτερεύον. Η έλξη μεταξύ τους πηγάζει απ' τη γενική αρχή ότι σε κάθε περίπτωση και σε κάθε μαγνητικό κύκλωμα η μαγνητική ροή στο

Διάκενο τείνει να αυξηθεί και το διάκενο να ελαττωθεί.

• Απωστική δύναμη μεταξύ στάτη και δρομέα σαν αποτέλεσμα της ύπαρξης αγώγιμου τμήματος στο δρομέα στον οποίο δημιουργούνται ρεύματα εξ' απαγωγής αντιθέτου φοράς προς τα ρεύματα του στάτη. Η αλληλεπίδραση αυτών των ρευμάτων είναι πάντοτε, απωστική λόγω του κανόνα του Lentz,.

Οι δύο αυτές δυνάμεις ανά μονάδα επιφανείας εκφράζονται ποσοτικά συναρτήσει της καθέτου (Hn) και της εφαπτομενικής (Ht) συνιστώσας της μαγνητικής εντάσεως ως εξής:

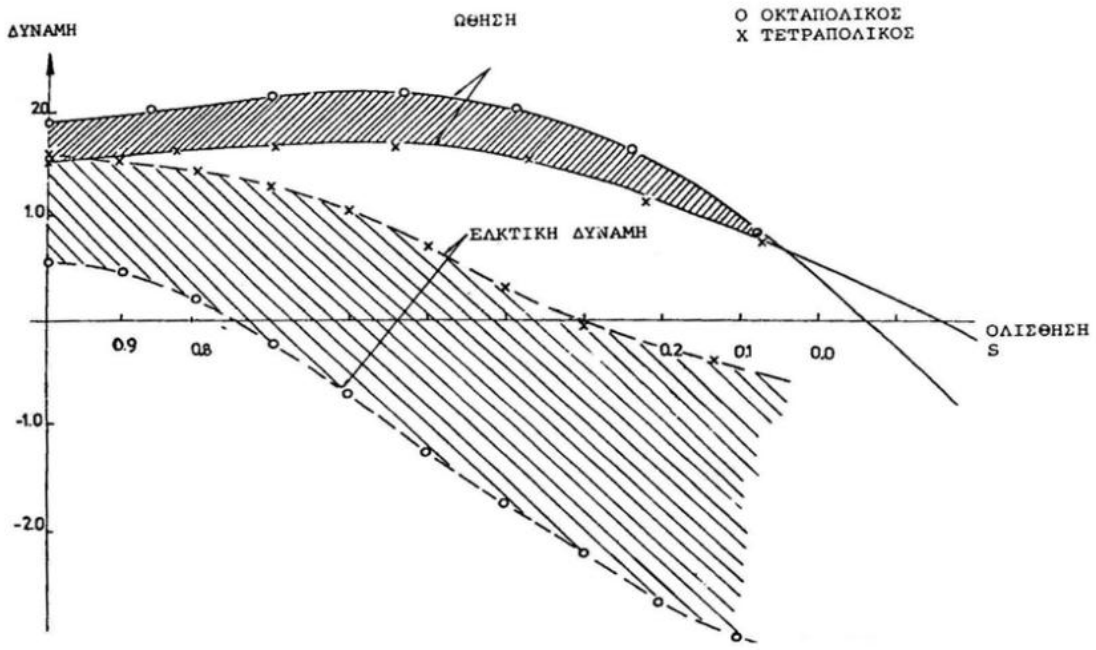
$$F_{ελκτικη/m^2} = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot |\mathbf{H}_n|^2$$

$$F_{απωστικη/m^2} = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot |\mathbf{H}_t|^2$$

Αυτές οι δυνάμεις προκύπτουν απ' την κάθετη συνιστώσα σε επίπεδη επιφάνεια του τανυστού μαγνητικής καταπόνησης του Maxwell.

Άρα στους ευθύγραμμους κινητήρες χωρίς υποστήριξη σιδήρου στο δευτερεύον θα υπερισχύει η απωστική δύναμη, ενώ στους ευθύγραμμους

κινητήρες χωρίς αγωγούς αλλά μόνο με σίδηρο στο δευτερεύον θα υπάρχει μόνον ελκτική δύναμη. Στους κινητήρες με αγώγιμο δευτερεύον και υποστήριξη το πρόσημο της δύναμης εξαρτάται γενικά απ' τα χαρακτηριστικά του ευθύγραμμου κινητήρα, αλλά και από την ολίσθηση. Στο σχήμα (9) φαίνεται η κάθετη δύναμη σαν συνάρτηση της ολισθήσεως σ' ένα ευθύγραμμο επαγωγικό κινητήρα για διάφορες συχνότητες λειτουργίας. Αυτή η κάθετη δύναμη μπορεί να αξιοποιηθεί σ' ένα ευθύγραμμο κινητήρα υποβοηθώντας την δύναμη ανάρτησης λ.χ.



ΣΧΗΜΑ 9

Η ώθηση και η κάθετη δύναμη σε συνάρτηση με την ολίσθηση για ευθύγραμμο επαγωγικό κινητήρα (για τετραπολικό και οκταπολικό ευθύγραμμα κινητήρα, στην ίδια σύγχρονη ταχύτητα).

Εκτός από την δύναμη ανάρτησης υπάρχουν και οι εγκάρσιες δυνάμεις (που αντιστοιχούν στις αξονικές δυνάμεις των περιστροφικών). Οι εγκάρσιες δυνάμεις είναι βέβαια μηδέν αν ο στάτης έχει μία συμμετρική θέση σε σχέση με το δρομέα. Δηλαδή εγκάρσια δύναμη εμφανίζεται όταν το κέντρο του δρομέα απομακρύνεται πλαγίως απ' το κέντρο του στάτη. Το πρόβλημα που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι κατά πόσο αυτή η δύναμη είναι αρνητική (που είναι επιθυμητό), δηλαδή τείνει να επαναφέρει τους άξονες των τυλιγμάτων σε ευθυγράμμιση, ή είναι θετική που αποσταθεροποιεί το σύστημα. Στη δεύτερη περίπτωση χρειάζεται οπωσδήποτε οδήγηση γιατί το σύστημα βρίσκεται σε ασταθή ισορροπία. Σαν γενικό κανόνα μπορούμε να διατυπώσουμε ότι ένα άρτιο πλήθος

παραλλήλων επαγωγικών ευθυγράμμων κινητήρων, εν γένει έχει ευσταθή συμπεριφορά όταν δρα βέβαια στο αυτό δευτερεύον, ενώ το περιττό πλήθος (άρα και ένας απλός κινητήρας μόνον) έχει ασταθή συμπεριφορά ως προς τις εγκάρσιες δυνάμεις.

Εκτός απ' αυτές τις δυνάμεις που συμβολίζονται συνήθως στο σύστημα ανάρτησης με Fy, ενδιαφέρουν και οι τρεις ροπές που δημιουργούνται κατά την περιστροφή περί τους τρεις κύριους άξονες. Δηλαδή οι ροπές περιστροφής ως προς τον άξονα στη διεύθυνση της κίνησης Mx, το εγκάρσιο άξονα My και τον κάθετο άξονα Mz (Roll, Pitch and Yaw moments). Η μελέτη των ροπών υπερβαίνει τα όρια του παρόντος συγγράμματος, μπορούν όμως να μελετηθούν με παρόμοιο τρόπο με τις δυνάμεις με τη χρήση χωρικών Μετασχηματισμών Fourier.

1.6 ΚΥΡΙΑ ΥΛΙΚΑ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται στους Ηλεκτρομαγνητικούς ευθύγραμμους κινητήρες πρόωσης ή ανάρτησης είναι:

- Αλουμίνιο (Al)
- Χαλκός (Cu)
- Σίδηρος (Fe) (χάλυβας ή φύλλα μαλακού σιδήρου).

Οι τιμές της αγωγιμότητας (σ) των υλικών αυτών σε καθαρή μορφή είναι

αντίστοιχα :

Αλουμίνιο = 3,6·107 S/m, Χαλκός = 5,8·107 S/m, Χάλυβας ≅ 106 S/m (1 S=1 Ω-1)

Οι τιμές της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας (μr) είναι αντίστοιχα:

Αλουμίνιο = 1, Χαλκός = 1, Χάλυβας = 100-1000

Σε συναφείς εφαρμογές εμφανίζονται και άλλα υλικά όπως:

- Το μεταλλικό υγρό NaK που χρησιμοποιείται στις αντλίες υγρών μετάλλων (22% Na, 78% K) έχει αγωγιμότητα 2,46·106 S/m,
- Τέλος το θαλασσινό νερό έχει μέση αγωγιμότητα πολύ μικρή, περ. 5.0 S/m.

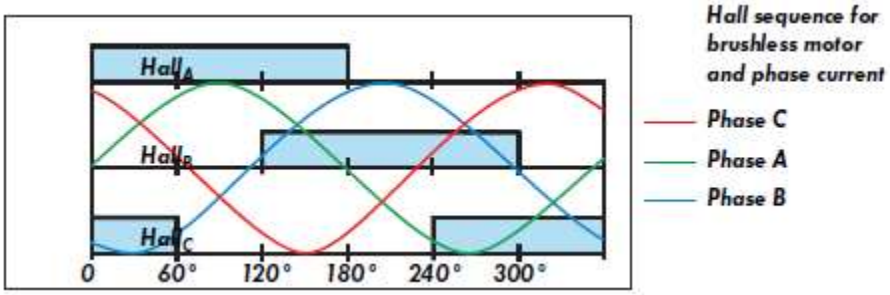
Για τον λόγο αυτό η ηλεκτρομαγνητική πρόωση με ευθύγραμμους επαγωγικούς κινητήρες όπου το δευτερεύον είναι το θαλασσινό νερό είναι όπως θα δούμε προβληματική.

1.7 Μετατροπή Ευθύγραμμων Κινητήρων

Τι είναι μετατροπή(εναλλαγή) και πως αυτή επηρεάζει την απόδοση των ευθύγραμμων κινητήρων; Με τον όρο μετατροπή εννοούμε τη διαδικασία εναλλαγής ρεύματος στις φάσεις για να παράγουν κίνηση. Οι

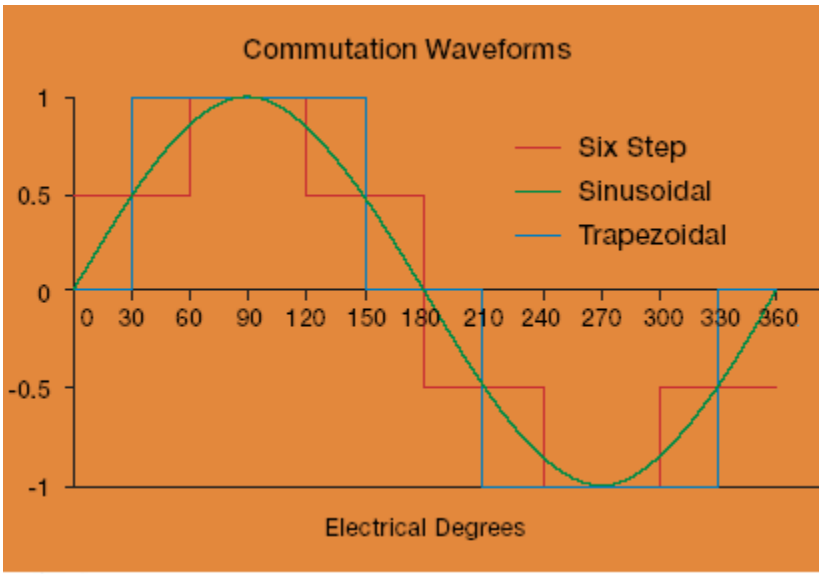
περισσότεροι ευθύγραμμοι κινητήρες σήμερα χρησιμοποιούν μία τριφασική χωρίς ψήκτρα σχεδίαση. Στους κινητήρες με ψήκτρα η μετατροπή είναι εύκολο να κατανοηθεί καθώς οι ψήκτρες επικοινωνούν με τον μετατροπέα ηλεκτρικού ρεύματος και εναλλάσσουν το ρεύμα καθώς ο κινητήρας κινείται. Η τεχνολογία χωρίς ψήκτρα δεν έχει επικοινωνούντα μέρη και επί πλέον είναι περισσότερο αξιόπιστη.

Ωστόσο, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που απαιτούνται για να ελέγξουν το ρείμα στον κινητήρα είναι λιγάκι πιο πολύπλοκα. Η μέθοδος της μετατροπής βασίζεται στην εφαρμογή του κινητήρα, αλλά είναι σημαντικό να καταλάβουμε πως μπορεί να μετατραπεί και τι μειονεκτήματα μερικές μέθοδοι έχουν. Για αρχή ας σκεφτούμε το κινητήρα με ψήκτρα. Όταν το ρεύμα εφαρμόζεται στον κινητήρα, η σωστή εκκαθάριση ενεργοποιείται από τη δύναμη των ψηκτρών που είναι σε επαφή με το μετατροπέα στο σημείο που η περιέλιξη τελειώνει. Καθώς ο κινητήρας κινείται η επόμενη σπείρα στην αλληλουχία θα ενεργοποιηθεί. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι που αυτό μπορεί να επιτευχθεί αλλά με διαφορά ο πιο δημοφιλής είναι με τη χρήση συσκευών του φαινομένου Hall. Υπάρχουν τρεις από αυτές τις συσκευές, μία για κάθε φάση, και δίνουν ένα σήμα που παρουσιάζει τα μαγνητικά πεδία.



Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι μετατροπής διαθέσιμοι στην αγορά: τραπεζοειδής, τροποποιημένος 6 βήματος και ημιτονοειδής. Η τραπεζοειδής μετατροπή είναι η πιο απλή μορφή μετατροπής και απαιτεί ψηφιακές συσκευές Hall που είναι ευθυγραμμισμένες 30 μοίρες ηλεκτρικά από το zero crossing point της φάσης. Σε κάθε σημείο που μία μετάπτωση σήματος Hall λαμβάνει χώρα, η ακολουθία ρεύματος φάσης μεταβάλλεται, ώστε να εμφανίζεται η μετατροπή του κινητήρα.

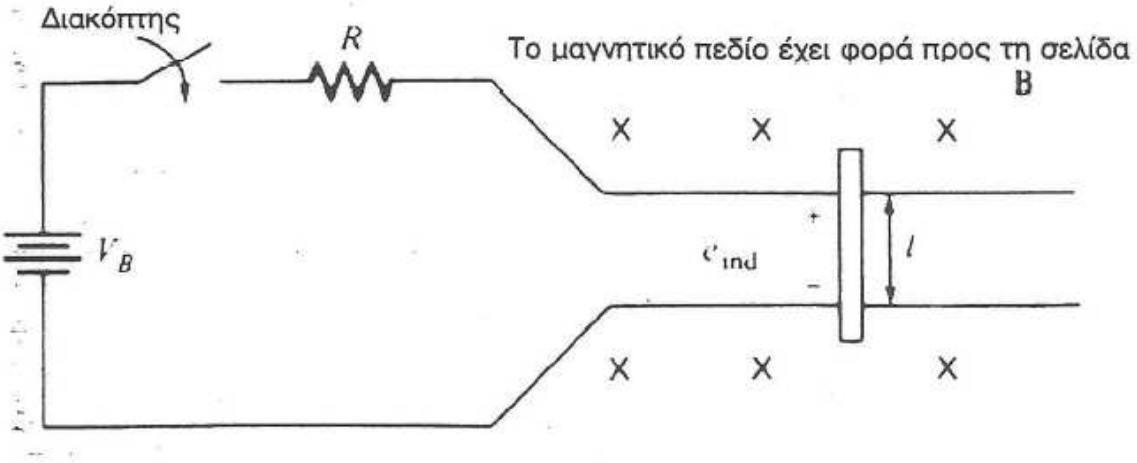
Αυτή είναι η φθηνότερη μορφή μετατροπής και το ρεύμα φάσης του κινητήρα φαίνεται όπως στο άνωθεν διάγραμμα.


Commutation Waveforms
1
0.5
0
-0.5
-1
0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360
Six Step
Sinusoidal
Trapezoidal
Electrical Degrees

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Εκκίνηση μιας γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος

Η γραμμική μηχανή (linear machine) συνεχούς ρεύματος είναι το πιο απλό και ευνόητο μοντέλο των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Λειτουργεί με τις ίδιες αρχές και παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με μια πραγματική γεννήτρια ή κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Έτσι προσφέρει ένα καλό ξεκίνημα για τη μελέτη αυτών των μηχανών. Στο σχήμα 2-1 φαίνεται μια γραμμική μηχανή συνεχούς ρεύματος.



Η γραμμική μηχανή συνεχούς ρεύματος. Το μαγνητικό πεδίο έχει φορά προς το εσωτερικό της σελίδας.

Αυτή αποτελείται από μία πηγή συνεχούς τάσης και από μιαν αντίσταση που συνδέονται μέσω ενός διακόπτη με ένα ζευγάρι ράγες. Οι ράγες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν τριβές. Στην περιοχή των δύο ράβδων υπάρχει ομογενές μαγνητικό πεδίο με επαγωγή που έχει φορά προς τη σελίδα. Μια άλλη αγώγιμη ράβδος είναι τοποθετημένη κάθετα προς τις δύο ράγες.

Πώς συμπεριφέρεται αυτή η περίεργη συσκευή; Η ανάλυσή της θα γίνει με εφαρμογή τεσσάρων βασικών εξισώσεων:

1. Η εξίσωση της δύναμης που επάγεται σε ρευματοφόρο αγωγό όταν αυτός βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο:

$$\mathbf{F = i(l \times B)}$$

Όπου F= η δύναμη στον αγωγό

I= το ρεύμα του αγωγού

L= το μήκος του αγωγού σε μορφή διανύσματος

B= το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής του πεδίου

2. Η εξίσωση της επαγόμενης τάσης στα άκρα κινούμενου αγωγού, όταν αυτός βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο:

$$e_{ind} = (\upsilon \times B) \cdot l$$

Όπου e_{ind}= η τάση στα άκρα του αγωγού

U=η ταχύτητα του αγωγού

B= το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής του πεδίου

l= το μήκος του αγωγού που βρίσκεται μέσα στο πεδίο σε μορφή διανύσματος

3. Ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff. Για τη συσκευή του σχ. 2-1 ο νόμος αυτός δίνει:

$$V_B - iR - e_{ind} = 0$$

4. Ο νόμος του newton για την κινούμενη ράβδο:

$$F_{net} = m\alpha$$

Η συμπεριφορά της απλής γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος αναλύεται χρησιμοποιώντας αυτές τις τέσσερις εξισώσεις ως εργαλεία.

Εκκίνηση μιας γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος. Η μηχανή του σχ. 2-2 ξεκινάει την κίνησή της με το κλείσιμο του διακόπτη. Τότε η κινούμενη ράβδος διαρρέεται από ρεύμα που δίνεται από το νόμο των τάσεων του kirchoff :

$$i = \frac{V_B - e_{ind}}{R}$$

Η ράβδος αρχικά δεν κινείται οπότε ισχύει e_{ind}=0 και η $i=V_B/R$. Όμως γνωρίζουμε ότι σε ένα ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο επάγεται μια δύναμη. Εξαιτίας της γεωμετρίας της μηχανής αυτή η δύναμη είναι

F_{ind}=ilB προς τα δεξιά

Άρα (από το νόμο του Newton) η ράβδος θα επιταχύνεται προς τα δεξιά. Όμως κατά την αύξηση της ταχύτητας της ράβδου εμφανίζεται στα άκρα της κάποια επαγόμενη τάση που για τη συγκεκριμένη γεωμετρία της διάταξης έχει τιμή:

e_{ind} =uBl με φορά προς τα πάνω

η e_{ind} (σύμφωνα με το νόμο των τάσεων του Kirchhoff) προκαλεί μείωση του ρεύματος της ράβδου:

$$i\downarrow = \frac{V_B - e_{ind}\uparrow}{R}$$

Καθώς η e_{ind} αυξάνει το ρεύμα I μειώνεται.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ότι τελικά η ράβδος οδηγείται σε μία κατάσταση ισορροπίας, όπου η ταχύτητά της είναι σταθερή και η συνολική δύναμη που ασκείται πάνω της είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει, όταν η e_{ind} φτάσει την τιμή της V_B . τότε η ράβδος αρχίζει να κινείται με τη σταθερή ταχύτητα που δίνεται από τη σχέση :

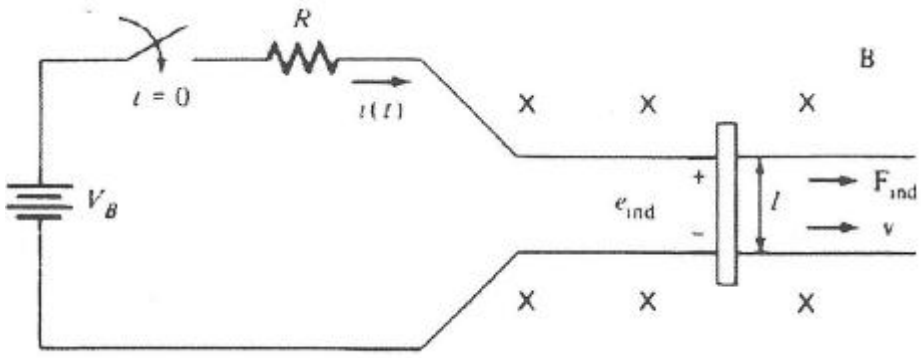
$$V_B = e_{ind} = \upsilon_{ss} Bl$$

$$\upsilon_{ss} = \frac{V_B}{Bl}$$

Η ράβδος συνεχίζει να κινείται με αυτή τη σταθερή ταχύτητα (χωρίς φορτίο) επ άπειρο εκτός, αν μια εξωτερική δύναμη αρχίζει να εμποδίζει την κίνησή της.

Πιο κάτω συνοψίζεται όλη η διαδικασία εκκίνησης μιας γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος.

ΣΧΗΜΑ 2-2: εκκίνηση της γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος.



1. Με το κλείσιμο του διακόπτη εμφανίζεται κάποιο ρεύμα στη ράβδο(i= V_B/R)
2. Εξαιτίας αυτού του ρεύματος, στη ράβδο επάγεται μια δύναμη που δίνεται από την F=ilB.
3. Η ράβδος επιταχύνεται προς τα δεξιά κι έτσι στα άκρα της εμφανίζεται τάση e_{ind}.

4. Αυτή η τάση προκαλεί μείωση του ρεύματος της ράβδου

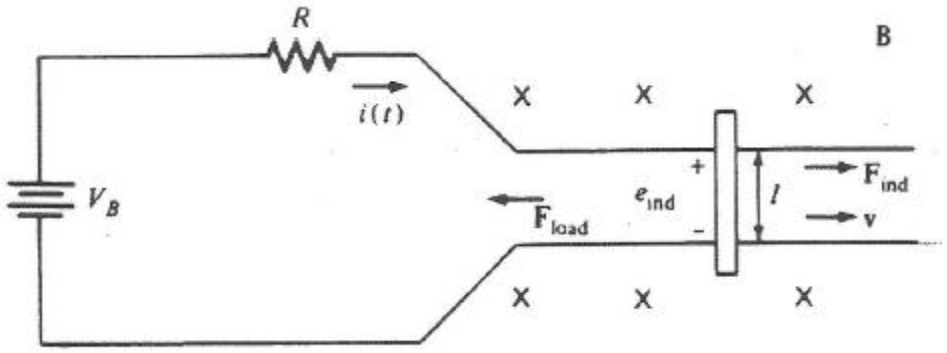
$$i = (V_B - e_{ind}\uparrow)/R$$

5. Έτσι η κινητήρια δύναμη μειώνεται $(F = i\downarrow lB)$ μέχρι να μηδενιστεί. Τότε ισχύουν $e_{ind}= V_B$, i=0 και η ράβδος κινείται με σταθερή ταχύτητα $U_{ss}= V_B/Bl$

   Αυτή ακριβώς η διαδικασία ακολουθείται και κατά την εκκίνηση ενός πραγματικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης.

2.2 Η Γραμμική Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος Ως Κινητήρας

Έστω ότι η γραμμική μηχανή βρίσκεται αρχικά σε κατάσταση ισορροπίας που περιγράφτηκε πιο πάνω. Τότε η ράβδος κινείται με σταθερή ταχύτητα. Τι θα συμβεί, αν εφαρμοστεί κάποιο φορτίο στη μηχανή; Κάτι τέτοιο φαίνεται στο σχήμα 2-3. Μια δύναμη F_{load} εφαρμόζεται στη ράβδο αντίθετα προς την κατεύθυνση κίνησής της. Αφού αρχικά η ράβδος ήταν σε ισορροπία, η εφαρμογή της F_{load} θα προκαλέσει μια συνισταμένη δύναμη με φορά αντίθετη στη φορά κίνησης($F_{ολ} = F_{load} – F_{ind}$)



Σχήμα 2-3: η γραμμική μηχανή ως κινητήρας.

Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της ταχύτητας της ράβδου. Αυτή η μείωση προκαλεί αντίστοιχη μείωση στην τάση που επάγεται στα άκρα της ράβδου. $(e_{ind} = \upsilon\downarrow Bl)$ με την σειρά της η μείωση της τάσης αυξάνει το ρεύμα που διαρρέει τη ράβδο:

$$i\uparrow = \frac{V_B - e_{ind}\downarrow}{R}$$

Τότε η επαγόμενη δύναμη αυξάνεται επίσης $(F_{ind} = i \uparrow l B)$ το τελικό αποτέλεσμα αυτών των διαδοχικών γεγονότων είναι η αύξηση της επαγόμενης δύναμης μέχρι το επίπεδο της εξωτερικής δύναμης (δύναμη φορτίου) και η λειτουργία (κίνηση) της μηχανής σε μια καινούργια κατάσταση ισορροπίας, όπου η τελική σταθερή ταχύτητα είναι μικρότερη από την αρχική (πριν εφαρμοστεί η F_{load}).

Στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ, η επαγόμενη δύναμη έχει φορά προς την κατεύθυνση της κίνησης και η αντίστοιχη ισχύς που μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική (P_{conv}) ώστε η συνολικά δύναμη να διατηρείται σταθερή, δίνεται από τη σχέση :

$$P_{conv} = e_{ind} i = F_{ind} v$$

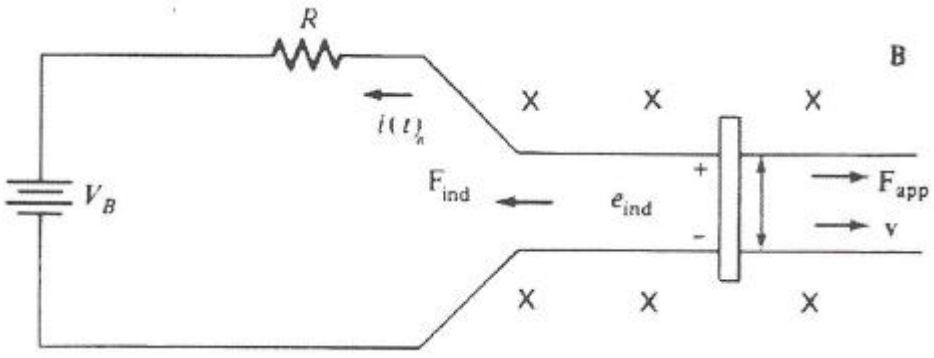
Έτσι ένα ποσό ηλεκτρικής ισχύος ίσο με $e_{ind}i$ καταναλώνεται πάνω στη ράβδο παράγοντας μηχανική ισχύ ίση με $F_{ind}u$. Δηλαδή εδώ συμβαίνει μετατροπή ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική,πράγμα που σημαίνει ότι η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας.

Συνοψίζοντας τη συμπεριφορά της μηχανής η διαδοχή των γεγονότων είναι η εξής:

1. Μια εξωτερική δύναμη F_{load} αντίθετη προς την κατεύθυνση κίνησης εφαρμόζεται στη ράβδο και προκαλεί τη συνιστάμενη δύναμη $F_{ολ}$ προς την ίδια κατεύθυνση.
2. Η επιτάχυνση τώρα είναι αρνητική ($a= F_{net}/m$) κι έτσι η ταχύτητα της ράβδου μειώνεται.
3. Η τάση e_{ind} μειώνεται και το ρεύμα $i=(V_B - e_{ind}\downarrow)/R$ αυξάνεται.
4. Η επαγόμενη δύναμη $F_{ind}=i \uparrow l B$ αυξάνεται μέχρι να γίνει $|F_{ind}|=|F_{ολ}|$ σε μια ταχύτητα μικρότερη από την αρχική.
5. Ένα ποσό ηλεκτρικής ισχύος ($e_{ind}i$) αρχίζει να μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ ($F_{ind}u$) και η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας.

   Ένας πραγματικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης λειτουργεί με εντελώς ανάλογο τρόπο κατά τη φόρτισή του. Όταν στον άξονα του προστίθεται κάποιο φορτίο, η ταχύτητα του αρχίζει να μειώνεται πράγμα που μειώνει την εσωτερική τάση του και αυξάνει το ρεύμα του. Η αύξηση του ρεύματος αυξάνει την επαγόμενη ροπή στον άξονά του, μέχρις αυτή να γίνει ίση με τη

ροπή του φορτίου. Τελικά αυτό συμβαίνει σε μια ταχύτητα μικρότερη από την αρχική.



Σχήμα 2-4 : η γραμμική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.

2.3 Η γραμμικής μηχανή συνεχούς ρεύματος ως γεννήτρια

Έστω ότι η γραμμική μηχανή βρίσκεται αρχικά και πάλι στην κατάσταση ισορροπίας. Αυτή τη φορά στη ράβδο εφαρμόζεται μια δύναμη κατά τη διεύθυνση της κίνησης και γίνονται κάποιες παρατηρήσεις. Η παραπάνω δύναμη επιταχύνει τη ράβδο κατά τη διεύθυνση της κίνησης κι έτσι η ταχύτητά της αυξάνεται. Αυτή η αύξηση προκαλεί αντίστοιχη αύξηση στην e_{ind} η οποία γίνεται μεγαλύτερη από τη V_B. επειδή $e_{ind} > V_B$, το ρεύμα αλλάζει φορά και δίνεται από τη σχέση:

$$i = \frac{e_{ind} - V_B}{R}$$

Αφού το ρεύμα έχει αντίθετη φορά, η επαγόμενη δύναμη που εφαρμόζεται στη ράβδο δίνεται από την $F_{ind} = ilB$ προς τα αριστερά

Η φορά της δύναμης βρέθηκε με τον κανόνα του δεξιού χεριού . όπως φαίνεται εδώ, η επαγόμενη δύναμη είναι αντίθετη προς την εξωτερική δύναμη που εφαρμόζεται στη ράβδο.

Η όλη διαδικασία τελειώνει, όταν το μέτρο της F_{ind} εξισωθεί με το μέτρο της F_{load}. Τότε η σταθερή ταχύτητα της ράβδου αποκτά τιμή μεγαλύτερη από αυτή της αρχικής ταχύτητας. Ας σημειωθεί επίσης ότι η σταθερή πηγή τάσης σε αυτή την περίπτωση φορτίζεται. Η γραμμική μηχανή αυτή τη φορά λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ ($F_{ind}u$) σε ηλεκτρική ($e_{ind}i$).

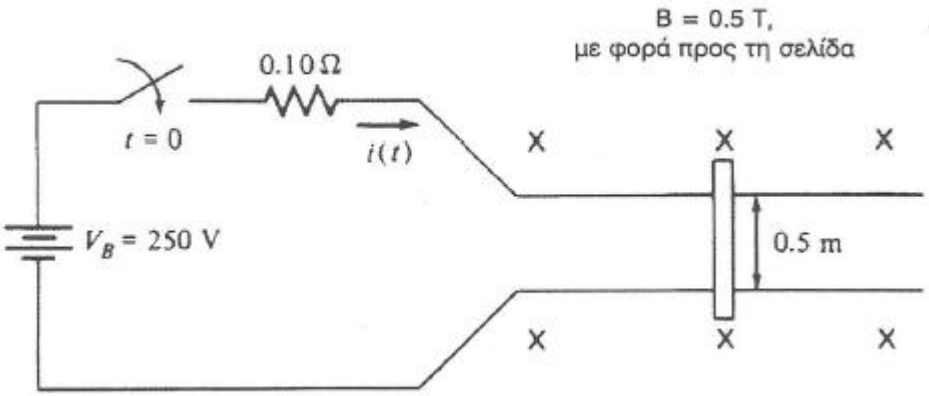
Συνοψίζοντας τη συμπεριφορά της μηχανής η διαδοχή των γεγονότων είναι η εξής:

1. Μια δύναμη F_{app} εφαρμόζεται στη ράβδο προς την κατεύθυνση κίνησης και προκαλεί τη συνιστάμενη δύναμη $F_{ολ}$ προς την ίδια κατεύθυνση.
2. Η επιτάχυνση τώρα είναι θετική ($a= F_{net}/m$) κι έτσι η ταχύτητα της ράβδου αυξάνεται.
3. Η τάση e_{ind} αυξάνεται και το ρεύμα $i=(e_{ind}\uparrow - V_B)/R$ αυξάνεται επίσης.
4. Η επαγόμενη δύναμη $F_{ind}=i\uparrow lB$ αυξάνεται μέχρι να γίνει $|F_{ind}|=|F_{ολ}|$ σε μια ταχύτητα μεγαλύτερη από την αρχική.
5. Ένα ποσό μηχανικής ισχύος ($F_{ind}u$) αρχίζει να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ ($e_{ind}i$) και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.

Μια πραγματική γεννήτρια παράλληλης διέγερσης λειτουργεί κατά τον ίδιο τρόπο : η εξωτερική ροπή στον άξονα της έχει φορά ίδια με τη φορά περιστροφής της, η ταχύτητα του άξονα αυξάνεται και μαζί με αυτή αυξάνεται η τάση που παράγεται στο εξωτερικό της. Τελικά παράγεται κάποιο ρεύμα που τροφοδοτεί το ηλεκτρικό φορτίο.

Μια πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι η ίδια η μηχανή λειτουργεί τόσο ως κινητήρας όσο και ως γεννήτρια. Η μόνη διαφορά είναι ο τρόπος που εφαρμόζεται στη ράβδο η εξωτερική δύναμη. Αν και αυτή η δύναμη έχει φορά κατά τη διεύθυνση κίνησης, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, ενώ αν έχει αντίθετη φορά, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Από ηλεκτρική άποψη η ποιοτική διαφορά είναι η εξής : όταν ισχύει η $e_{ind}> V_B$, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, ενώ, όταν ισχύει η $e_{ind}< V_B$ λειτουργεί ως κινητήρας. Όμως, όπως κι αν συμπεριφέρεται η μηχανή, τόσο η επαγόμενη δύναμη (κινητήρας) όσο και η επαγόμενη τάση γεννήτρια, αναπτύσσονται και στους δύο τρόπους με τους οποίους είναι δυνατόν να λειτουργεί. Αυτό ισχύει τελικά για όλες τις ηλεκτρικές μηχανές. Η καθεμιά έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί και με τους δύο τρόπους. Αυτό που καθορίζει κάθε φορά τον ακριβή τρόπο συμπεριφοράς τους είναι η φορά των εξωτερικών δυνάμεων σε σχέση με την κατεύθυνση της κίνησής τους.

Μια ακόμη σκέψη που πρέπει να γίνει είναι η εξής: η μηχανή που εξετάστηκε, παρουσίαζε μεγαλύτερη ταχύτητα όταν συμπεριφερόταν ως γεννήτρια και μικρότερη στη λειτουργίας ως κινητήρας . όμως και τις δύο φορές η κατεύθυνση της κίνησης ήταν η ίδια. Πολλοί αρχάριοι σπουδαστές θα περίμεναν η μηχανή να κινείται προς τη μια κατεύθυνση στη λειτουργίας ως κινητήρας και προς την άλλη στη λειτουργίας ως γεννήτρια. Όπως φαίνεται, κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Αντίθετα το μόνο που συμβαίνει είναι μια σχετικά μικρή μεταβολή της ταχύτητας της μηχανής.



Σχήμα 2-5 : μια γραμμική μηχανή με αριθμητικές τιμές στα στοιχεία της για την ανάδειξη του προβλήματος που προκαλεί το ρεύμα εκκίνησης.

2.4 Προβλήματα κατά την εκκίνηση της γραμμικής μηχανής

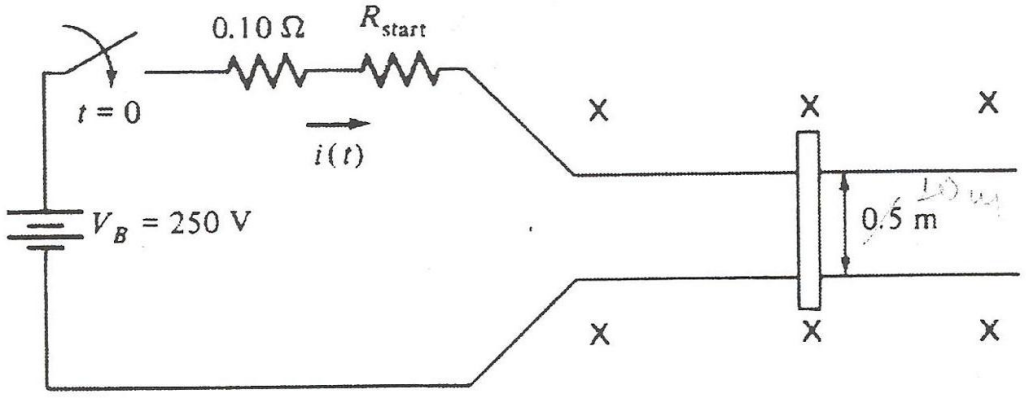
Μία ακόμη γραμμική μηχανή φαίνεται στο σχήμα 2-5. Αυτή τροφοδοτείται από σταθερή πηγή τάσης 250 V και η εσωτερική της αντίσταση R είναι περίπου 0,1Ω. (η αντίσταση R παρουσιάζει την εσωτερική αντίσταση μιας πραγματικής μηχανής συνεχούς ρεύματος κι αυτή του σχήματος έχει μια λογική τιμή για μια μέσου μεγέθους μηχανή συνεχούς ρεύματος).

Δίνοντας τιμές στη μηχανή του σχήματος το ζητούμενο είναι να καταστεί φανερό ένα μεγάλο πρόβλημα των μηχανών συνεχούς ρεύματος (που φαίνεται ακόμη και στα απλοποιημένα μοντέλα τους). Στην αρχική κατάσταση η ταχύτητα της ράβδου είναι μηδενική και ισχύει $e_{ind}=0$. Έτσι το ρεύμα κατά την εκκίνηση θα είναι $i= V_B/R=250/0,1=2500^A$

Αυτό το ρεύμα είναι πάρα πολύ μεγάλο και συχνά φτάνει να γίνεται δέκα φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα της μηχανής στην κανονική λειτουργία. Τέτοια ρεύματα είναι δυνατό να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες σε μία μηχανή.

Πως μπορούν να αποφευχθούν; Ο πιο απλός τρόπος περιορισμού του ρεύματος εκκίνησης είναι η παρεμβολή μιας επιπλέον αντίστασης στο κύκλωμα κατά την εκκίνηση και μέχρι η e_{ind} να γίνει αρκετά μεγάλη, ώστε να περιορίζει το ρεύμα από μόνη της. Στο σχήμα 2-6 φαίνεται η παρεμβολή της αντίστασης εκκίνησης το κύκλωμα της γραμμικής μηχανής.

Το ίδιο ακριβώς πρόβλημα παρουσιάζεται και στις πραγματικές μηχανές συνεχούς ρεύματος και για τη λύση του εφαρμόζεται η ίδια μέθοδος. Δηλαδή η παρεμβολή μιας αντίστασης στο τύλιγμα της μηχανής κατά την εκκίνηση.



Σχήμα 2-6: μια γραμμική μηχανή με την πρόσθετη αντίσταση που ελέγχει το ρεύμα εκκίνησης.

2.5 Μεταβατικά φαινόμενα κατά τη λειτουργία της γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκαν ποσοτικά τα χαρακτηριστικά της γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος, όταν αυτή βρίσκεται στην κατάσταση ισορροπίας. Ακόμη έγιναν κάποιες αναφορές στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των μεταβατικών φαινομένων που εμφανίζονται σε μία τέτοια μηχανή. Σε αυτή την ενότητα αυτά τα μεταβατικά φαινόμενα αναλύονται και ποσοτικά.

Η ύλη αυτής της ενότητας είναι προαιρετική και είναι δυνατό να παραληφθεί χωρίς να χαθεί η συνέχεια.

Ανάλυση της γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ποσοτική ανάλυση της λειτουργίας της απλής γραμμικής μηχανής είναι ακριβώς οι ίδιες που εφαρμόζονται και στην ποιοτικής της ανάλυση. Με αυτές τις εξισώσεις σχηματίζεται μια διαφορετική εξίσωση η λύση της οποίας δίνει την ταχύτητα της μηχανές συναρτήσει του χρόνου. Αρχικά ο νόμος τάσεων του Kirchhoff, όταν εφαρμοστεί στο κύκλωμα του σχήματος 2-1 δίνει :

$$V_B = e_{ind} + iR \quad (2.1)$$

Όπου αγνοείται η αυτεπαγωγή των αγωγών της μηχανής.

Έχουμε $i = \frac{F}{Bl}$, $e_{ind} = \upsilon Bl$ και $F = m\alpha$ η αντικατάσταση των τριών τελευταίων εξισώσεων στην εξίσωση 2.1 δίνει

$$e_{ind} + iR = V_B$$

$$\upsilon Bl + \frac{FR}{Bl} = V_B$$

$$\upsilon Bl + \frac{m\alpha R}{Bl} = V_B$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση ορισμού της επιτάχυνσης στην παραπάνω εξίσωση αυτή παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{mR}{Bl}\frac{d\upsilon}{dt} + Bl\upsilon = V_B$$

$$\frac{d\upsilon}{dt} + \frac{B^2l^2}{mR}\upsilon = \frac{BlV_B}{mR}$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι μια γραμμική διαφορική εξίσωση της μορφής:

$$\frac{dx}{dt} + Ax = B$$

Η λύση μια τέτοιας διαφορικής εξίσωσης μπορεί να βρεθεί σε οποιοδήποτε εγχειρίδιο διαφορικών εξισώσεων και είναι η εξής:

$$x(t) = C_1e^{-At} + C_2$$

Όπου C1 και C2 είναι σταθερές που ορίζονται από τις αρχικές συνθήκες του συγκεκριμένου προβλήματος. Έτσι η λύση είναι η

$$\upsilon(t) = C_1e^{-t/\tau} + C_2$$

Όπου τ είναι η σταθερά χρόνου του συστήματος:

$$\tau = \frac{mR}{B^2l^2}$$

Η σταθερά χρόνου ενός συστήματος αποτελεί μέτρο της απόκρισης του συστήματος στις μεταβολές της εισόδου του. Πιο συγκεκριμένα η σταθερά χρόνου δίνει το χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί το 63,2% της συνολικής μεταβολής από τις αρχικές συνθήκες, πριν το μεταβατικό φαινόμενο αρχίσει, ως το τέλος του μεταβατικού φαινομένου.

Εκκίνηση της γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος. Έστω ότι η γραμμική μηχανή τίθεται σε λειτουργία με το κλείσιμο του διακόπτη και ότι στη ράβδο δεν ασκείται καμιά δύναμη. Επειδή η ράβδος ήταν ακίνητη πριν το κλείσιμο του διακόπτη, η ταχύτητα της αμέσως μετά το κλείσιμό του θα είναι επίσης μηδενική.

Όταν η ράβδος περάσει στην κατάσταση ισορροπίας, η συνολική δύναμη που ασκείται σε αυτή είναι μηδενική. Επειδή η εξωτερική δύναμη στη ράβδο είναι επίσης μηδενική, το παραπάνω γεγονός σημαίνει ότι οι τάσεις

e_{ind} και V_B είναι ίσες μεταξύ τους. Άρα η ταχύτητα της ράβδου στην κατάσταση ισορροπίας θα δίνεται από την :

$$\upsilon(\infty) = \upsilon_{ss} = \frac{V_B}{Bl}$$

Οι παραπάνω αρχικές συνθήκες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορσμό των C1 και C2.

$$\upsilon(0^+) = C_1 + C_2 = 0$$

$$\upsilon(\infty) = C_2 = \frac{V_B}{Bl}$$

$$C_2 = \frac{V_B}{Bl}$$

C1=- V_B/B1

Τελικά η ταχύτητα της γραμμικής μηχανής συναρτήσει του χρόνου δίνεται από τη σχέση:

Όπου το τα έχει τιμή:

$$\tau = \frac{mR}{B^2l^2}$$

Στο σχήμα 2-7^α δίνεται η ταχύτητα αυτή σε συνάρτηση με το χρόνο. Η τάση που επάγεται στα άκρα της ράβδου θα δίνεται από την εξίσωση:

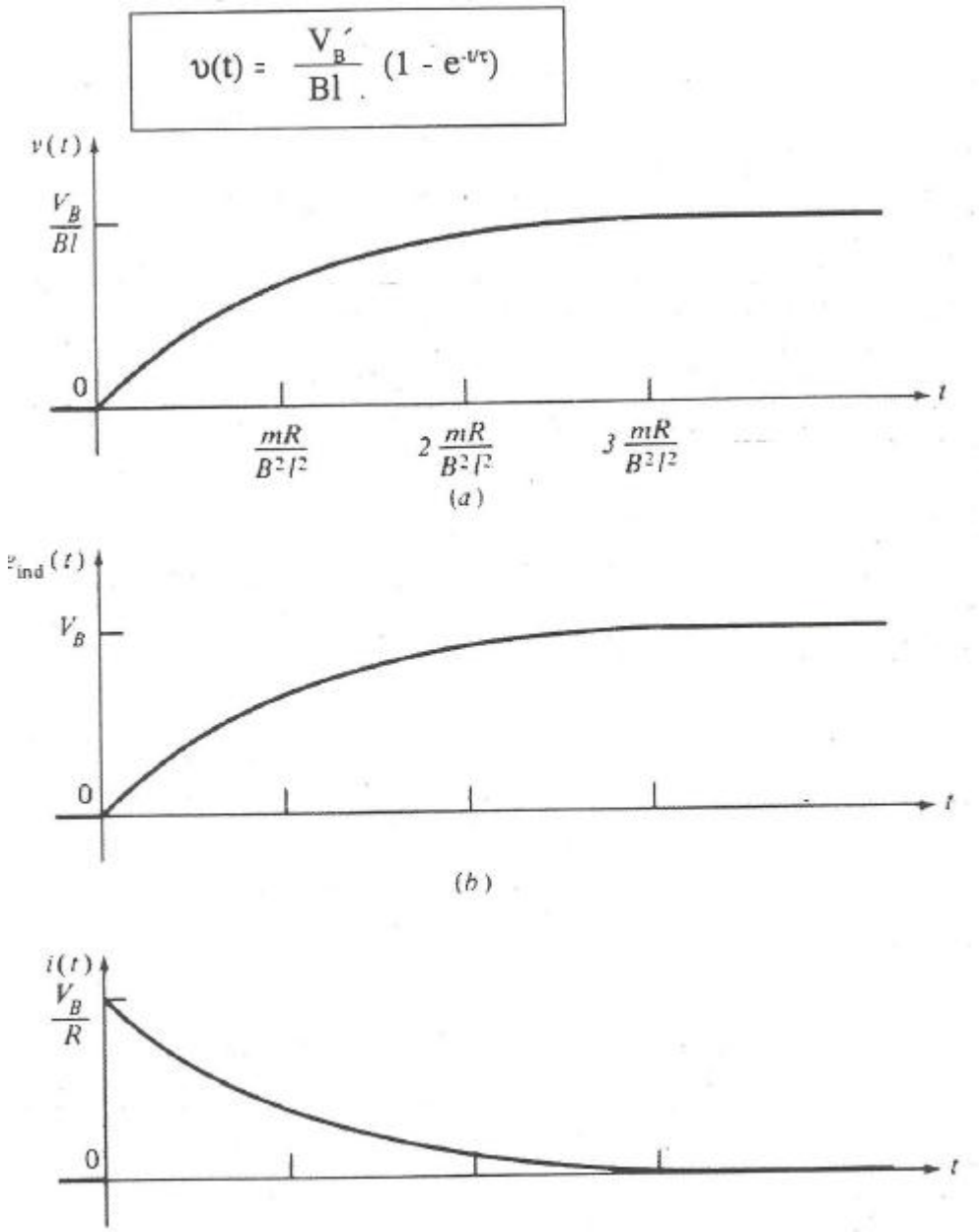
$$e_{ind}(t) = \upsilon Bl = V_B(1 - e^{-t/\tau})$$

Ενώ το ρεύμα της ράβδου δίνεται από την:

$$i(t) = \frac{V_B - e_{ind}}{R}$$

$$= \frac{V_B}{R} e^{-t/\tau}$$

Η επαγόμενη τάση και το ρεύμα της ράβδου σχεδιάζονται συναρτήσει του χρόνου στα σχήματα 2-7β και γ.



Σχήμα 2-7 : γραμμική μηχανή κατά την εκκίνηση. (α) η ταχύτητα u(t) συναρτήσει του χρόνου (β) η επαγόμενη τάση $e_{ind}(t)$ συναρτήσει του χρόνου.(γ) το ρεύμα i(t) συναρτήσει του χρόνου.

Η γραμμική μηχανή ως κινητήρας. Έστω ότι η ράβδος της γραμμικής μηχανής λειτουργεί στην κατάσταση ισορροπίας που περιγράφηκε στα προηγούμενα και ότι στη ράβδο δεν ασκείται καμιά εξωτερική δύναμη. Τι θα συμβεί, αν ξαφνικά εφαρμοστεί κάποια τέτοια δύναμη στη ράβδο; Εξετάζεται η μηχανή του σχήματος 2-3 στην οποία ασκείται μια δύναμη F_{load} με φορά αντίθετη από τη φορά της κίνησής της. Η κάτωθι εξίσωση περιγράφει τη συμπεριφορά της μηχανής:

$$\frac{d\upsilon}{dt} + \frac{B^2l^2}{mR}\upsilon = \frac{BlV_B}{mR}$$

Η λύση αυτής της εξίσωσης είναι:

$$\upsilon(t) = C_1 e^{-t/\tau} + C_2$$

Όπου $\tau = mR/B^2I^{2,}$ ενώ οι C1 και C2 θα πρέπει να προσδιοριστούν:

Η αρχική ταχύτητα της παραπάνω μηχανής είναι ίση με την ταχύτητα στην κατάσταση ισορροπίας:

$$\upsilon(0^+) = \upsilon_{ss} = \frac{V_B}{Bl}$$

Όταν η γραμμική μηχανή φτάνει στη νέα κατάσταση ισορροπίας, η συνολική δύναμη που ασκείται στη ράβδο είναι μηδέν. Επειδή σε αυτή την περίπτωση στη ράβδο εφαρμόζεται μια δύναμη $F_{load,}$ η δύναμη F_{ind} που επάγεται σε αυτή θα πρέπει να είναι ίση και αντίθετη με την εξωτερική δύναμη, οπότε το ρεύμα της ράβδου θα είναι:

$$i_{ss} = \frac{F}{Bl}$$

Αντίστοιχα η επαγόμενη τάση στα άκρα της ράβδου θα έχει τιμή:

$$e_{ind} = V_B - \frac{FR}{Bl}$$

Και η ταχύτητα της ράβδου στη νέα κατάσταση ισορροπίας θα είναι:

$$\upsilon_{ss} = \frac{V_B}{Bl} - \frac{FR}{B^2l^2}$$

Έτσι από τις αρχικές συνθήκες υπολογίζονται οι σταθερές C1 και C2

$$\upsilon(0^+) = C_1 + C_2 = \frac{V_B}{Bl}$$

$$\upsilon(\infty) = C_2 = \frac{V_B}{Bl} - \frac{FR}{B^2l^2}$$

$$C_2 = \frac{V_B}{Bl} - \frac{FR}{B^2l^2}$$

$$C_1 = \frac{FR}{B^2l^2}$$

Οπότε η τελική της λύση είναι:

$$\upsilon(t) = \frac{FR}{B^2l^2}\ e^{-t/\tau} + \left(\frac{V_B}{Bl} - \frac{FR}{B^2l^2}\right)$$

Από την παραπάνω εξίσωση είναι πολύ εύκολος ο προσδιορισμός της επαγόμενης τάσης και του ρεύματος στη ράβδο:

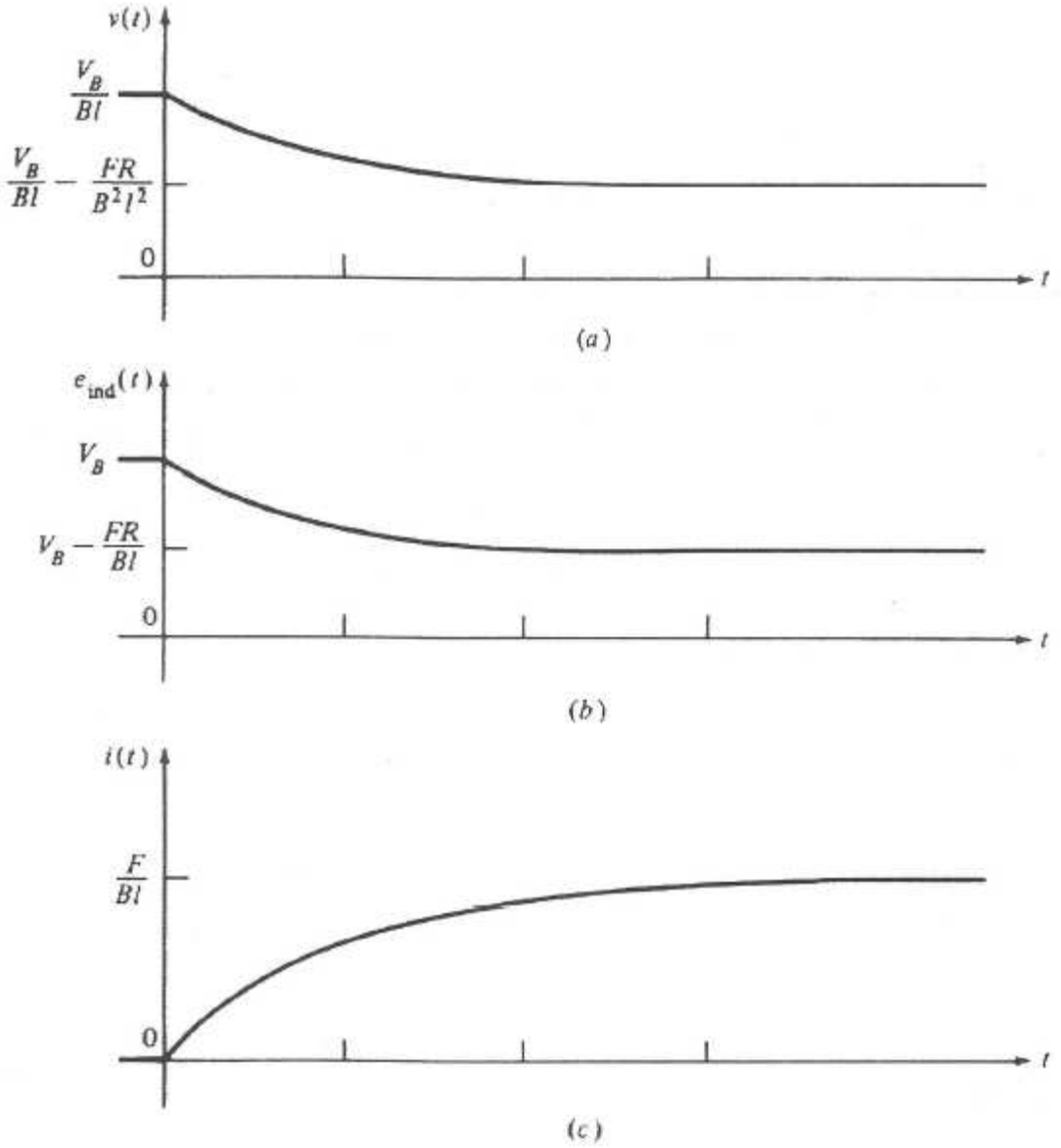
$$e_{ind}(t) = \upsilon Bl = \frac{FR}{Bl}\ e^{-t/\tau} + \left(V_B - \frac{FR}{Bl}\right)$$

$$i(t) = \frac{V_B - e_{ind}}{R}$$

$$i(t) = \frac{F}{Bl}\ (1 - e^{-t/\tau})$$

Στο σχήμα 2-8 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της ταχύτητας, της επαγόμενης τάσης και του ρεύματος της ράβδου μιας γραμμικής μηχανής ως προς το χρόνο.

Είναι φανερό ότι η συμπεριφορά της γραμμικής μηχανής που εκφράζεται από τις παραπάνω εξισώσεις συμπίπτει με τα αποτελέσματα της ποιοτικής ανάλυσης της ενότητας 2.1. αρχικά όταν το φορτίο εφαρμόζεται στη ράβδο, αυτή αρχίζει να επιβραδύνεται απότομα, η επαγόμενη τάση μειώνεται και το ρεύμα αυξάνεται. Το αυξανόμενο ρεύμα παράγει μια δύναμη εξ επαγωγής που αντιτίθεται στην εξωτερική δύναμη και μειώνει το ρυθμό επιβράδυνσης της ράβδου. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η ράβδος να ισορροπήσει. Στη νέα κατάσταση ισορροπίας η ταχύτητα της ράβδου είναι μικρότερη από την αρχική.



Σχήμα 4-8: η γραμμική μηχανή ως κινητήρας που αρχικά χωρίς φορτίο και κατόπιν με φορτίο.

(α) η ταχύτητα u(t) συναρτήσει του χρόνου.

(β) η επαγόμενη τάση $e_{ind}(t)$ συναρτήσει του χρόνου.(γ) το ρεύμα i(t) συναρτήσει του χρόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Στη φυσική με τον όρο μαγνητισμός χαρακτηρίζεται το φαινόμενο στο οποίο κάποια υλικά λεγόμενα μαγνήτες, ασκούν ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις σε άλλα υλικά, οφειλόμενες στην κίνηση ηλεκτρικών φορτίων, καθώς και το σύνολο των φαινομένων που παράγονται από την ιδιότητα αυτή. Τα συγκεκριμένα, εξετάζονται από ιδιαίτερο τμήμα της φυσικής που λέγεται ομοίως μαγνητισμός. Οι ιδιότητες αυτές των μαγνητών αποδίδονται στη συσσώρευση της λεγόμενης μαγνητικής μάζας στους πόλους τους. Κάποια γνωστά υλικά που παρουσιάζουν εύκολα ανιχνεύσιμες μαγνητικές ιδιότητες είναι το νικέλιο, ο σίδηρος, μερικά είδη ατσαλιού (όπως οι σκληροί χάλυβες) και ο ορυκτός μαγνήτης. Βέβαια όλα τα υλικά επηρεάζονται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό από την παρουσία μαγνητικού πεδίου.

Ο μαγνητισμός αποτελεί σημαντικό κομμάτι της σύγχρονης έρευνας και τεχνολογίας. Βλέπουμε εφαρμογές κίνησης, με τη χρήση του μαγνητικού πεδίου στα τρένα μαγνητικής αιώρησης (γνωστά και ως MAGLEV TRAINS), σε κινητήρες, σε πάρα πολλούς τομείς της βιομηχανίας, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στις γεννήτριες ισχύος, στο πείραμα του CERN, κλπ.

Ο ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ

Ο μαγνητισμός αποτελεί ένα μεγάλο κεφάλαιο της φυσικής. Στη σύγχρονη εποχή έχουμε πολλά παραδείγματα και εφαρμογές που ως αρχή λειτουργίας έχουν τη χρήση του μαγνητισμού και των μαγνητικών πεδίων.

Οι εξισώσεις του Μάξγουελ και ο νόμος Biot-Savart

$$d\boldsymbol{B} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\mathbf{J} \times \boldsymbol{r}}{r^3} dV$$

Περιγράφουν την προέλευση και την συμπεριφορά των πεδίων που είναι υπεύθυνα γι αυτές τις δυνάμεις. Έτσι, μαγνητισμός παρουσιάζεται εκεί όπου ηλεκτρικά φορτία είναι σε κίνηση. Αυτό μπορεί να προκύψει είτε από κίνηση ηλεκτρονίων σε ηλεκτρικό ρεύμα, με αποτέλεσμα τον 'ηλεκτρομαγνητισμό' ή στο κβαντομηχανικό σπιν και στην περιστροφή των ηλεκτρονίων στο άτομο, με αποτέλεσμα τους γνωστούς μόνιμους μαγνήτες. Το σπιν των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα είναι δευτερεύον φαινόμενο που μεταβάλλει ελαφρώς το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το σπιν.

3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ

Όταν ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται σε ένα μέσο από ένα ηλεκτρικό ρεύμα, η απόκριση του μέσου είναι η μαγνητική επαγωγή Β. η μαγνητική επαγωγή, που είναι γνωστή και ως πυκνότητα μαγνητικής ροής (flux density), καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ένα υλικό μέσο αντιδρά, όταν βρίσκεται σε χώρο που καταλαμβάνεται από μαγνητικό πεδίο. Όταν στον κενό χώρο δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο, εμφανίζεται η μαγνητική ροή Φ. η μαγνητική ροή μετριέται σε weber(wb). Ο ρυθμός μεταβολής της, μπορεί να μετρηθεί, καθώς παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη Η.Ε.Δ. σε ένα κλειστό κύκλωμα αγωγού, μέσα από το οποίο διέρχεται η ροή.

Ως μαγνητική επαγωγή ορίζεται ως η μαγνητική ροή Φ=1wb, που περνά από επιφάνεια εμβαδού

$$\boldsymbol{B} = \frac{\boldsymbol{\Phi}}{d\boldsymbol{S}} \Leftrightarrow \boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S}$$

Καθώς η μαγνητική ροή είναι ιδιότητα που εξαρτάται από το μέσο, η μαγνητική επαγωγή και αυτή ιδιότητα του μέσου, σε αντίθεση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου η οποία είναι ιδιότητα του χώρου.

Νόμος του Ampere-Μαγνητικό Δίπολο-Μαγνητική Διπολική Ροπή

Σύμφωνα με τον **Ampere,** όταν σε ένα κύκλωμα υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα, τότε στο γύρω χώρο εγκαθίσταται μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται από την τοπολογία του κυκλώματος, δηλαδή τη φορά και την ένταση του ρεύματος. Υποθέτοντας ότι κάθε κύκλωμα αποτελείται από άπειρα στοιχειώδη ρεύματα κάθε ένα από τα οποία συνεισφέρει στο πεδίο, ο Ampere κατέληξε στην παρακάτω σχέση και είναι γνωστή ως νόμος του Ampere (σε ολοκληρωτική μορφή):

Όπου S οποιαδήποτε επιφάνεια περιβάλλεται από την κλειστή καμπύλη C. Στον παραπάνω τύπο χρησιμοποιώντας την καταστατική σχέση

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H}$$

Θα λάβουμε τον τύπο

$$\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu I$$

Η διαφορική διατύπωση του νόμου του Ampere προκύπτει από την

$$\oint_{c} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \oiint_{S} \boldsymbol{J} \cdot d\boldsymbol{S} = I$$

Με τη βοήθεια του θεωρήματος stokes

$$\oint \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = \iint_{S}^{1} \nabla \times \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{S}$$

Προκύπτει η σχέση (σε διαφορική μορφή)

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}$$

Για σταθερή μαγνητική διαπερατότητα μ θα έχουμε

$$\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{J}$$

Από τον τελευταίο τύπο παρατηρούμε ότι το μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίζεται από πηγές curl (κλειστές δυναμικές γραμμές). Στην περίπτωση όμως που ο κλειστός δρόμος C δεν εμπλέκει κανένα ρεύμα θα έχουμε

$$\boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = 0$$

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μονοί μαγνητικοί πόλοι, μόνο βόρειος ή μόνο νότιος αντίστοιχα δεν υπάρχουν. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι πάντα σε ζεύγη και σχηματίζουν πάντα μαγνητικά δίπολα. Αποτέλεσμα της παραπάνω πρότασης αποτελεί το γεγονός ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πάντα κλειστές, δηλαδή ξεκινούν από βόρειο και καταλήγουν σε νότιο πόλο. Εν αντιθέσει, στο ηλεκτρικό πεδίο μπορούμε να έχουμε και ακτινική κατανομή, με δυναμικές γραμμές που καταλήγουν στο άπειρο.

Σε κάθε περίπτωση υπάρχει μία μαγνητική διπολική ροπή m, που σχετίζεται με τη στοιχειώδη οντότητα. Στο βρόχο ρεύματος η μαγνητική διπολική ροπή ισούται με το γινόμενο της έντασης I και της επιφάνειας που οριοθετεί ο βρόχος A.

Στο μαγνητικό δίπολο, το οποίο βρίσκεται σε απόλυτη αντιστοιχία με το ηλεκτρικό δίπολο, η ροπή ισούται με το γινόμενο του μαγνητικού φορτίου ρ με την απόσταση μεταξύ των δύο πόλων. Ο όρος μαγνητικό φορτίο είναι προφανώς μία αφηρημένη έννοια που δεν υφίσταται πραγματικά.

Η μηχανική ροπή τ που ασκείται σε μαγνητικό δίπολο ροπής m, όταν αυτό βρεθεί σε πεδίο επαγωγής B, δίνεται από τη σχέση

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{B}$$

Επομένως στον κενό χώρο η ροπή αυτή θα είναι

$$\boldsymbol{\tau} = \mu_0 \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{H}$$

Ο στοιχειώδης βρόχος ρεύματος είναι και αυτός γνωστός ως μαγνητικό δίπολο. Το πεδίο που δημιουργεί ένας τέτοιος βρόχος σε μεγάλη απόσταση είναι όμοιο με το πεδίο που δημιουργούσε μία υποθετική κατανομή δύο αντίθετων μαγνητικών πόλων ρ σε απόσταση l μεταξύ τους.

3.3 ΜΑΓΝΗΤΗΣ

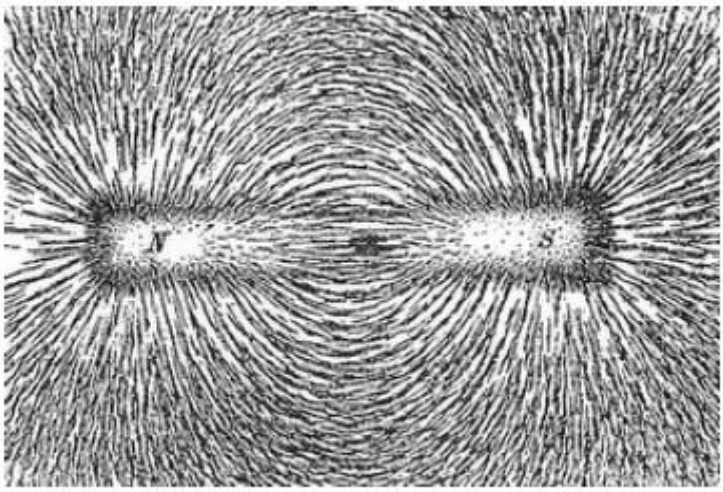
Μαγνήτης ονομάζεται στη φυσική οποιοδήποτε τεμάχιο υλικού ή σώμα, συνήθως μεταλλικό, που δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στον περιβάλλοντα χώρο.

Θεωρητικά το μαγνητικό πεδίο είναι η ύπαρξη μαγνητικών γραμμών στο χώρο. Στην πράξη, το μαγνητικό πεδίο είναι η αλληλεπίδραση του μαγνήτη με άλλα σώματα και έχει τη δυνατότητα να έλκει μικρά ή μεγάλα τεμάχια σιδήρου, ή να προσανατολίζεται παράλληλα με τις δυναμικές γραμμές του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Μαγνητική δυναμική γραμμή ή απλούστερα μαγνητική γραμμή ενός μαγνητικού πεδίου λέγεται η νοητή γραμμή σε κάθε σημείο της οποίας η ένταση του μαγνητικού πεδίου εφάπτεται σε αυτή.

Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι προσανατολισμένες και δείχνουν τη φορά της έντασης του πεδίου. Δεν περιορίζονται μόνο στο εσωτερικό του μαγνήτη αλλά εκχέονται και γύρω από αυτόν με αφετηρία το βόρειο μαγνητικό πόλο, (του πεδίου) και καταλήγουν στο νότιο μαγνητικό πόλο και τερματίζουν.

Πειραματικά οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές μπορούν να γίνουν αντιληπτές στο μαγνητικό φάσμα που δημιουργείται από την διάταξη που λαμβάνουν τα ρινίσματα του σιδήρου. Συνεπώς, οι μαγνητικές γραμμές συμπίπτουν με τις τροχιές που θα μπορούσαν μα κινηθούν ελεύθερα στο χωρικό μαγνητικό πεδίο.



Το φάσμα των μαγνητικών γραμμών, όπως φαίνονται από τα ρινίσματα του σιδήρου

Ο αριθμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών είναι ανάλογος της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Αυτό σημαίνει ότι όσο περισσότερες δυναμικές γραμμές διέρχονται από ένα σημείο του μαγνητικού πεδίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του πεδίου στο σημείο αυτό. Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές θεωρούνται κλειστές και μη τεμνόμενες.

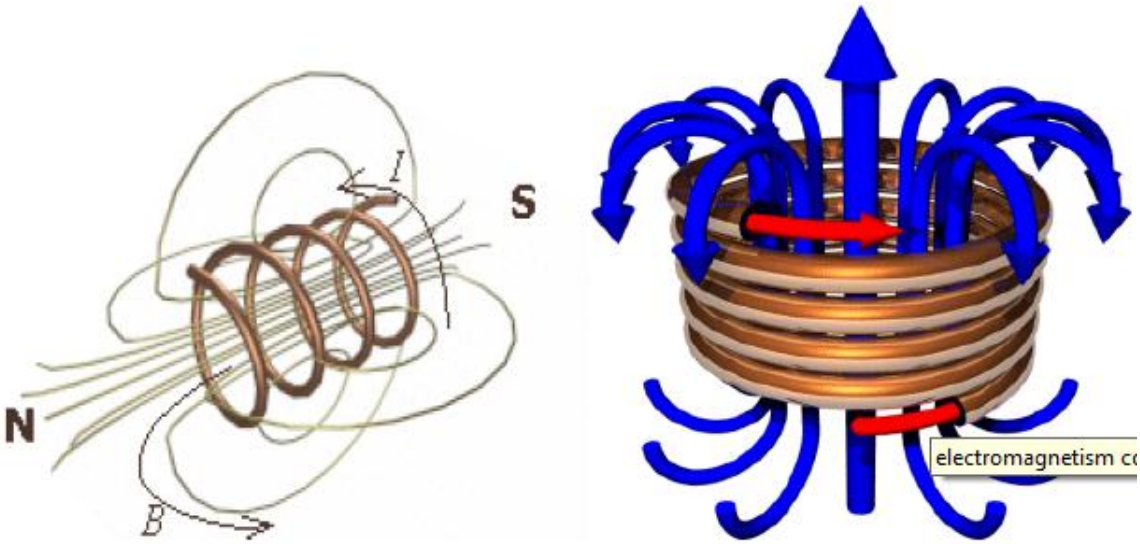
Αυτό σημαίνει ότι από ένα σημείο του πεδίου διέρχεται μία μόνο δυναμική γραμμή. Επίσης, ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που διέρχονται από μια επιφάνεια εμβαδού 1cm2 και έχει τοποθετηθεί κάθετα προς αυτές σε κάποιο σημείο του πεδίου είναι ίσος με την ένταση του πεδίου στο σημείο αυτό.

Οι μαγνήτες διακρίνονται σε φυσικούς και τεχνητούς. Αντίστοιχα οι τεχνητοί σε μόνιμους και παροδικούς (προσωρινούς). Οι φυσικοί μαγνήτες αποτελούν τεμάχια του ορυκτού μαγνητίτη οι ιδιότητες του οποίου ήταν γνωστές στους αρχαίους Έλληνες. Αντίθετα οι τεχνητοί μαγνήτες είναι χαλύβδινα κομμάτια ή κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα, τα οποία αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες μετά από εξωτερική επίδραση μαγνητικού πεδίου. Οι τεχνητοί μαγνήτες κατασκευάζονται σε διάφορα σχήματα. Συνηθέστερες μορφές σχημάτων μαγνητών είναι η ραβδόμορφη, η κυλινδρική, η πεταλοειδής, κλπ.

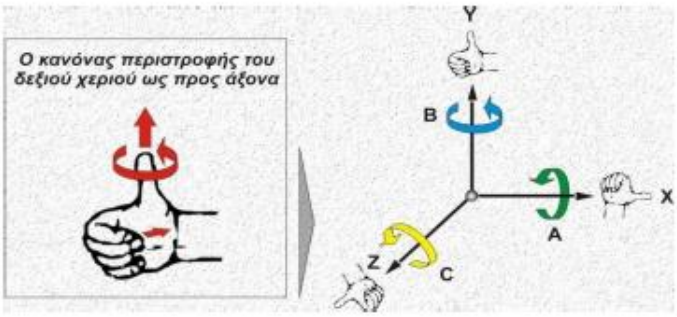
Μπορεί να εμφανιστεί μαγνητικό πεδίο και με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ένα πηνίο. Οι μαγνήτες που λειτουργούν κατά αυτό τον τρόπο ονομάζονται ηλεκτρομαγνήτες και μπορεί να έχουν ή να μην έχουν πυρήνα. Ο πυρήνας αποτελείται συνήθως από ελάσματα ή κομμάτι σιδήρου ή άλλων σιδηρομαγνητικών υλικών, ανάλογα με την χρήση και το κόστος της κατασκευής. Το πηνίο είναι τυλιγμένο περιμετρικά του πυρήνα. Στην τεχνική ορολογία καλείται σιδηροπυρήνας. Η φορά των μαγνητικών γραμμών ορίζεται από τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία. Οι ηλεκτρομαγνήτες έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές, ηλεκτροκινητήρες, γεννήτριες, σε γερανούς ανύψωσης μεταλλικών αντικειμένων, συστήματα απομαγνήτισης (degaussing) κλπ.

Τα άκρα των μαγνητών, όπου είναι εντονότερο το μαγνητικό πεδίο, ονομάζονται μαγνητικοί πόλοι. Η μέση, η μεταξύ των άκρων απόσταση, ονομάζεται ουδέτερη ζώνη και εκεί οι μαγνητικές ιδιότητες σχεδόν μηδενίζονται.

Ως γνωστόν, αν αφήσουμε να περιστραφεί μια μικρή και λεπτή μαγνητική ράβδος, με μορφή βελόνα, όταν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αυτή ισορροπήσει, η διεύθυνση του άξονα της θα είναι τέτοια ώστε το ένα άκρο της να δείχνει πάντα-κατά προσέγγιση-το βόρειο γεωγραφικό πόλο (στην πραγματικότητα το νότιο μαγνητικό πόλο της γης), ενώ το άλλο το νότιο γεωγραφικό πόλο. Το άκρο της βελόνας που στρέφεται προς το βόρειο γεωγραφικό πόλο αποτελεί τον βόρειο πόλο της βελόνας και συμβολίζεται με Ν από το αρχικό της λέξης Nord ενώ το άλλο άκρο της μαγνητικής βελόνας που έχει στραφεί προς το νότιο γεωγραφικό πόλο της γης αποτελεί το νότιο πόλο και το συμβολίζουμε με το S από το αρχικό της λέξης sud.



μαγνητικό πεδίο μέσα σε πηνίο χωρίς σιδηροπύρηνα



Κανόνας δεξιόστροφου κοχλία

Στους πρόσκαιρους (προσωρινούς) μαγνήτες η μαγνητική ενέργεια φεύγει, μειώνεται στη μεγάλη επιφάνεια, όταν το μαγνητικό πεδίο είναι μακριά για πολύ ώρα. Σειρά επίσης πειραμάτων που πραγματοποίησε ο coulomb, για τη μελέτη της συμπεριφοράς μεταξύ των μαγνητών, έδειξαν ότι οι ομώνυμοι πόλοι απωθούνται, ενώ οι ετερώνυμοι έλκονται. Δηλαδή, ο βόρειος πόλος ενός μαγνήτη απωθεί τον όμοιο του άλλου μαγνήτη, ενώ αντίθετα έλκει τον αντίθετο πόλο του άλλου.

Ηλεκτρομαγνήτης με πυρήνα πεταλοειδή. Φαίνονται τα ρινίσματα σιδήρου που έλκει ο Ηλεκτρομαγνήτης

Εικόνα μαγνήτη με τον συμβολισμό των πόλων του και την φορά των μαγνητικών γραμμών

3.4 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

Όπως προαναφέρθηκε, η στοιχειώδης οντότητα του μαγνητισμού είναι το μαγνητικό δίπολο. Με τον όρο αυτό συμπεριλαμβάνουμε τόσο τους στοιχειώδεις βρόχους ρεύματος, όπως είναι αυτοί που προκαλούνται από την ιδιοπεριστροφή των ασύζευκτων ηλεκτρονίων, όσο και το μαγνητικό ισοδύναμο του δίπολου.

Μαγνήτιση ονομάζεται η διαδικασία (τρόπος) μετάδοσης των ιδιοτήτων του μαγνήτη σε μεταλλικά ή μαγνητικά υλικά.

Η μαγνήτιση μπορεί να γίνει εξ επαφής, εξ επαγωγής και από μηχανικές παραμορφώσεις. Η μαγνήτιση εξ επαφής, γίνεται με την επαφή μαλακού σιδήρου ή χαλύβδινου τεμαχίου με τον πόλο ενός μαγνήτη, οπότε ο μαλακός μαγνήτης ή το χαλύβδινο τεμάχιο αποκτά μαγνητικές ιδιότητες, εμφανίζοντας δηλαδή δύο πόλους εκ των οποίων αυτός που είναι προς επιδρώντα μαγνήτη να είναι ετερώνυμος εκείνου.

Η μαγνήτιση εξ επαγωγής, δημιουργεί τα ίδια παραπάνω αποτελέσματα με τη διαφορά ότι αυτή γίνεται από κάποια απόσταση με μαγνήτη, είτε εάν το τεμάχιο του χάλυβα ή του μαγνητικού σώματος τοποθετηθεί ή βρεθεί, μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η μετάδοση των μαγνητικών ιδιοτήτων με τον τρόπο αυτό ονομάζεται μαγνητική επαγωγή ή μαγνήτιση εξ επαγωγής.

Μαγνήτιση μπορεί να προκληθεί από μηχανές παραμόρφωσης (κάμψης, διάτασης, κρούσης, ρίψεις,κλπ.) που μπορεί να υποστεί τεμάχιο μαλακού σιδήρου ή χάλυβα.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στις μαγνητικές ιδιότητες της ύλης χαρακτηρίζεται περίπλοκη. Ερευνήθηκες από τον Κιουρί και οι νόμοι του αναφέρονται σε σχετική παράγραφο.

Όπως αναφέρθηκε η στοιχειώδης οντότητα του μαγνητισμού είναι το μαγνητικό δίπολο. Με τον όρο αυτό συμπεριλαμβάνουμε τόσο τους στοιχειώδεις βρόχους ρεύματος, όπως είναι αυτοί που προκαλούνται από την ιδιοπεριστροφή των ασύζευκτων ηλεκτρονίων, όσο και το μαγνητικό ισοδύναμο του ηλεκτρικού διπόλου.

Λόγω της μαγνητικής διπολικής ροπής, τα μαγνητικά δίπολα σε ένα υλικό τείνουν να προσανατολιστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε το παραγόμενο από αυτά πεδίο να είναι παράλληλο στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο. Στο σημείο αυτό μπορούμε να ορίσουμε το μέγεθος της μαγνήτισης ως τη μαγνητική διπολική ροπή m ανά μονάδα όγκου ενός υλικού μέσου

$$\boldsymbol{M} = \frac{\boldsymbol{m}}{V}$$

Για να συσχετίσουμε την μαγνήτιση με το μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής θα σκεφτούμε ως εξής: έστω ραβδόμορφος μαγνήτης μήκους l (θεωρούμε ότι οι δύο πόλοι του μαγνήτη είναι συγκεντρωμένοι στα άκρα του), με εμβαδό διατομής s και Φn η μαγνητική ροή στο κέντρο του. Η μαγνητική ροή τότε δίνεται από τη σχέση

$$\boldsymbol{m} = \frac{\Phi_n l}{\mu_0}$$

Από τους δύο παραπάνω τύπους καταλήγουμε για τη μαγνήτιση

$$m = \frac{\Phi_n}{S\mu_0}$$

Λόγω, όμως, του ορισμού της μαγνητικής επαγωγής ως πυκνότητα μαγνητικής ροής ανά μονάδα επιφάνειας

$$\Phi = \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S}$$

Καταλήγουμε στην

$$\boldsymbol{M} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0}$$

Στην περίπτωση αυτή δε λάβαμε υπόψη την ύπαρξη εξωτερικών συμβατικών ηλεκτρικών ρευμάτων που θα δημιουργήσουν μαγνητικό πεδίο. Έτσι, η μαγνητική επαγωγή δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{M}$$

Η μαγνητική επαγωγή στο κενό είναι $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ ενώ με την σύμβαση που ακολουθούμε η συνεισφορά από τη μαγνήτιση του υλικού είναι $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{M}$.η μαγνητική επαγωγή λοιπόν, θα είναι απλά το διανυσματικό άθροισμα των δύο μεγεθών. Είναι προφανές ότι τόσο η μαγνήτιση Μ, όσο και η παρουσία εξωτερικού πεδίου Η συνεισφέρουν στη μαγνητική επαγωγή με παρόμοιο τρόπο.

$$\boldsymbol{B} = \mu_0(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M})$$

3.5 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ - ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΗΚΟΤΗΤΑ

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε και θα ορίσουμε τα μεγέθη που καθορίζουν την απόκριση-αντίδραση των μαγνητικών υλικών, παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τα μεγέθη αυτά είναι η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) και η μαγνητική επιδεκτικότητα (susceptibility).

Η μαγνητική διαπερατότητα χαρακτηρίζει τις μαγνητικές ιδιότητες των σωμάτων, τα οποία ανάλογα προς την τιμή αυτής προσδιορίζονται σε αμαγνητικά, παραμαγνητικά, διαμαγνητικά και μαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά σώματα. Εκφράζει δηλαδή, την ικανότητα του μαγνητικού πεδίου να διαπεράσει το υλικό. Ορίζεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{H}}$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα εκφράζει τον βαθμό ικανότητας του μέσου να μαγνητίζεται. Εκφράζει δηλαδή την ευκολία με την οποία ένα υλικό μπορεί να μαγνητισθεί ή να απομαγνητισθεί αντίστοιχα. Δίνεται από τη σχέση:

$$\chi = \frac{\boldsymbol{M}}{\boldsymbol{H}}$$

Για τον αέρα-κενό ισχύει ότι $\mu 0 = 4\pi * 10^{-7}$ (H/m). Για τα υλικά έχουμε $\mu = \mu_r \mu_o$ όπου μ_r είναι ο συντελεστής σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού. Για το κενό-αέρα λαμβάνουμε ότι $\mu_r = 1$. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα συνδέεται με τη μαγνητική επιδεκτικότητα από τη σχέση:

$$\mu_r = \chi + 1$$

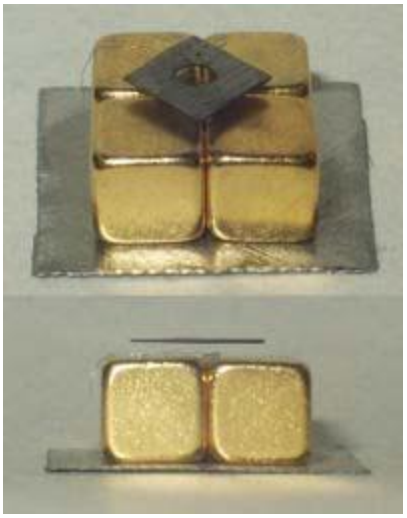
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΥΨΩΣΗ

4.1 . Εισαγωγή

Η μαγνητική ανύψωση είναι μια μέθοδος με την οποία ένα αντικείμενο μπορεί να αιωρηθεί πάνω από ένα δεύτερο αντικείμενο, χωρίς καμία υποστήριξη παρά μόνο με τη βοήθεια μαγνητικών πεδίων. Ο σκοπός της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης είναι να εξουδετερώνει την βαρυτική δύναμη. Το 1842 ο Samuel Earnshaw διατύπωσε το ομώνυμο θεώρημα, το οποίο δήλωνε ότι ένα σύνολο σημειακών φορτίων δεν μπορεί να διατηρηθεί σε σταθερή στατική ισορροπία μόνο από την ηλεκτροστατική επίδραση των φορτίων.

Αρχικά, αναφέρονταν σε ηλεκτροστατικά πεδία, όμως γενικότερα εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε κλασσική αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου δύναμη ή συνδυασμό δυνάμεων (π.χ. μαγνητικά, ηλεκτρικά και βαρυτικά πεδία).

Εικόνα1: Ανύψωση



Κάποια φαινόμενα που παραβιάζουν τα συμπεράσματα του θεωρήματος αυτού είναι: Κβαντικά φαινόμενα, Ανατροφοδότηση (Feedback), Διαμαγνητισμός, Ταλαντούμενα Πεδία, Περιστροφή. Το φαινόμενο Meissner εξηγεί πως είναι τελικά δυνατόν να υπάρξει μαγνητική ανύψωση. Το 1933 ο Walther Meissner και ο Robert Ochsenfeld διατύπωσαν το φαινόμενο αυτό, το οποίο αναφέρεται στην απώθηση του μαγνητικού πεδίου από έναν υπεραγωγό. Το πείραμα με το οποίο αποδείχθηκε ήταν με την μέτρηση της μαγνητικής ροής έξω από τον όγκο του υπεραγωγού καθώς ψύχονταν κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία με την παρουσία μαγνητικού πεδίου. Κάτω από αυτήν την θερμοκρασία

αποδείχθηκε ότι το υλικό γίνονταν τέλειος διαμαγνήτης και μηδένιζε την ροή στο εσωτερικό του. Τελικά, τα φυσικά φαινόμενα που θα μας απασχολήσουν για την μελέτη της μαγνητικής ανύψωσης είναι οι μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών και συγκεκριμένα ο διαμαγνητισμός και η υπεραγωγιμότητα. Η σημαντικότερη εφαρμογή της μαγνητικής ανύψωσης σήμερα είναι τα μαγνητικά τρένα ή maglev που αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες χάρη στην έλλειψη της τριβής.

Τα μαγνητικά υλικά είναι κλάδος πολλά υποσχόμενος και βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη.

4.2 Θεώρημα του Earnshaw

Το θεώρημα του Earnshaw αναφέρει ότι ένα σύνολο σημειακών φορτίων δεν μπορεί να διατηρηθεί σε στατική ισορροπία παρά μόνο με την ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση των φορτίων. Αυτό αποδείχθηκε από τον Samuel Earnshaw το 1842. Συνήθως αναφέρεται σε μαγνητικά πεδία, αλλά αρχικά αναφέρθηκε σε ηλεκτροστατικά πεδία και συγκεκριμένα για δυνάμεις που υπακούουν σε σχέσεις ανάλογες του αντιστρόφου του τετραγώνου ή σε συνδυασμούς δυνάμεων, όπως μαγνητικό, ηλεκτρικό ή βαρυτικό πεδίο. Το θεώρημα αυτό προκύπτει από τον νόμο του Gauss. Ένα σωματίδιο για να είναι σε ευσταθή ισορροπία, μικρές διαταραχές στο σωματίδιο αυτό προς οποιαδήποτε διεύθυνση δεν πρέπει να διαταράσσουν την ισορροπία, το σωματίδιο θα πρέπει να επιστρέφει στην αρχική του θέση. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου θα πρέπει να έχουν διεύθυνση προς το εσωτερικό του σώματος. Επειδή όλες οι περιβάλλουσες δυναμικές γραμμές δείχνουν προς το σημείο ισορροπίας, η απόκλιση του πεδίου στο σημείο αυτό θα πρέπει να είναι διάφορη του μηδενός και συγκεκριμένα αρνητική. Όμως, σύμφωνα με τον νόμο του Gauss αυτό είναι αδύνατο. Διότι, η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο $F(x)$, όπου x η απόσταση, και προκύπτει από συνδυασμό αντιστρόφως ανάλογων του τετραγώνου δυνάμεων που υπακούουν στηνεξίσωση του Laplace, έχουν πάντα μηδενική απόκλιση ($\nabla \cdot F = 0$) στον κενό χώρο. Τελικώς, δεν υπάρχει κανένα σημείο στον κενό χώρο όπου οι δυναμικές γραμμές να οδηγούν στο κέντρο του από όλες τις διευθύνσεις, οπότε δεν υπάρχει και ευσταθής ισορροπία των σωματιδίων. Δεν υπάρχουν μέγιστα ή ελάχιστα παρά μόνο ανώμαλα σημεία. Αναφέρεται ακόμα πως ούτε σιδηρομαγνήτες δεν μπορούν να έχουν στατική ισορροπία, ενώ μπορούν να ανυψωθούν ενάντια στην βαρύτητα όταν οι μαγνητικές δυνάμεις γίνουν πιο ισχυρές των βαρυτικών δυνάμεων. Φυσικά υπάρχουν και κάποιες εξαιρέσεις του θεωρήματος που επιτρέπουν την μαγνητική ανύψωση. Η εφαρμογή του θεωρήματος στα μαγνητικά δίπολα αποτελεί απόδειξη της ισχύος του. Η ενέργεια U ενός μαγνητικού διπόλου M σε μαγνητικό πεδίο B δίνεται από την σχέση,

$$U = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B} = -(M_x B_x + M_y B_y + M_z B_z)$$

Η μαγνητική ανύψωση του διπόλου θα είναι ευσταθείς μόνο στα σημεία όπου η ενέργεια θα γίνεται ελάχιστη, οπότε η λαπλασιανή της ενέργειας θα πρέπει να είναι θετική.

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} > 0$$

Επειδή δεν υπάρχει κάποιο ρεύμα ή μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο η απόκλιση και η στροφή του μαγνητικού πεδίο άρα και των επιμέρους λαπλασιανών θα είναι μηδέν.

$$\nabla^2 B_x = 0, \nabla^2 B_y = 0, \nabla^2 B_z = 0$$

Η απόδειξη έχει ως εξής, για ένα μαγνητικό δίπολο με σταθερή διεύθυνση όπου *Μχ, Μy, Μz* σταθερά, η λαπλασιανή θα είναι πάντα μηδέν και δεν θα υπάρχει κανένα σημείο στον χώρο για ευσταθή μαγνητική ανύψωση. Δηλαδή,

$$U = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B} = -(M_x B_x + M_y B_y + M_z B_z)$$

οπότε,

$$\nabla^2 U = 0$$

Αν όμως τα μαγνητικά δίπολα ευθυγραμμιστούν παράλληλα ή αντιπαράλληλα με το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο τότε η μαγνήτιση του διπόλου είναι ανάλογη της μαγνητικής επαγωγής και ισχύει,

$$U = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B} = -k\mathbf{B} \cdot \mathbf{B} = -k(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)$$

όπου k αρνητικό για διαμαγνητικά υλικά και θετικό για παραμαγνητικά. Τελικά, αυτό δείχνει ότι τα παραμαγνητικά υλικά μπορούν να έχουν μέγιστα και όχι ελάχιστα και τα διαμαγνητικά υλικά μπορούν να έχουν ελάχιστα ενέργειας και όχι μέγιστα.

$$\nabla^2 (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2) \geq 0$$

Δηλαδή, τα διαμαγνητικά υλικά είναι ευσταθή προς όλες τις κατευθύνσεις, αυτό δεν αποκλείει το ενδεχόμενο να υπάρχουν κάποια ανώμαλα σημεία στον χώρο.

Για σιδηρομαγνητικό υλικό (μόνιμο μαγνήτη) έχουμε,

$$\mathbf{M} = k\frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|}$$

$$U = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{B} = -k\frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} \cdot \mathbf{B} = -k\frac{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}} = -k(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$$

Σταθερή μαγνητική ανύψωση με μόνιμο μαγνήτη έχει παρατηρηθεί μόνο με την βοήθεια περιστροφής.

4.3 Εξαιρέσεις του Θεωρήματος

Υπάρχουν μερικά φαινόμενα που παραβιάζουν το θεώρημα του Earnshaw, κάποια από αυτά είναι τα εξής:

• Κβαντικά Φαινόμενα

Ένα σώμα που επικάθεται σε μια επιφάνεια ανυψώνεται σε μια μικροσκοπική απόσταση πάνω από αυτό. Αυτό οφείλεται στις ηλεκτρομαγνητικές ενδομοριακές δυνάμεις και δεν ταυτίζεται με την έννοια της μαγνητικής ανύψωσης. Λόγω των μικρών αποστάσεων τα κβαντικά φαινόμενα είναι σημαντικά, όμως το θεώρημα του Earnshaw αναφέρεται στην κλασσική φυσική.

• Ανατροφοδότηση

Αν ανιχνεύσουμε την θέση ενός αντικειμένου στο διάστημα ή στον χώρο μπορούμε να το τροφοδοτήσουμε με ένα σύστημα ελέγχου που μπορεί να διαφοροποιεί την δύναμη των ηλεκτρομαγνητών που ενεργούν πάνω στο αντικείμενο, και το διατηρούν ανυψωμένο. Αυτό γίνεται προγραμματίζοντας το σύστημα να αυξάνει την δύναμη όταν το αντικείμενο απομακρύνεται και να την μειώνει όταν αυτό πλησιάζει. Η ίδια λειτουργία επιτυγχάνεται και με κινητούς σταθερούς μαγνήτες. Η ηλεκτρομαγνητική ανύψωση είναι ένα από τα συστήματα που χρησιμοποιούν τα μαγνητικά τρένα, όπως αυτό του αεροδρομίου του Birmingham της Αγγλίας. Υπάρχουν και στην αγορά τέτοιες συσκευές που ανυψώνουν αντικείμενα με αυτή τη μέθοδο.

• Διαμαγνητισμός

Είναι δυνατόν να ανυψώσουμε οποιοδήποτε διαμαγνητικό υλικό καθώς και υπεραγωγούς. Και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται στα μαγνητικά τρένα.

Είναι κάτι αρκετά απλό η ανύψωση των νέων υπεραγώγιμων υλικών υψηλής θερμοκρασίας. Ένας υπεραγωγός είναι ένας τέλειος διαμαγνήτης που σημαίνει ότι απωθεί το μαγνητικό πεδίο. Τα διαμαγνητικά υλικά μπορούν και αυτά να ανυψωθούν αλλά χρειάζονται πιο ισχυρά μαγνητικά πεδία. Σταγόνες νερού, ακόμα και βάτραχος έχει ανυψωθεί χάρη στις διαμαγνητικές του ιδιότητες. Το θεώρημα του Earnshaw δεν ισχύει σε αυτή την περίπτωση καθώς οι διαμαγνήτες συμπεριφέρονται αντίθετα από τα μαγνητικά υλικά. Έχουν την ιδιότητα να ευθυγραμμίζονται αντιπαράλληλα στις μαγνητικές γραμμές, σε αντίθεση με τους μαγνήτες που ευθυγραμμίζονται παράλληλα σε αυτές. Στους διαμαγνήτες τα ηλεκτρόνια προσαρμόζουν τις τροχιές τους έτσι ώστε να αντισταθμίζουν την ροή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα να δημιουργούν μαγνητικό πεδίου που να έχει αντίθετη διεύθυνση. Αυτό

σημαίνει ότι η μαγνητική ροπή του διαμαγνήτη είναι αντίρροπη με την ροπή του εξωτερικού πεδίου. Οι υπεραγωγοί είναι διαμαγνήτες με μια μικρή αλλαγή στις τροχιές των ηλεκτρονίων. Ο βάτραχος, για παράδειγμα, θεωρείται διαμαγνήτης όμως τα ηλεκτρόνια σε κάθε μόριο του σώματός του έχουν διαφορετική τροχιά.

• Ταλαντούμενα Πεδία

Ένα ταλαντούμενο μαγνητικό πεδίο θα δημιουργήσει εναλλασσόμενο ρεύμα στον αγωγό και αυτό θα παράγει μια ανυψωτική δύναμη. Κάτι αντίστοιχο μπορεί να επιτευχθεί και με έναν περιστρεφόμενο δίσκο κατάλληλου σχήματος. Το ταλαντούμενο πεδίο μετατρέπει ένα αγώγιμο σώμα σε διαμαγνητικό. Λόγω της υπάρχουσας αντίστασης, η αλλαγή στο διάνυσμα τροχιών των ηλεκτρονίων μετά από κάποιο χρονικό διάστημα εξαφανίζεται, όμως με την ταλάντωση δημιουργείται ένα ρεύμα στην επιφάνεια και διατηρεί την υπεραγώγιμη συμπεριφορά των σωμάτων.

• Περιστροφή

Ένα αντικείμενο που περιστρέφεται μπορεί να αιωρηθεί και με την βοήθεια σταθερών μαγνήτη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Levitron, ένα παιχνίδι που λειτουργεί βασισμένο στην παραπάνω πρόταση. Η περιστρεφόμενη κορυφή μπορεί να ανυψωθεί πάνω από μια βάση με την σωστή διάταξη των μαγνητών και να διατηρηθεί ανυψωμένο καθ' όλη την διάρκεια όπου η ταχύτητα περιστροφής του και το ύψος του από την βάση διατηρούνται σε κάποια όρια. Χρησιμοποιούνται μόνο μόνιμοι μαγνήτες, και κεραμικά υλικά για να αποτρέψουν την δημιουργία ρευμάτων που θα απελευθερώσουν την περιστροφική ενέργεια. Και αυτή η εφαρμογή μπορεί να θεωρηθεί ότι βασίζεται σε διαμαγνητικά φαινόμενα, καθώς με την περιστροφή σταθεροποιείται η διεύθυνση της μαγνητικής ροπής στον χώρο και τοποθετώντας τον μαγνήτη(αντίθετα από τον σταθερό μαγνήτη) με σταθερή μαγνήτιση αντιπαράλληλα στο μαγνητικό πεδίο, αυτό αιωρείται.

4. Μέθοδοι Μαγνητικής Ανύψωσης

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί η μαγνητική ανύψωση. Οι πιο βασικές είναι αυτές που χρησιμοποιούνται και στα μαγνητικά τρένα και είναι η ηλεκτρομαγνητική ανύψωση και η ηλεκτροδυναμική ανύψωση. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε μερικές βασικές κατηγορίες μαγνητικής ανύψωσης.

Μηχανικές Δυνάμεις

Αν δύο μαγνήτες τοποθετηθούν κατά μήκος ενός άξονα έτσι ώστε να απωθούνται έντονα μεταξύ τους, αυτό θα οδηγήσει στην ανύψωση του ενός πάνω από τον άλλο. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται ψευδό-ανύψωση.

Άμεση Διαμαγνητική Ανύψωση

Μια ουσία που είναι διαμαγνητική απωθεί ένα μαγνητικό πεδίο. Το θεώρημα του Earnshaw δεν ισχύει για διαμαγνητικά υλικά. Τέτοια υλικά συμπεριφέρονται ακριβώς αντίθετα από τα μαγνητικά υλικά λόγω της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητάς τους που είναι μικρότερη της μονάδας. Όλα τα υλικά έχουν αυτή την ιδιότητα άλλα ο παραμαγνητικός ή ο σιδηρομαγνητικός τους χαρακτήρας υπερισχύει.

Η διαμαγνητική δύναμη είναι συνήθως αρκετά μικρή. Μπορεί να επιτευχθεί σε ελαφριά υλικά, ακόμα και σε μικρά ζώα όπως ο βάτραχος, όμως με παρουσία ισχυρού μαγνητικού πεδίου.

Εικόνα2: Μαγνητική ανύψωση βατράχου

Το ελάχιστο κριτήριο για διαμαγνητική ανύψωση είναι

$$B\frac{dB}{dz} = \mu_o \rho \frac{g}{\chi}$$

όπου,

χ :η μαγνητική επιδεκτικότητα

ρ: η πυκνότητα του υλικού

g :η σταθερά βαρύτητας (9,81m/s2)

μ0: η μαγνητική διαπερατότητα του κενού

Β :το μαγνητικό πεδίο

dB/dz η παράγωγος του μαγνητικού πεδίου στον κατακόρυφο άξονα

Για παράδειγμα υπό ιδανικές συνθήκες το νερό ανυψώνεται όταν

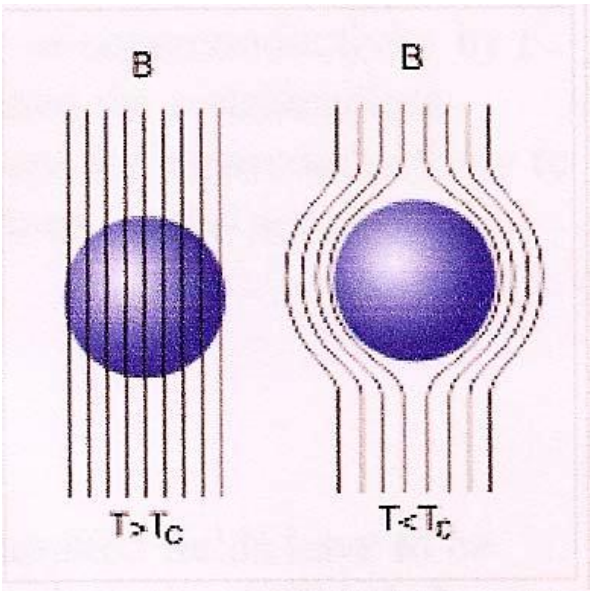
$$B\frac{dB}{dz} \rangle\rangle 1400 T^2/m$$

ενώ ο γραφίτης όταν

$$B\frac{dB}{dz} \rangle\rangle 375 T^2/m$$

Υπεραγωγοί

Οι υπεραγωγοί είναι τέλειοι διαμαγνήτες, δηλαδή μr=0., και αποβάλλουν εντελώς τα μαγνητικά πεδία λόγω του φαινομένου Meissner. Η μαγνητική ανύψωση του μαγνήτη οφείλεται στην σταθερότητα της ροής στο εσωτερικό του υπεραγωγού. Η αρχή αυτή χρησιμοποιείται στην ηλεκτροδυναμική ανύψωση των μαγνητικών τρένων. Στα τρένα, τα οποία ζυγίζουν αρκετά, χρησιμοποιούνται υπεραγωγοί στον ηλεκτρομαγνήτη καθώς παράγουν ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο για το ίδιο βάρος.



Εικόνα 3: Ροή του μαγνητικού πεδίο σε υπεραγωγό.

Διαμαγνητικά Σταθεροποιημένη Ανύψωση

Ένας μόνιμος μαγνήτης μπορεί να ανυψωθεί με σταθερότητα από διάφορες διαμορφώσεις ισχυρών μόνιμων μαγνητών και ισχυρών διαμαγνητών. Όταν χρησιμοποιείται υπεραγώγιμος μαγνήτης η σταθεροποιημένη ανύψωση ενός μόνιμου μαγνήτη επιτυγχάνεται ακόμα και με την μικρή διαμαγνητική ιδιότητα του νερού που περιέχουν τα δάχτυλά ενός ανθρώπου.

Περιστροφική Σταθεροποίηση

Ένας μαγνήτης μπορεί να σταθεροποιηθεί περιστρεφόμενος μέσα σε ένα πεδίο που δημιουργείται από ένα δακτύλιο άλλων μαγνητών. Για να είναι δυνατή η σταθεροποίηση του μαγνήτη πρέπει ο ρυθμός μετάπτωσης να ελαττωθεί κάτω από ένα κρίσιμο όριο, η περιοχή σταθερότητας είναι αρκετά στενή και ως προς τον χώρο αλλά και ως προς τον ρυθμό μετάπτωσης. Ένα γνωστό αντικείμενο που υπακούει στην περιστροφική σταθεροποίηση είναι το παιχνίδι Levitron.

Εικόνα 4: Levitron

Servo Σταθεροποίηση

Δυναμικά σταθεροποιημένη μαγνητική ανύψωση επιτυγχάνεται μετρώντας την θέση και την τροχιά του μαγνήτη που ανυψώνεται και συνεχώς προσαρμόζοντας το τοπικό μαγνητικό πεδίο για να ρυθμίζει την κίνησή του. Αυτή η αρχή χρησιμοποιεί συνήθως μια δέσμη φωτός η οποία μετρά την θέση και την ταχύτητα του αντικειμένου. Στα απλά συστήματα ο ηλεκτρομαγνήτης είναι πάνω από το αντικείμενο που αιωρείται και κλείνει όταν το αντικείμενο πλησιάζει αρκετά κοντά ενώ ανοίγει ξανά

όταν το αντικείμενο απομακρύνεται αρκετά. Αυτό το σύστημα δεν είναι αρκετά ισχυρό, υπάρχουν όμως πιο πολύπλοκα και αποτελεσματικά συστήματα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται στην ηλεκτρομαγνητική ανύψωση των μαγνητικών τρένων. Το τρένο ανυψώνεται από τις ράγες και με τους servo διακόπτες διατηρείται σε μια σταθερή απόσταση από τον διάδρομο.

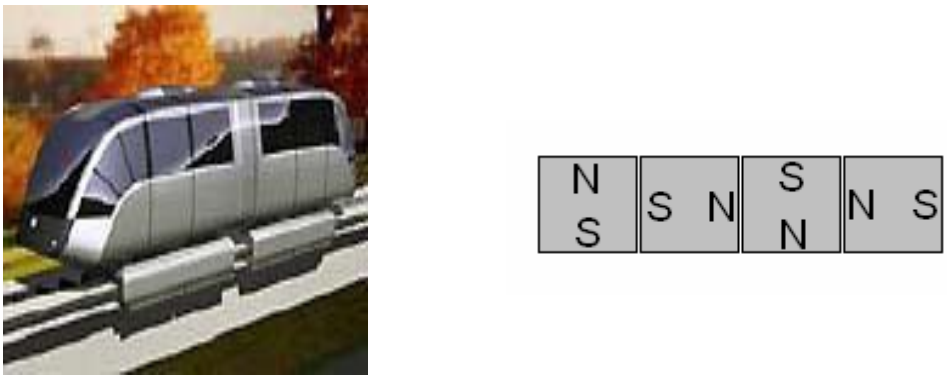
Περιστρεφόμενοι Αγωγοί κάτω από Μαγνήτες

Αν περιστρέψουμε μια βάση φτιαγμένη από ηλεκτρικό αγωγό κάτω από ένα μαγνήτη, θα δημιουργηθεί ένα ρεύμα που θα απωθήσει τον μαγνήτη. Σ' έναν αρκετά υψηλό ρυθμό περιστροφής ο μαγνήτης θα ανυψωθεί. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στις σειρές Halbach αντί για την χρήση μόνιμου μαγνήτη ενός πόλου.

Υψηλής Συχνότητας Ταλαντούμενα Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία

Ένας αγωγός μπορεί να ανυψωθεί πάνω από έναν ηλεκτρομαγνήτη με την βοήθεια υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα να τον διαρρέει. Με αυτόν τον τρόπο ο αγωγός συμπεριφέρεται ως διαμαγνήτης, λόγω των ρευμάτων Eddie που δημιουργούνται στον αγωγό. Καθώς τα ρεύματα Eddie δημιουργούν δικά τους πεδία που αντιτίθενται στο μαγνητικό πεδίο, το αγώγιμο υλικό απωθείται από τον ηλεκτρομαγνήτη. Για να πραγματοποιηθεί η ανύψωση χρειάζονται αρκετά υψηλές συχνότητες και μη-σιδηρομαγνητικά υλικά, καθώς αυτά έλκονται ισχυρά από τον ηλεκτρομαγνήτη. Το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται σε ταινίες για να αιωρηθεί ένα αντικείμενο μέσα στο οποίο αποκρύπτεται μια πλάκα αλουμινίου.

Σειρές Halbach και Inductrack Κινούμενες σειρές Halbach πάνω από έναν αγώγιμο βρόχο παράγουν ένα ρεύμα στον βρόχο, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί ένα αντιτιθέμενο μαγνητικό πεδίο. Σε μια κρίσιμη ταχύτητα το αντιτιθέμενο μαγνητικό πεδίο είναι αρκετά ισχυρό ώστε να προκαλέσει ανύψωση πάνω από μια σειρά τέτοιων βρόχων. Μπορούμε να τοποθετήσουμε τις σειρές Halbach σε μια σταθερή διάταξη όπως για παράδειγμα μέσα σε ένα βαγόνι τρένου. Τα μαγνητικά τρένα Inductrack είναι πιο ασφαλή από τα μαγνητικά τρένα που λειτουργούν με ηλεκτρομαγνητικά ή ηλεκτροδυναμικά συστήματα. Στις σειρές αυτές χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες και οι αγώγιμοι βρόχοι που θα οδηγήσουν στην ανύψωση δεν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Όμως είναι απαραίτητο το τραίνο να κινείται με μερικά χιλιόμετρα την ώρα για να διατηρηθεί η ανύψωση. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει την ανύψωση είναι αυτό που δημιουργείται στους βρόχους και οφείλεται στην κίνηση του τραίνου (μαγνητική έλξη). Η αποδοτικότητά του είναι αρκετά καλή και χωρίς ενεργή ηλεκτρονική ή κρυογενετική για τους υπεραγωγούς.

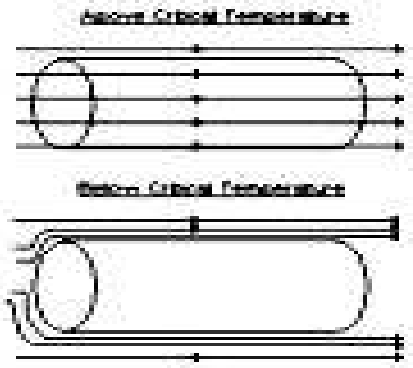


Εικόνα5: Inductrack (αριστερά) και Halbach arrays (δεξιά).

4.5 Το φαινόμενο του Meissner

Το φαινόμενο Meissner- Ochesenfeld ή απλώς Meissner είναι η απώθηση του μαγνητικού πεδίου από έναν υπεραγωγό. Ανακαλύφθηκε το 1933 με την μέτρηση της ροής στο εξωτερικό δειγμάτων κασσίτερου και μολύβδου καθώς ψύχονταν κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία με την παρουσία μαγνητικού πεδίου. Ανακάλυψαν ότι κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία του υπεραγωγού τα δείγματα μετατρέπονταν σε τέλειους διαμαγνήτες, εξουδετερώνοντας την εσωτερική ροή. Το πείραμα απέδειξε την ιδιότητα των υπεραγωγών να μετατρέπονται σε τέλειους αγωγούς και την χαρακτηριστική ιδιότητα της υπεραγώγιμης κατάστασης.

Εικόνα6: Μαγνητική Ανύψωση ενός μαγνήτη πάνω από έναν υπεραγωγό που έχει ψυχθεί σε υγρό άζωτο.



Εικόνα7: Γραμμές του μαγνητικού πεδίου κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία (πάνω σχήμα) και πάνω από αυτήν (κάτω σχήμα).

Όταν ασκηθεί ασθενές πεδίο ο υπεραγωγός απωθεί την μαγνητική ροή, εξηγεί το φαινόμενο Meissner. Παρά το γεγονός ότι το μαγνητικό πεδίο απωθήθηκε από το εσωτερικό του υπεραγωγού, στα άκρα του δείγματος συμβαίνει γρήγορη εξασθένιση του πεδίου σε απόσταση ίση με το βάθος διείσδυσης.

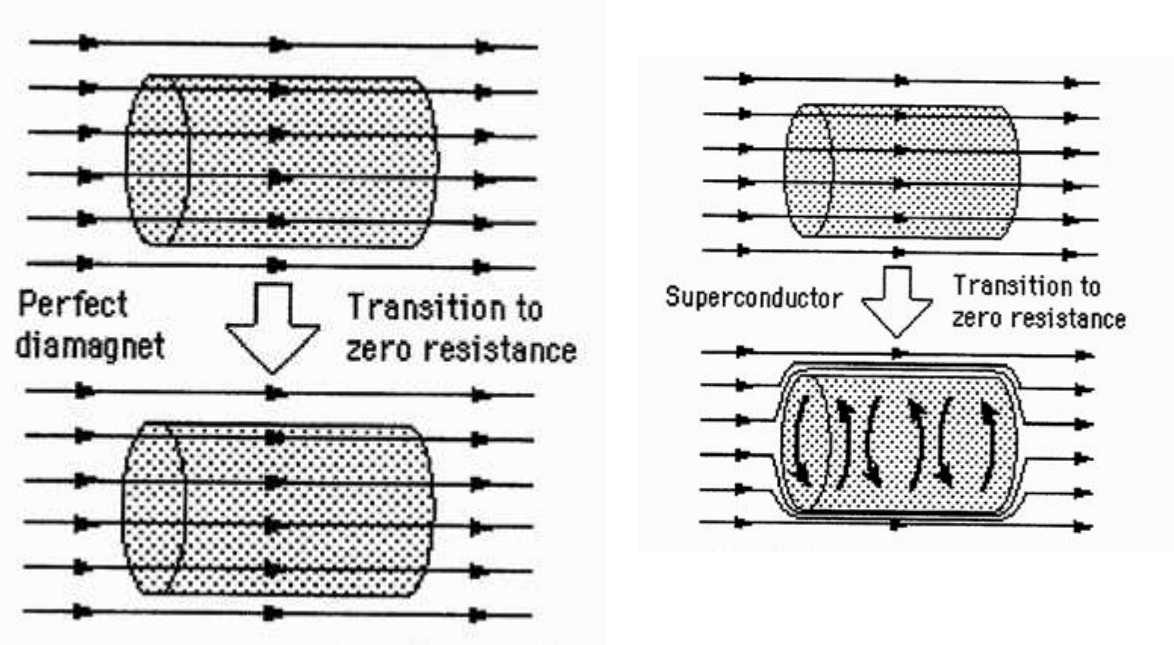
Κάθε υπεραγωγός έχει διαφορετικό βάθος διείσδυσης ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού. Όταν ο υπεραγωγός ψύχεται σε ασθενές μαγνητικό πεδίο και κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία, επίμονα ρεύματα δημιουργούνται στην επιφάνεια. Αυτά τα ρεύματα που διαρρέουν τον υπεραγωγό δημιουργούν αντιτιθέμενο μαγνητικό πεδίο από αυτό που εφαρμόζουμε με αποτέλεσμα να μηδενίζουν την εσωτερική ροή. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούνται μόνο σε βάθος ίσο με το επιδερμικό βάθος ή αλλιώς την σταθερά διείσδυσης.

Οι υπεραγωγοί στο φαινόμενο Meissner συμπεριφέρονται ως τέλειοι διαμαγνήτες, οπότε έχουν αρνητική μαγνητική επιδεκτικότητα,χ=-1 1. Ως διαμαγνητισμό ορίζουμε την δημιουργία αυθόρμητης μαγνήτισης ενός υλικού, αντιτιθέμενη στην διεύθυνση του πεδίου που εφαρμόζουμε την μαγνήτιση.

Ωστόσο, ο διαμαγνητισμός ως έννοια στα κανονικά υλικά διαφέρει από αυτή των υπεραγωγών. Στους υπεραγωγούς όπως προαναφέραμε δημιουργούνται αντίθετα ρεύματα, ενώ στα διαμαγνητικά υλικά προκύπτει ως άμεσο αποτέλεσμα της τροχιακής περιστροφής των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα ενός ατόμου που οφείλεται στο εφαρμοζόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

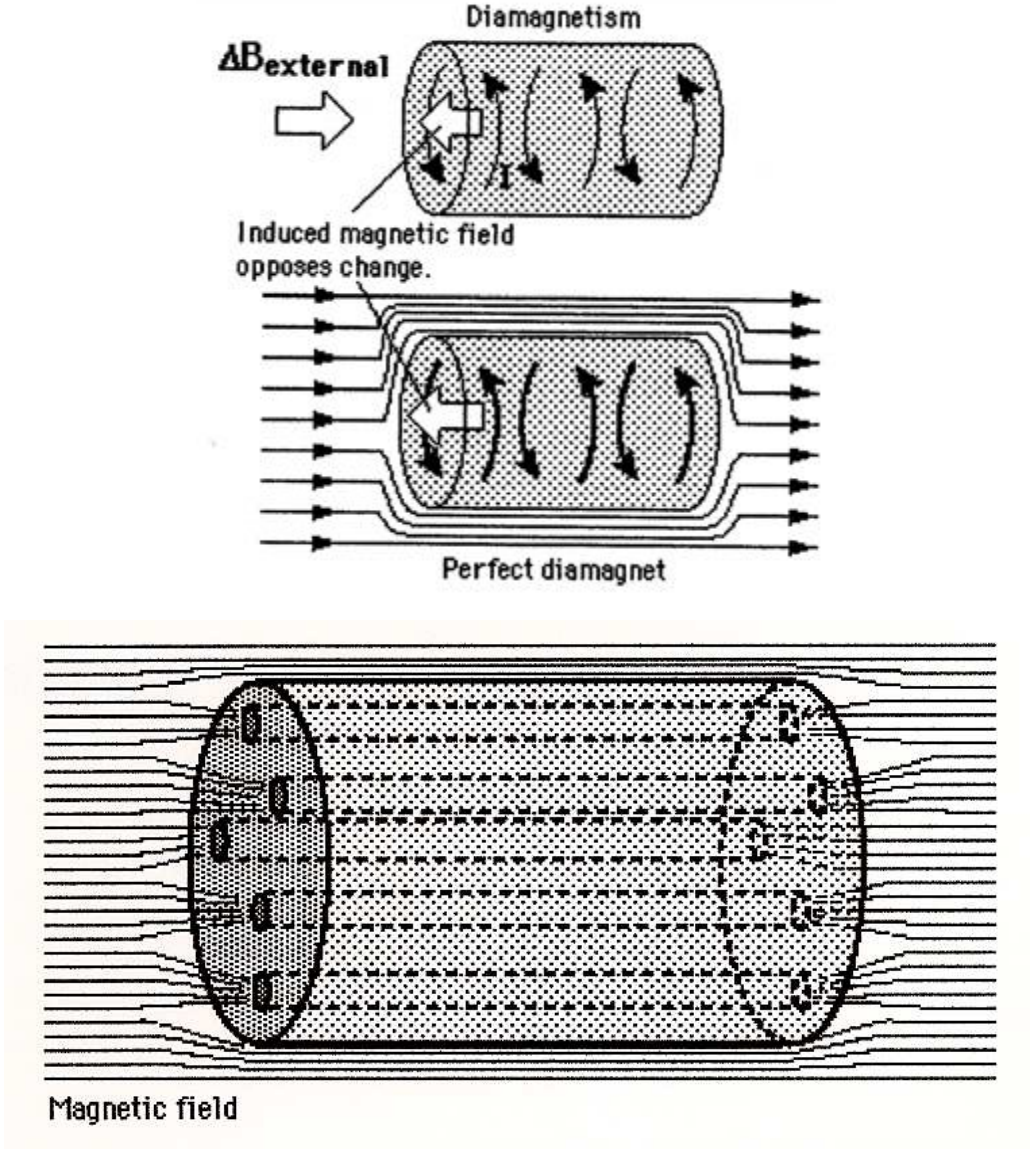
Η ανακάλυψη του φαινόμενου Meissner οδήγησε στην φαινομενολογική διατύπωση της υπεραγωγιμότητας από τους London το 1935. Διατύπωσαν θεωρητικά πώς θα μπορούσαν να γίνονται μεταφορές χωρίς αντίσταση με την βοήθεια του φαινομένου Meissner. Δεν υπήρχαν πολλές παρατηρήσεις λόγω των δύσκολων πειραματικών συνθηκών

καθώς τα πειράματα έπρεπε να γίνονται στο επιδερμικό βάθος του κάθε υλικού, το οποίο είναι εξαρτώμενο από την θερμοκρασία και συνήθως είναι κοντά σε φασικές επιφάνειες. Για να μην δημιουργούνται προβλήματα στις πειραματικές μετρήσεις του φαινομένου Meissner λόγω των φασικών επιφανειών χρησιμοποιούνται ασθενή μαγνητικά πεδία.



Εικόνα8: Μετατροπή σε μηδενική αντίσταση ενός τέλειου διαμαγνήτη και ενός υπεραγωγού.

Στα αριστερά βλέπουμε έναν αγωγό που ενώ διαρρέεται από μαγνητικό πεδίο, ψύχεται σε στάδιο μηδενικής αντίστασης και μετατρέπεται σε τέλειο διαμαγνήτη που όμως διατηρεί το μαγνητικό του πεδίο όπως έχει. Στα δεξιά βλέπουμε έναν υπεραγωγό που απωθεί το μαγνητικό πεδίο στην ίδια κατάσταση.

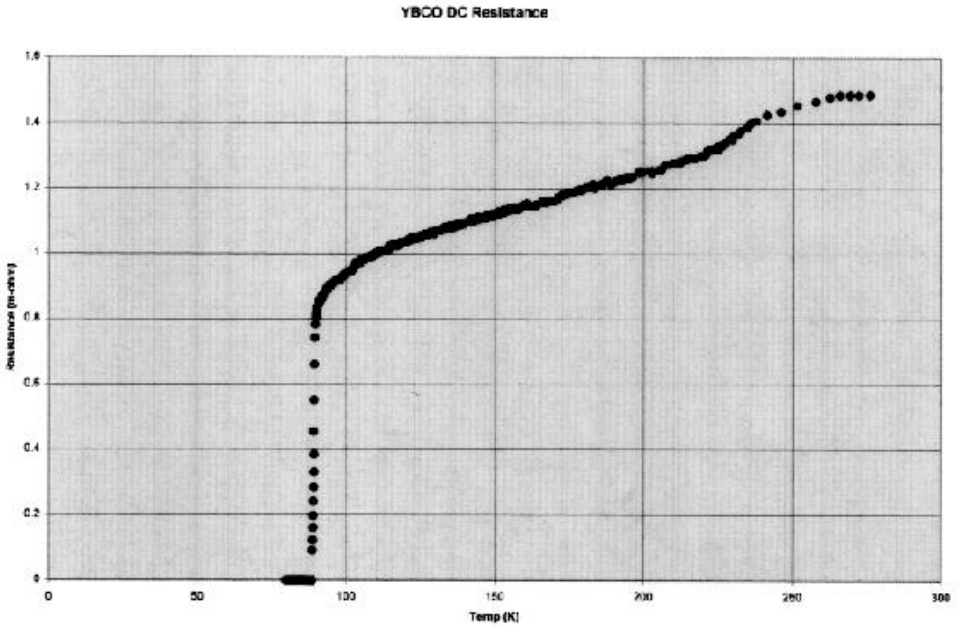


Εικόνα9: Ένας αγωγός που γίνεται τέλειος διαμαγνήτης και ένας υπεραγωγός τύπου ΙΙ.

Στην πρώτη περίπτωση ο αγωγός αντιτίθεται σε κάθε αλλαγή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα ρεύματα που τον διαρρέουν είναι αντίθετα του πεδίου (σύμφωνα με τον νόμο του Lenz's). Αυτό μετατρέπει τον τέλειο αγωγό σε τέλειο διαμαγνήτη, δηλαδή τα ρεύματα στο εσωτερικό του δεν συναντάνε καμία αντίσταση. Στην δεξιά εικόνα βλέπουμε έναν υπεραγωγό τύπου ΙΙ όπου το μαγνητικό πεδίο δεν απωθείται εξ' ολοκλήρου αλλά κατά τμήματα, αυτού του είδους τα υλικά μπορούν να αντέξουν δε μεγαλύτερα εξωτερικά μαγνητικά πεδία και να παραμείνουν υπεραγώγιμα.

Στο διάγραμμα φαίνεται η αλλαγή της αντίστασης του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας. Σε θερμοκρασία των 90K περίπου ο YBCO υφίσταται αλλαγή φάσης σε κβαντικό επίπεδο. Τα ηλεκτρόνια σχηματίζουν ζεύγη

και αρχίζουν να έλκονται μεταξύ τους, αυτό οφείλεται στο πλέγμα των ατόμων του YBCO. Το αποτέλεσμα αυτού του καθαρά κβαντικού φαινομένου οδηγεί σε μηδενισμό της αντίστασης με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η μαγνητική ανύψωση ενός μαγνήτη καθώς και η περιστρεφόμενη μαγνητική ανύψωση, έπ' άπειρον.



Εικόνα10: Μέτρηση της αντίστασης του υπεραγωγού YBCO συναρτήσει της θερμοκρασίας

4.6. Μαγνητικά Τρένα

Εικόνα10: Το γρήγορο μαγνητικό τρένο της Shanghai στο τέρμα του σταθμού Longyang

Τα τρένα maglev ή αλλιώς μαγνητικά ανυψωμένα τρένα αποτελούν μια μορφή μαζικής μεταφοράς που ανυψώνει από το έδαφος και καθοδηγεί τρένα με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Πλεονεκτήματα της μεταφοράς αυτής είναι οι μεγάλες ταχύτητες μετακίνησης που φτάνουν τα 600Km/h και ο χαμηλός θόρυβος των οχημάτων. Με μαγνητικές μεθόδους λειτουργούν εκτός από τα οχήματα-τρένα και ολόκληρο το σιδηροδρομικό σύστημα, δηλαδή συμπεριλαμβάνονται και οι σιδηροδρομικές γραμμές των τρένων.

Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι ανύψωσης, η ηλεκτρομαγνητική και η ηλεκτροδυναμική. Η πρώτη αναφέρεται στην μαγνητική ελκτική δύναμη ενός μαγνήτη κάτω από τις σιδηροδρομικές γραμμές για να σηκώνει το τρένο στον αέρα και η δεύτερη χρησιμοποιεί απωστική δύναμη μεταξύ δυο μαγνητικών πεδίων για να ωθήσει το τρένο μακριά από τις ράγες. Μια καινούρια μέθοδος είναι η μαγνητοδυναμική, η οποία με την βοήθεια ελκτικής δύναμης ενός μόνιμου μαγνήτη ανυψώνει και διατηρεί το τρένο στην θέση του πάνω από έναν διάδρομο χάλυβα.

Τα μέχρι τώρα υπάρχοντα Maglev βρίσκονται στην πόλη Emsland της Γερμανίας, στην Ιαπωνία το μαγνητικό τρένο JR και το Limino, στην Κίνα

το Maglev της Shanghai. Σε ολόκληρο τον κόσμο βρίσκονται υπό κατασκευή μαγνητικά τρένα που θα ολοκληρωθούν τα επόμενα χρόνια.

Η πρώτη παραλλαγή (ηλεκτρομαγνητική αιώρηση) αναπτύχθηκε στη Γερμανία από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Το γερμανικό μαγνητικό τρένο Transrapid είναι διαμορφωμένο κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να περιβάλλει τη σιδηροτροχιά και φέρει στο κάτω μέρος του μόνιμους μαγνήτες. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται ανυψώνει το τρένο 1 εκατοστό περίπου πάνω από τη σιδηροτροχιά, που είναι συνήθως κατασκευασμένη από σίδηρο και μπετόν, σε σχήμα Τ και φτάνει σε ύψος περίπου 5 μέτρων. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 το Transrapid δοκιμάζεται σε μια πειραματική διαδρομή μήκους 31,5 χλμ. στο Λατέν (Έμσλαντ) της Γερμανίας και το 1989 έφτασε την ταχύτητα των 435 χλμ./ώρα.

Η δεύτερη παραλλαγή (ηλεκτροδυναμική αιώρηση) αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία. Το ιαπωνικό μαγνητικό τρένο Maglev (magnetic levitation) φέρει υπεραγώγιμους μαγνήτες από κράματα νιοβίου-τιτανίου και νιοβίου-κασσιτέρου που ψύχονται με υγρό ήλιο. Κατά μήκος της σιδηροτροχιάς, που έχει συνήθως σχήμα U, στη βάση και στα πλάγια υπάρχουν πηνία που δημιουργούν μαγνητικό πεδίο που απωθεί τους υπεραγώγιμους μαγνήτες και ανυψώνει το τρένο 10 έως 15 εκατοστά. Για ταχύτητες έως και 100 χλμ. το τρένο χρησιμοποιεί συμβατικούς ελαστικούς τροχούς, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ανυψώνεται. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 το Maglev δοκιμάζεται σε μια τροχιά 7 χλμ. στο Μιγιαζάκι της Ιαπωνίας και έχει φτάσει την ταχύτητα των 517 χλμ./ώρα.

Το Transrapid απαιτεί συνεχή ρύθμιση της σιδηροτροχιάς με υπολογιστές, καθώς κινείται πάνω από τη σιδηροτροχιά, σε μικρή απόσταση από αυτή και υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να τη χτυπήσει. Αντίθετα το Maglev, χάρη στους υπεραγώγιμους μαγνήτες που παρέχουν ισχυρότερα μαγνητικά πεδία, εξασφαλίζει μεγάλη απόσταση από την τροχιά, έτσι ώστε να αποκλείεται ο κίνδυνος σύγκρουσης με την τροχιά, ακόμη και στην περίπτωση μετακίνησής της λόγω σεισμού. Επιπλέον, είναι σταθερότερο και δεν απαιτεί συνεχείς ρυθμίσεις, λόγω όμως των υπεραγώγιμων μαγνητών παρουσιάζει υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, καθώς και πολύ υψηλή μαγνητική ροή στο εσωτερικό του που υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια και μπορεί να επηρεάσει ηλεκτρονικές συσκευές.

Γενικά τα τρένα μαγνητικής αιώρησης πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών, καθώς αναπτύσσουν υψηλότερες ταχύτητες, μειώνοντας τους χρόνους των διαδρομών, επιταχύνουν και φρενάρουν γρηγορότερα, έχουν πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα κίνησης σε ανωφέρειες και λειτουργούν χωρίς προβλήματα σε δύσκολες καιρικές συνθήκες (βροχή, χιόνι, πάγος). Ακόμη, είναι άνετα και προκαλούν λιγότερο θόρυβο, ο οποίος ωστόσο αυξάνεται όσο η ταχύτητα πλησιάζει τα 400 χλμ./ώρα. Επιπλέον παρουσιάζουν αρκετά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά τρένα υψηλών ταχυτήτων και τα αεροπλάνα, ενώ

καθώς χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα, δεν προκαλούν ρύπανση της ατμόσφαιρας στην περιοχή όπου λειτουργούν.

Τα μαγνητικά τρένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χαμηλές ταχύτητες (μικρότερες από 100 χλμ./ώρα) για μικρές αποστάσεις σε αστικές περιοχές, σύνδεση πόλεων με αεροδρόμια, λιμάνια κ.λπ. Τέτοια περίπτωση αποτελεί το μαγνητικό τρένο του Μπέρμινχαμ της Αγγλίας, που από το 1984 συνδέει το σταθμό με το αεροδρόμιο της πόλης. Ωστόσο, στα μέσα της δεκαετίας του 1990 το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα μαγνητικά τρένα υψηλής ταχύτητας για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Το 1994 αποφασίστηκε η κατασκευή τροχιάς 284 χλμ. για την εισαγωγή μαγνητικού τρένου για τη σύνδεση του Αμβούργου με το Βερολίνο. Υπό κατασκευή βρίσκεται ακόμη μια διαδρομή μήκους 43 χιλιομέτρων δυτικά του Τόκιο, για τη διεξαγωγή δοκιμών του πιο εξελιγμένου τύπου του Maglev, μετά τις οποίες σχεδιάζεται η χρησιμοποίησή του για τη σύνδεση Τόκιο και Οσάκα. Μεγάλο ενδιαφέρον έχει εκδηλωθεί επίσης και στις ΗΠΑ για τη χρησιμοποίηση του Maglev στις συγκοινωνίες.

Το 1994 αποφασίστηκε η προώθηση σχεδίου ανάπτυξης υπόγειων μαγνητικών τρένων στην Ελβετία, μια κατεξοχήν ορεινή χώρα, με το σκεπτικό ότι με τους υπόγειους συρμούς δεν θα επιβαρυνθεί το περιβάλλον από επίγειες κατασκευές και ρύπους. Τα αρχικά σχέδια προβλέπουν την κατασκευή διπλών σηράγγων διαμέτρου 5 μέτρων και μήκους εκατοντάδων χιλιομέτρων, που θα συνδέουν τη Γενεύη (νοτιοδυτικά) με το Σαιντ Γκάλεν (βορειοανατολικά) και τη Βασιλεία (βορειοδυτικά) με τη Μπελινζόν (νοτιοανατολικά).

Η ανάπτυξη των μαγνητικών τρένων θεωρείται ότι θα συμβάλει στην αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας στους αυτοκινητόδρομους, καθώς και στη μείωση της εσωτερικής εναέριας κυκλοφορίας. Ανασχετικό παράγοντα, όμως, για την ευρεία διάδοση των μαγνητικών τρένων αποτελεί η μεγάλη δαπάνη που απαιτείται για τη δημιουργία εντελώς νέου σιδηροδρομικού δικτύου. Για την υπέρβαση του υψηλού κόστους του νέου δικτύου, προωθείται στις ΗΠΑ η πειραματική ανάπτυξη ενός νέου τύπου τρένου, που είναι γνωστό ως Seraphim (Segmented Rail Phased Induction Motor) και αποτελεί συνδυασμό μαγνητικής προώθησης και τροχών, διαφέρει δηλαδή από το καθεαυτού μαγνητικό τρένο στο ότι δεν ανυψώνεται, είναι όμως δυνατό να κινείται στις ήδη υπάρχουσες συμβατικές σιδηροτροχιές. Οι τροχοί στην περίπτωση των τρένων τύπου Seraphim δεν χρησιμεύουν για την κίνηση του οχήματος, απλά το κατευθύνουν, έτσι ώστε η διαθέσιμη ισχύς από τα μαγνητικά πεδία να καταναλώνεται στην προώθηση.

Το Transrapid maglev στις εγκαταστάσεις του Emsland στην Γερμανία

Το Transrapid maglev στην Σανγκάη

Το εσωτερικό του Transrapid maglev στην Σανγκάη

Το εσωτερικό του Transrapid maglev στην Σανγκάη για τους VIP

Δοκιμή του τρένου στη Γερμανία

JR-maglev at Yamanashi

Το μαγνητικό τρένο Limino

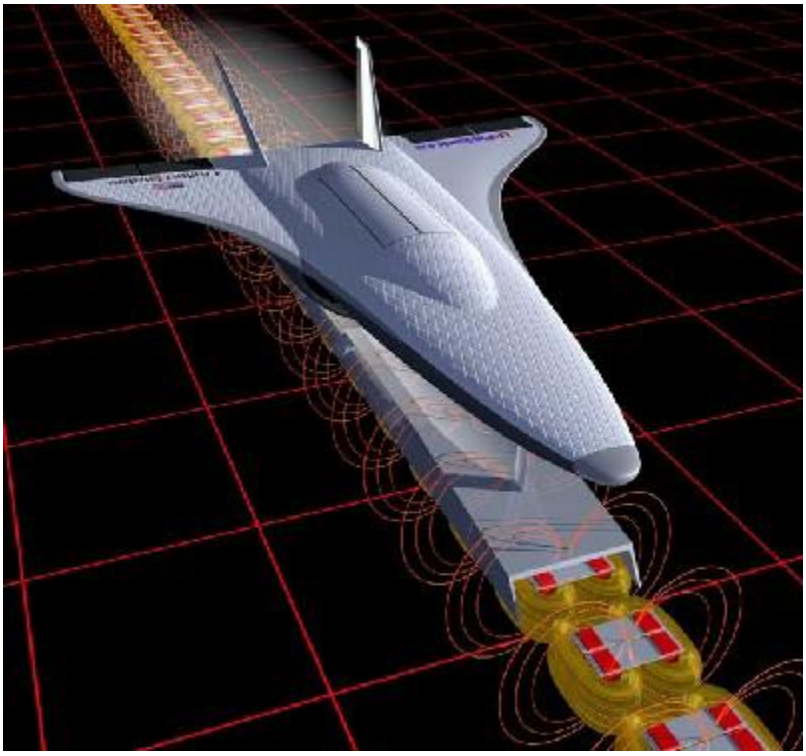
Shanghai Maglev

4.7 Άλλες Εφαρμογές

Η μαγνητική ανύψωση και γενικότερα τα μαγνητικά υλικά θα κυριαρχήσουν στην τεχνολογία του μέλλοντος.

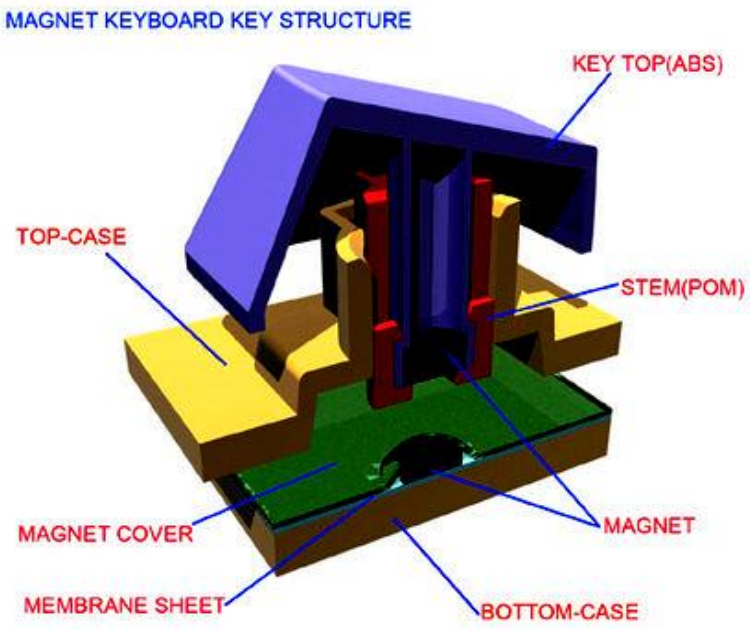
Μια πιθανή εφαρμογή φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, όπου με την βοήθεια διαδρόμων μαγνητικής ανύψωσης οχήματα θα εκτοξεύονται στο διάστημα. Ακόμη η χρήση της φαίνεται να κερδίζει έδαφος και στη βιομηχανία με την κατασκευή ειδικών ρουλεμάν τα οποία αποσβαίνουν τις καταπονήσεις εξαιτίας της τριβής, αλλά και για την ψυχαγωγία και διασκέδασή μας. Αναμφίβολα η μαγνητική ανύψωση έφερε μια επανάσταση στον τρόπο που μετακινούμαστε και προβλέπεται τα επόμενα χρόνια η χρήση της τεχνολογίας αυτής να είναι ακόμα πιο διαδεδομένη. Όραμα δε αποτελεί η ένωση μεγάλων πόλεων με μαγνητικές γραμμές ώστε η επικοινωνία μετακύ κρατών να είναι ακόμα πιο εύκολη.

Ένα ακόμη πιο μεγαλόπνοο όραμα είναι η σύνδεση Ευρώπης-Αμερικής με μαγνητικό τραίνο μέσω του ατλαντικού καθώς και η χρήση ειδικών πλατφορμών εκτόξευσης διαστημοπλοίων στο διάστημα οι οποίες θα εκμεταλλεύονται την έλλειψη τριβών και την απόδοση μεγάλων ταχυτήτων με μικρό κόστος. Ο χρόνος θα δείξει τι από αυτά θα υλοποιηθεί πραγματικά, αλλά οι προοπτικές αξιοποίησης της τεχνολογίας της μαγνητικής ανύψωσης είναι πολλά υποσχόμενες και το μέλλον αναμένεται ελπιδοφόρο.



Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι το κινητό τηλέφωνο που βασίζεται στην μαγνητική ανύψωση, όπου το πάνω κομμάτι κινείται με την βοήθεια μαγνητικής ενέργειας.

Ένα πληκτρολόγιο που βασίζεται στην μαγνητική ανύψωση θα κυκλοφορήσει φέτος όπου τα πλήκτρα θα επιστρέφουν στην αρχική τους θέση με την βοήθεια μαγνητών.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΤΡΕΝΩΝ

5.1 ΟΙ ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ

Στην παράγραφο αυτή θα επιχειρήσουμε μια συγκριτική παρουσίαση των Ηλεκτρικών ευθυγράμμων κινητήρων για την ηλεκτρική πρόωση όπου είναι και η κυριότερη εφαρμογή τους.

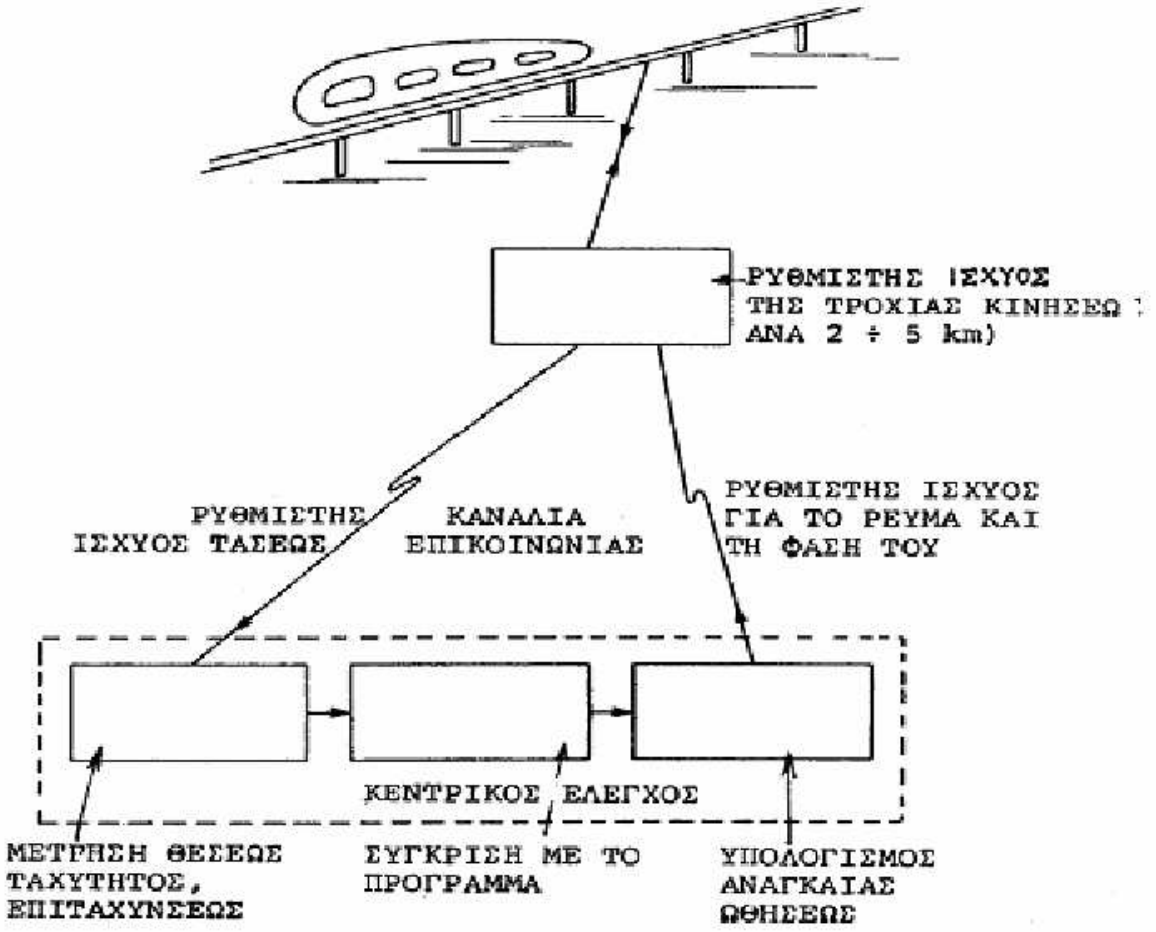
Κατ' αρχήν πρέπει να πούμε ότι οι οικονομικότεροι και λιγότερο προβληματικοί ευθύγραμμοι κινητήρες για την ηλεκτροκίνηση είναι οι κινητήρες μιας όψης, συνήθως με υποστήριξη σιδήρου στο δευτερεύον και με βραχύ κινητό πρωτεύον. Ο κινητήρας με δυο όψεις, όπου χρησιμοποιήθηκε σε πειράματα με βαγόνια πραγματικών διαστάσεων, δημιούργησε δυσεπίλυτα προβλήματα, π.χ. λόγω της δημιουργουμένης κύρτωσης στο αγώγιμο φύλλο του δευτερεύοντος από θερμοκρασιακές μεταβολές, κ.α. Επίσης το βραχύ πρωτεύον (τουλάχιστον για τους ευθύγραμμους κινητήρες επαγωγής) προτιμήθηκε κατ' αρχήν, γιατί αφ' ενός το μακρύ πρωτεύον είναι μια πολύ ακριβότερη λύση (το πρωτεύον αναπτύσσεται σε όλο το μήκος της διαδρομής), αφ' ετέρου η αυτεπαγωγή αυτού του πρωτεύοντος είναι τόσο μεγάλη ώστε ο συντελεστής ισχύος της διάταξης θα ήταν απαράδεκτα χαμηλός. Για το λόγο αυτό, σε περίπτωση χρήσης πρωτεύοντος μεγάλου μήκους, η τροφοδοσία του γίνεται κατά τμήματα, δηλαδή με την ενεργοποίηση του πρωτεύοντος μόνο σ' ένα σχετικά μικρό τμήμα απ' όπου διέρχεται το ηλεκτροκίνητο όχημα.

Ο πρώτος και σημαντικότερος υποψήφιος ευθύγραμμος κινητήρας για εφαρμογή στην ηλεκτρομαγνητική πρόωση, είναι ο ευθύγραμμος κινητήρας επαγωγής. Είναι ίσως η φθηνότερη και απλούστερη λύση και μάλιστα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε αγώγιμο δευτερεύον (Αλουμινίου, Χαλκού ή ακόμη και Χάλυβα). Η. επικρατέστερη μορφή είναι ο ευθύγραμμος επαγωγικός κινητήρας απλής όψεως με βραχύ πρωτεύον και με δευτερεύον ένα αγώγιμο φύλλο από σκληρό κράμα αλουμινίου. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του επαγωγικού κινητήρα είναι το χαμηλό γινόμενο (η×cosφ) (δηλαδή βαθμός απόδοσης Χ τον συντελεστή ισχύος) που στην καλύτερη περίπτωση για πολύ καλή σχεδίαση σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας μπορεί να υπερβεί και το 0.75. Για σύγκριση αναφέρουμε ότι στους περιστροφικούς κινητήρες επαγωγής αυτό το γινόμενο συνήθως είναι πάνω από 0.80. Βεβαίως η χρήση ενός ακριβότερου δευτερεύοντος, που θα είναι ένα τύλιγμα (ή χυτό αλουμίνιο) στους αύλακες του σιδήρου υποστηρίξεως, μπορεί να

δώσει καλύτερα αποτελέσματα. Ένας άλλος σημαντικός ευθύγραμμος κινητήρας είναι ο σύγχρονος κινητήρας με μακρύ πρωτεύον, όπου το τριφασικό τύλιγμα του εκτείνεται σε όλο το μήκος της διαδρομής. Ο κινητήρας αυτός είναι βέβαια ακριβότερη λύση απ' τον ευθύγραμμο επαγωγικό κινητήρα με βραχύ πρωτεύον. Είναι δυνατόν όμως τόσο ο βαθμός αποδόσεως του να βελτιωθεί όσο και ο συντελεστής ισχύος του να γίνει ίσος με τη μονάδα. Αυτά σε σχέση με τον επαγωγικό κινητήρα αποτελούν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Στην ακριβότερη λύση όπου θα χρησιμοποιηθεί ευθύγραμμος κινητήρας με μακρύ πρωτεύον κατά μήκος της τροχιάς κινήσεως μπορούμε να ξεχωρίσουμε δυο κύρια συστήματα που έχουν προταθεί για τα υπέρ-ταχέα τρένων (με ταχύτητες έως 500km/h). Με τις ταχύτητες που επιτυγχάνονται απ’ τα συστήματα αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως εναλλακτική πρόταση του αεροπλάνου, για διαδρομές έως 1000km, από άποψη συνολικού χρόνου μεταφοράς κλπ.

Πρόκειται για τα συστήματα με ηλεκτροκίνητα οχήματα αναρτημένα με ένα ηλεκτροδυναμικό απωστικό σύστημα από υπεραγώγιμους μαγνήτες ή με ένα ηλεκτροδυναμικό ελκτικό σύστημα . Ο ευθύγραμμος κινητήρας ωθήσεως θα είναι ένας σύγχρονος κινητήρας με μακρύ πρωτεύον, ενώ το βραχύ δευτερεύον θα είναι ή ένα σύνολο από ισχυρότατους υπεραγώγιμους ηλεκτρομαγνήτες είτε ένα τύλιγμα συνεχούς σε αύλακες μαλακού σιδήρου, αναρτημένα στο κινούμενο όχημα. Η τροφοδοσία του πρωτεύοντος γίνεται από ενδιάμεσους σταθμός (A.C. προς A.C. μετατροπείς inverters) που βρίσκονται κατά μήκος της διαδρομής κάθε 1 έως 2 km, ανάλογα με την απαιτούμενη ταχύτητα του κινουμένου οχήματος σ' αυτό το τμήμα της γραμμής. Το σύστημα Transrapid π.χ. χρησιμοποιεί τύλιγμα συνεχούς σε αύλακες μαλακού σιδήρου που τροφοδοτείται από μπαταρίες επί του οχήματος. Οι μπαταρίες αυτές φορτίζονται από ευθύγραμμη επαγωγική γεννήτρια της οποίας το πρωτεύον βρίσκεται επί του οχήματος Στην περίπτωση των υπεραγώγιμων μαγνητών δεν απαιτείται σίδηρος ούτε στο πρωτεύον και το διάκενο πρωτεύοντος-δευτερεύοντος μπορεί ν’ αυξηθεί σημαντικά.

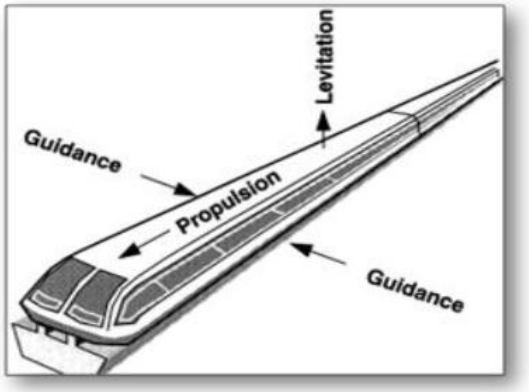
Στο σχήμα που ακολουθεί επεξηγείται η λειτουργία του συστήματος συγχρονισμού, προς τις απαιτήσεις εντάσεως ρεύματος και φασικής διαφοράς, για την επίτευξη της επιδιωκόμενης δυνάμεως και ταχύτητας .



ΣΧΗΜΑ: συγχρονισμός στο υπεραγώγιμο σύστημα MAGLEV.

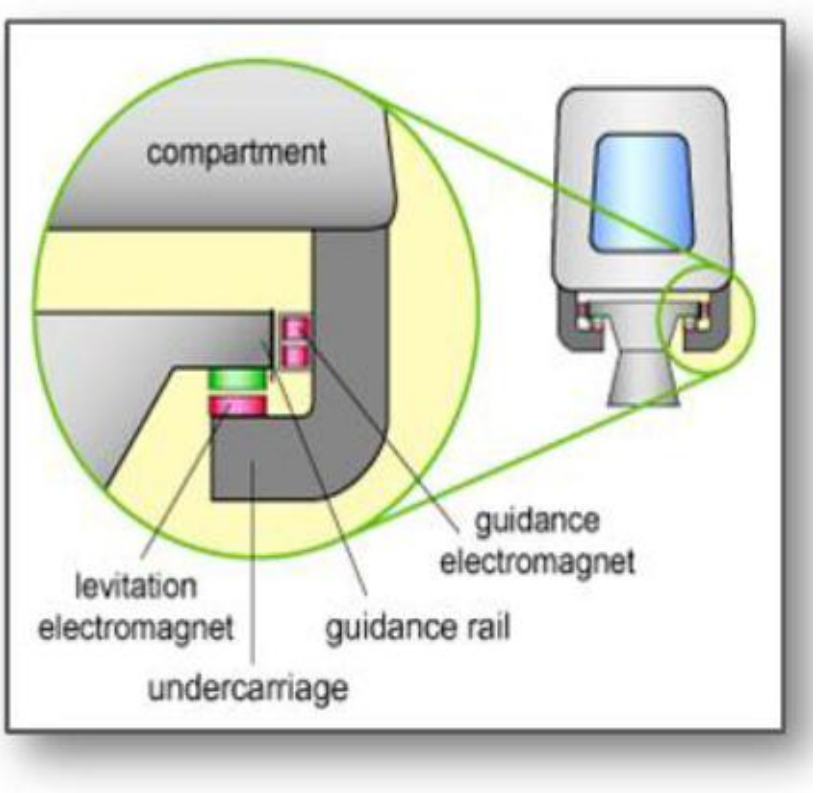
5.2 ΤΥΠΟΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ MAGLEV

Ο όρος Maglev αναφέρεται όχι μόνο στα οχήματα αλλά και στο σύστημα σιδηροδρόμων επίσης, που είναι σχεδιασμένο για τη μαγνητική ανύψωση, αιώρηση και προώθηση. Όλες οι λειτουργικές εφαρμογές της τεχνολογίας Maglev είχαν την ελάχιστη επικάλυψη με την τροχοφόρο τεχνολογία (συμβατικά τρένα), και δεν ήταν συμβατή με τις συμβατικές διαδρομές ραγών. Επειδή δε μπόρεσαν να μοιραστούν την υπάρχουσα υποδομή για τα συμβατικά τρένα, τα συστήματα Maglev έπρεπε να σχεδιαστούν ως πλήρη συστήματα μεταφορών εξ αρχής.



Εικόνα: Σημεία στα οποία εστιάζει η τεχνολογία προκειμένου να πετύχουμε ανύψωση και προώθηση .

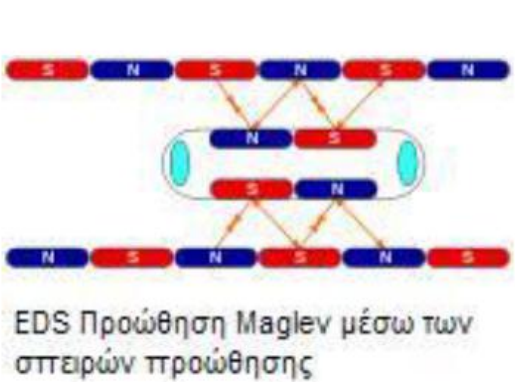
Υπάρχουν τρείς τρόποι τεχνολογιών μαγνητικής ανύψωσης Maglev.
1. Η **Ηλεκτρομαγνητική Ανύψωση (EMS)** που χρησιμοποιεί την ελκτική μαγνητική δύναμη ενός μαγνήτη κάτω από μια ράγα για να ανυψώσει το τραίνο πάνω από αυτζσ.
2. Η **Ηλεκτροδυναμική Ανύψωση (EDS)** που χρησιμοποιεί την απωστική δύναμη μεταξύ δύο μαγνητικών πεδίων για να ωθήσει το τραίνο μακριά από τη ράγα.
3. Η **Σταθεροποιημένη Μόνιμη Ανύψωση μαγνητών (SPM),** η οποία χρησιμοποιεί τις αντιτιθέμενες σειρές μόνιμων μαγνητών ώστε να ανυψώσει το τραίνο πάνω στη ράγα.
4. Μια άλλη πειραματική τεχνολογία, η οποία σχεδιάστηκε, αποδείχτηκε θεωρητικά, όμοια αναθεωρημένη και κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, και που πρόκειται σύντομα να χτιστεί είναι η **Μαγνητοδυναμική Ανύψωση (MDS)**, η οποία χρησιμοποιεί την ελκτική δύναμη μιας σειράς μόνιμων μαγνητών κοντά σε μια διαδρομή χάλυβα για να ανυψώσει το τραίνο και να το κρατήσει σταθερά σε ισχύ.
Αλλά ας μελετήσουμε μία προς μία τις παραπάνω τεχνολογίες κι ας δούμε ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας.
Ηλεκτρομαγνητική Ανυψως η (EMS)
Στα τρέχοντα Ηλεκτρομαγνητικά συστήματα ανύψωσης (EMS), το τραίνο ανυψώνεται επάνω από μια ράγα χάλυβα ενώ οι ηλεκτρομαγνήτες που συνδέονται με το τραίνο είναι προσανατολισμένοι προς τη ράγα από κάτω. Οι ηλεκτρομαγνήτες χρησιμοποιούν τον έλεγχο ανατροφοδότησης για να διατηρήσουν το τραίνο σε μια σταθερή απόσταση από τη διαδρομή (τοιχώματα διαδρόμου), περίπου στα 15 millimeters (0.5 in).



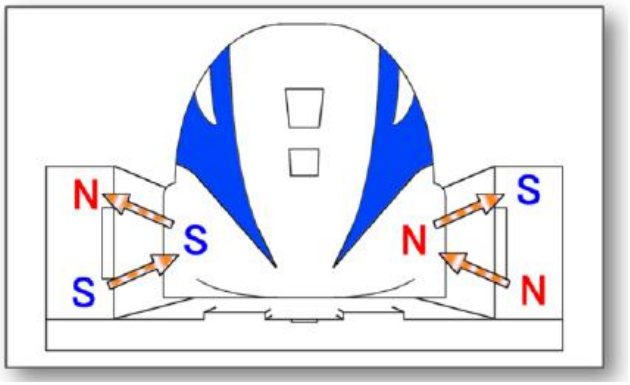
Εικόνα: Σύστημα EMS

Ηλεκτροδυναμική Ανύψωση (EDS)

Στην ηλεκτροδυναμική ανύψωση (EDS), τόσο η ράγα όσο και το τραίνο ασκούν από ένα μαγνητικό πεδίο το καθένα και το τραίνο ανυψώνεται και αιωρείται από των απωστική δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο. Το μαγνητικό πεδίο στο τραίνο παράγεται είτε από τους ηλεκτρομαγνήτες (όπως το Jr.Maglev) είτε από μία σειρά μόνιμων μαγνητών (όπως στο inductrack).

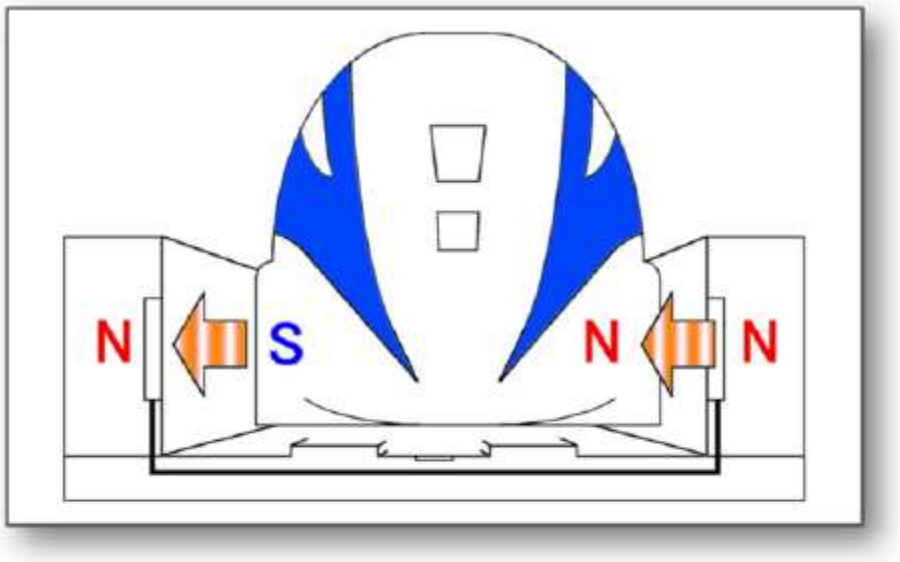


EDS Προώθηση Maglev μέσω των σπειρών προώθησης



Η απωστική δύναμη στη διαδρομή (διάδρομος) δημιουργείται από ένα προκληθεν μαγνητικό πεδίο στα καλώδια ή σε άλλες αγώγιμες λουρίδες. Σε αργές ταχύτητες, το ρεύμα που άγεται σε αυτά τα πηνία κι η επακόλουθη μαγνητική ροή δεν είναι αρκετά μεγάλη σε μέγεθος για να

υποστηρίξουν το βάρος του τραίνου. Γι αυτό το λόγο το τραίνο πρέπει να έχει τροχούς ή κάποια άλλη μορφή υποστήριξης έως ότου φτάσει σε μια ταχύτητα ικανή στο να επιτρέπει την ανύψωση. Τα πηνία προώθησης στον διάδρομο καθοδήγησης χρησιμοποιούνται για να ασκήσουν δύναμη στους μαγνήτες του τραίνου και να το κάνουν να κινηθεί προς τα εμπρός. Τα πηνία προώθησης που ασκούν δύναμη στο τραίνο και λειτουργεί ως μια αποτελεσματική γραμμική μηχανή (linear motor): ένα εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει τις σπείρες των πηνίων παράγει ένα συνεχώς ποικίλο μαγνητικό πεδίο το οποίο κινεί προς τα εμπρός το τραίνο κατά μήκος του διαδρόμου καθοδήγησης. Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι συγχρονισμένη για να ρυθμίζει την ταχύτητα του τραίνου. Η αντιστάθμιση μεταξύ του πεδίου που ασκείται στους μαγνήτες του τραίνου και στο εφαρμοζόμενο πεδίο δημιουργεί μια δύναμη προώθησης του τραίνου προς τα εμπρός.



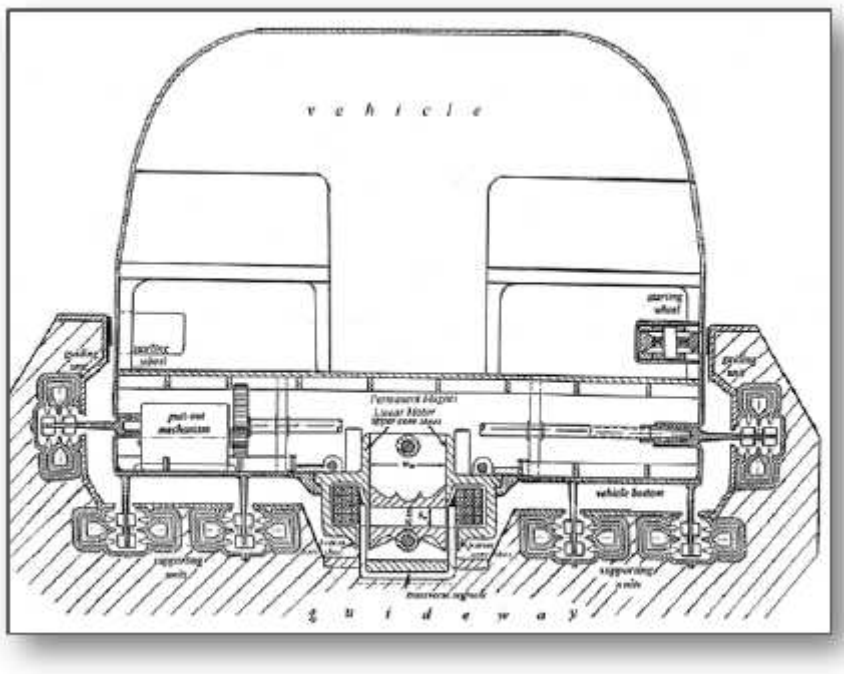
Εικόνα: Καθοδήγηση EDS

Σταθεροποιημένη Μόνιμη Ανύψωση μαγνητών (SPM)

Τα SPM Maglev συστήματα διαφέρουν από τα EDS στο ότι χρησιμοποιούν αντιτιθέμενες σειρές από σπάνιες μαγνητικές γαίες, (χαρακτηριστικά κράματα νεοδυμίου σε σειρά Halbach), στο διάδρομο και το όχημα δημιουργώντας ένα μόνιμο παθητικό μηχανισμό, όπου καμία δύναμη δεν απαιτείται για να διατηρείται μόνιμη ανύψως. Έτσι χωρίς να απαιτείται ρεύμα για την ανύψωση, το σύστημα έχει πολύ λιγότερη ηλεκτρομαγνητική έλξη, απαιτώντας κατά συνέπεια πολύ λιγότερη δύναμη για να μετακινήσουμε ένα φορτίο με δεδομένη ταχύτητα.

Εξαιτίας του θεωρήματος του Earnshaw, τα SPM Maglev συστήματα απαιτούν ένα μηχανισμό για να δημιουργήσουν πλευρική σταθερότητα (δηλ. που να ελέγχει την side-to-side μετακίνηση του οχήματος).

Ένας τρόπος να παρασχεθεί αυτή η σταθερότητα είναι να χρησιμοποιηθεί ένα σύνολο σπειρών κατά μήκος του κατώτερου σημείου της σειράς μαγνητών στο όχημα που αιωρείται, το οποίο κεντροθέτει το όχημα πάνω σε ράγες με τη βοήθεια μικρού ποσού ρεύματος. Επειδή τα πηνία φωνής δεν απαιτούνται για να παρέχουν ανύψωση και δεν υπάρχει σχεδόν καμία έλξη (προώθηση). Το σύστημα αυτό όπως προαναφέραμε χρησιμοποιεί λιγότερη δύναμη από τα άλλα συστήματα Maglev: όταν το όχημα πλοηγείται μια καμπύλη, ο χειριστής του το κινεί σε ένα σημείο ισορροπίας μέσα στην καμπύλη, έτσι ώστε το (μαγνητικό) κεντρομόλο τράβηγμα των μαγνητικών ραγών στο έδαφος να αντισταθμίσει την (κινητική) φυγόκεντρο ορμή του οχήματος. Αυτό το σημείο ισορροπίας ποικίλει βασισμένο στο βάρος του οχήματος, το οποίο ο χειριστής υπολογίζει αυτόματα, με συνέπεια μηδαμινή κατανάλωση ισχύος.



Εικόνα: Σύστημα MDS

5.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΥΨΩΣΗΣ

Κάθε εφαρμογή της αρχής μαγνητικής ανύψωσης για το ταξίδι-τύπου τραίνων οχημάτων, έχει τα πλεονεκτήματα της αλλά και τα μειονεκτήματα της.
Ο χρόνος είναι αυτός που θα δείξει ποια εφαρμογή θα κερδίσουν τόσο πρακτικά όσο και εμπορικά.

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ηλεκτρομαγνητική Ανύψωση (EMS)	Τα μαγνητικά πεδία μέσα και έξω από το όχημα είναι ασήμαντα. Αποδεδειγμένα εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία που μπορεί να πετύχει πολύ υψηλές ταχύτητες (500 km/h) χωρίς επιπρόσθετους τροχούς ή δευτερεύον σύστημα προώθησης να απαιτείται.	Ο χωρισμός μεταξύ του οχήματος και της διαδρομής πρέπει να ελέγχεται διαρκώς και να διορθώνεται από ηλεκτρονικά συστήματα ώστε να αποφεύγεται η σύγκρουση λόγω της ασταθούς φύσης της ηλεκτρομαγνητικής έλξης εξαιτίας της έμφυτης αστάθειας του συστήματος και των απαραίτητων σταθερών διορθώσεων από τα εξωτερικά συστήματα. Μπορεί να εμφανιστούν δονήσεις.
Ηλεκτρομαγνητική Ανύψωση (EDS)	Εξαιτίας των επί του οχήματος μαγνητών καθώς και του μεγάλου περιθωρίου μεταξύ τραίνου και διαδρόμου επιτυγχάνονται υψηλότερες ταχύτητες (καταγεγραμμένες ταχύτητες τραίνων 581km/h) παράλληλα η μεταφορά βαρύτερων φορτίων. Έχει αποδειχθεί πρόσφατα (Δεκέμβριος 2005) η επιτυχής επίτευξη διαδικασιών χρησιμοποιώντας υπεραγωγούς υψηλής θερμοκρασίας στους επί το όχημα μαγνήτες οι οποίοι ψύχονται με υγρό άζωτο.	Τα ισχυρά μαγνητικά πεδία επί του τραίνου θα καθιστούσαν το τραίνο απρόσιτο στους επιβάτες με βηματοδότες ή μαγνητικά μέσα αποθήκευσης όπως οι σκληροί δίσκοι και οι πιστωτικές κάρτες απαιτώντας τη χρήση ειδικού προστατευτικού καλύμματος. Οι περιορισμοί στην καθοδηγούμενη επαγωγικότητα περιορίζουν τη μέγιστη ταχύτητα του οχήματος. Το όχημα πρέπει να φέρει επιπρόσθετους τροχούς για ταξίδι χαμηλών ταχυτήτων.
Σταθεροποιημένη μόνιμη ανύψωση μαγνητών (SPM) - induktrack	Παρέχεται ασφαλής ανύψωση. Δεν απαιτείται καμία δύναμη για να ενεργοποιήσει τους	Απαιτεί ότι είτε κυλά με βοηθητικό σύστημα, είτε τμήματα της διαδρομής (διάδρομος) κινούνται όταν το όχημα

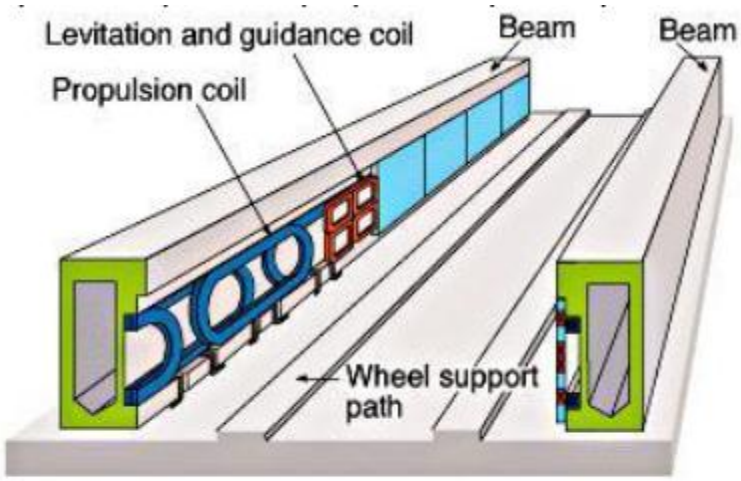
	μαγνήτες. Το μαγνητικό πεδίο είναι εντοπισμένο κάτω από το όχημα. Μπορεί να παράγει αρκετή δύναμη σε χαμηλές ταχύτητες (5km/h) ώστε να ανυψώσει το τραίνο. Σε περίπτωση διακοπής ρεύματος το όχημα επιβραδύνει μόνο του ακίνδυνα. Οι σειρές Halbach μόνιμων μαγνητών μπορούν να αποδειχθούν οικονομικώς πιο αποδοτικές από τους ηλεκτρομαγνήτες.	σταματήσει. Νέα τεχνολογία που είναι ακόμη υπό ανάπτυξη και δεν έχει μέχρι τώρα καμία εμπορική έκδοση ή πρωτότυπο συστημάτων πλήρους κλίμακας.

Ούτε το inductrack ούτε το υπεραγωγικό EDS είναι ικανά να ανυψώσουν οχήματα που βρίσκονται σε στασιμότητα. Ωστόσο το inductrack παρέχει ανύψωση κάτω από χαμηλή ταχύτητα. Για αυτά τα συστήματα απαιτούνται τροχοί στο αμάξωμα του τραίνου. Τα EMS συστήματα δεν απαιτούν τραίνα με ρόδες ως υποβοήθηση.

Transrapid, Emsland, Germany

5.4 Προωθητικό σύστημα –σταθερότητα-καθοδήγησης

Ένα EMS σύστημα μπορεί να παρέχει τόσο ανύψωση όσο και προώθηση, χρησιμοποιώντας μια γραμμική μηχανή πάνω στο όχημα. Τα συστήματα EDS μπορούν μόνο να ανυψώσουν το τραίνο χρησιμοποιώντας μαγνήτες που βρίσκονται πάνω στο όχημα, χωρίς να το ωθήσουν προς τα εμπρός. Υπό αυτή τη μορφή τα οχήματα χρειάζονται κάποια άλλη τεχνολογία για προώθηση. Μία γραμμική μηχανή (σπείρες προώθησης) που τοποθετείται στο διάδρομο (ράγες) είναι μία λύση. Πέρα από τις μεγάλες αποστάσεις όπου το κόστος των πηνίων προώθησης είναι απαγορευτικός, ένας προωθητήρας ή μια jet μηχανή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθείς ως προωθητικό μέσο.



Σταθερότητα

Το θεώρημα του Earnshaw δείχνει ότι οποιοσδήποτε συνδυασμός μαγνητών δε μπορεί να βρίσκεται αιωρούμενος έχοντας ισορροπία. Εν τούτοις τα διάφορα συστήματα ανύψωσης επιτυγχάνουν το σταθερό μετεωρισμό με την παραβίαση των υποθέσεων του Earnshaw. Το θεώρημα υποθέτει ότι οι μαγνήτες είναι στατικοί και αμετάβλητοι σε πεδίο δύναμης και ότι η διαπερατότητα είναι σταθερή παντού. Τα συστήματα EMS στηρίζονται στη χρήση ηλεκτρονικού σταθεροποιητή.
Τέτοια συστήματα μετρούν συνεχώς τη φέρουσα απόσταση από τα τοιχώματα της διαδρομής και ρυθμίζουν το ρεύμα που διαρρέει τους ηλεκτρομαγνήτες αναλόγως. Όλα τα συστήματα EDS είναι κινούμενα συστήματα (κανένα EDS σύστημα δε μπορεί να ανυψώσει το τραίνο εκτός και αν είναι σε κίνηση). Επειδή τα οχήματα Maglev ουσιαστικά πετούν, η σταθεροποίηση της κλίσης, της κύλισης και της παρέκκλισης απαιτείται από τη μαγνητική τεχνολογία.

Καθοδήγηση

Μερικά συστήματα χρησιμοποιούν τα συστήματα μηδενικής ροής. Αυτά χρησιμοποιούν ένα πηνίο το οποίο τυλίγεται έτσι ώστε να εισάγει δύο αντιτιθέμενα, εναλλασσόμενα πεδία. Όταν το όχημα είναι σε ευθεία θέση, κανένα ρεύμα δε το διαρρέει, αλλά κινείται εκτός γραμμής δημιουργείται μια μεταβαλλόμενη ροή που παράγει ένα πεδίο που το ωθεί πίσω στη γραμμή.

5.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΩΝ ΤΡΑΙΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ (MAGLEVS)

Η χώρα που έδειξε μεγάλο ενδιαφέρον για εφαρμογές MAGLEV ήταν καταρχήν η Γερμανία με το σύστημα TRANSRAPID, το οποίο ήδη εφαρμόστηκε στην Γερμανία και στην Κίνα.

Ιστορικά προηγήθηκε η Ιαπωνία με το σύστημα HSST (High Speed Surface Transport), ενώ πρόσφατα η Ελβετία με το SWISS METRO προχωρεί ακόμη ένα βήμα μπροστά σχεδιάζοντας το γεωπλάνο για τις υπόγειες μεταφορές του μέλλοντος .
Άφθονα στοιχεία για τις εφαρμογές αυτές μπορεί να βρει κανείς στο internet χρησιμοποιώντας τις λέξεις κλειδιά (όπως γράφτηκαν στα αγγλικά) και στο WIKIPEDIA στις λέξεις MAGLEV TRAIN, και JAPAN MAGLEV, WIKI MAGLEV κτλ. Συνοπτικά αναφέρονται τα ακόλουθα:

ΓΕΡΜΑΝΙΑ-ΚΙΝΑ (Transrapid)
Δοκιμάστηκε και αναπτύχθηκε στην Γερμανία από την Siemens. Εφαρμόζεται ήδη στην Κίνα (Γραμμή Shangai/Pudongna 30 km). Σχεδιάζεται επέκταση του συστήματος κατά 160km προς την πόλη Hangzhou.
- Μέγιστη ταχύτητα: 500 km/h, Μέση: 300 km/h.
- Κινητήρας ωθήσεως: Σύγχρονος ευθύγραμμος κινητήρας (LSM) με υποστήριξη σιδήρου .
- Σύστημα ανάρτησης: Ελκτικό ηλεκτρομαγνητικό σύστημα με διάκενο ανάρτησης 1cm. Κάθε μαγνήτης δρα ανεξάρτητα με τα δικά της αισθητήρια (διακένου, ταχύτητας, επιτάχυνσης, μαγνητικής ροής).
- Η τροχιά είναι αναρτημένη σε ύψος 5m από το έδαφος σε πυλώνες ανά 24m.

ΙΑΠΩΝΙΑ
-Σύστημα YAMANASHI (υπό δοκιμή). Μέγιστη ταχύτητα 480km/h, ώθηση σύγχρονος κινητήρας, πλάγια ανάρτηση με υπεραγώγιμους μαγνήτες.
- Σύστημα HSST 200km/h.
- Κινητήρας ωθήσεως: Ευθύγραμμος κινητήρας επαγωγής (LIM) .
- Σύστημα ανάρτησης: Ελκτικό σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης με Διάκενο 1 cm

-LINEAR METRO (HITACHI). Προτείνεται η χρήση ευθύγραμμων κινητήρων για Τα συμβατικά METRO με τα ακόλουθα επιχειρήματα:
• Οι τροχοί χρησιμοποιούνται μόνον για ανάρτηση αρα η διάμετρος τους μικραίνει δίνοντας την δυνατότητα στην σήραγγα του METRO να μικρύνει καθ' ύψος.
Αρά η κατασκευή της γίνεται οικονομικότερη.
• Ο γραμμικός κινητήρας ώθησης επιτρέπει ανάβαση υπό κλίση έως 8% ενώ η ώθηση μέσω περιστροφικών κινητήρων και των τροχών επιτρέπει κλίσεις έως 3.5%. Αυτό συνεπάγεται την ευκολότερη, συντομότερη και οικονομικότερη χάραξη του METRO μέσα στις πόλεις,

ΕΛΒΕΤΙΑ (Swiss Metro)
Σε εξέλιξη η κατασκευή συστήματος υπόγειας σύνδεσης (με διπλή υπόγεια σήραγγα) των κύριων πόλεων της Ελβετίας. Ευθύγραμμη πρόωση και ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση οχημάτων σε σήραγγες, με μειωμένη πίεση αέρος (άρα και πυκνότητας) κάτω από το 10% της ατμοσφαιρικής. Εκτιμάται ότι αυτά τα οχήματα, που μερικοί αποκαλούν γεωπλάνα, θα αποδειχθούν ως μια απολύτως ρεαλιστική πρόταση για το μέλλον των μεταφορών μεσαίων και μεγάλων αποστάσεων, για τον 210 Αιώνα.

Η.Π.Α. ηλεκτρομαγνητικοί εκτοξευτές
Σημαντική περιοχή ενδιαφέροντος για πιθανές εφαρμογές της ηλεκτρομαγνητικής πρόωσης και ανάρτησης αποτελεί ο τομέας των ηλεκτρομαγνητικών εκτοξευτών αεροπλάνων (από αεροπλανοφόρα, Electromagnetic Aircraft Launch System) και πυραύλων για διαστημικές (launch loop) και άλλες εφαρμογές (Railgun).

Χρήση ευθύγραμμων κινητήρων σε συμβατικά τραίνα
Τέλος παραθέτουμε την ακόλουθη σειρά τραίνων σε διάφορες περιοχές του κόσμου όπου χρησιμοποιούνται ευθύγραμμοι κινητήρες για την ώθηση συμβατικών κυρίως τραίνων:

• Scarborough RT line (Toronto, Canada, 1985)
• SkyTrain (Vancouver, Canada, 1986)
• Nagahori Tsurumi-ryokuchi Line (Osaka, Japan, 1990)
• Toei Ōedo Line (Tokyo, Japan, 1991)
• Kaigan Line (Kobe, Japan, 2001)
• AirTrain JFK (New York, USA, 2003)
• Nanakuma Line (Fukuoka, Japan, 2005)
• Guangzhou Metro Line 4 (Guangdong Province, China, 2005)
• Imazatosuji Line (Osaka, Japan, 2006)
• Green Line (Yokohama, Japan, Under construction)
• Tōzai Line (Sendai, Japan, Under construction)
• Beijing Subway Capital Airport Track (Beijing, China)

Βιβλιογραφία

[1] Μαρία Γ. Ιωαννίδου, 'Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών', ΕΜΠ, Αθήνα 2003

[2] Χρήστος Δ. Παπαγεωργίου, "Ευθύγραμμοι Κινητήρες",

[4] Ιωάννης Α. Τεγόπουλος, 'Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Β', Εκδόσεις Συμμετρία 1991

[5] Χ. Α. Παπαγεωργόπουλος, 'Φυσική Στερεάς Κατάστασης', Δεύτερη Έκδοση, Ιωάννινα 2003

[6] Stephen J. Chapman, 'Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC', Εκδόσεις Τζιόλα 2003

[7] Ε. Παπαδημητράκη-Χλίχλια Ι. Α. Τσουκαλάς, Ηλεκτρισμός, Τρίτη Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1995

[8] J. Richard H. Bube, Εισαγωγή στη Φυσική Στερεάς Κατάστασης, Τρίτη Έκδοση, Academic Press, New York

[9] Ε. Ν. Οικονόμου, Φυσική Στερεάς Κατάστασης, Τόμος Ι: Μέταλλα Ημιαγωγοί Μονωτές, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης