



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ - ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

& ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΙΟΥΡΟΥΝΗΣ Π. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επιβλέπουσα: Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβρης 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΙΟΥΡΟΥΝΗΣ Π. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επιβλέπουσα: Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Νοεμβρίου, 2016.

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

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

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

Αθήνα, Σεπτέμβρης 2016

.....
Σιουρούνης Π. Βασίλειος

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

Copyright © Σιουρούνης Βασίλειος, 2016.

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχει σαν σκοπό να αναδείξει μια καινοτόμο τεχνολογία στον τομέα τόσο των μεταφορών ανθρώπινου δυναμικού όσο και των εμπορευμάτων, η οποία δεν έχει ακόμα εφαρμοστεί στην Ελλάδα. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στις αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ευθύγραμμων ηλεκτροκινητήρων και συγκεκριμένα σκοπεύουμε να αναλύσουμε την ευστάθεια των συστημάτων κίνησης για ηλεκτρομαγνητικές αναρτήσεις.

Στην αρχή, παρουσιάζεται μια σύντομη αναφορά στους ηλεκτροκινητήρες, την ηλεκτρική κίνηση και τους ευθύγραμμους κινητήρες. Στην συνέχεια, αναλύουμε την δομή και λειτουργία του Transrapid που περιλαμβάνει την ιστορική διαδρομή της τεχνολογίας των ηλεκτρομαγνητικά-κινούμενων-αναρτώμενων τραίνων από τη σύλληψη της ιδέας έως σήμερα, τα οχήματα και τους διαδρόμους κίνησης, τη δομή του κέντρου λειτουργίας και ελέγχου ολόκληρου του συστήματος, τη τεχνολογία ευθύγραμμης κίνησης και ανάρτησης, το σύστημα επαγωγικής παροχής ηλεκτρικού ρεύματος IPS, τα γενικά χαρακτηριστικά οφέλη της λειτουργίας των Transrapid Maglev τραίνων και τέλος μια συνοπτική παρουσίαση του TGV και των υπόλοιπων ανταγωνιστικών τεχνολογιών.

Εν συνεχεία, ακολουθεί ένα μεγάλο μέρος της εργασίας, στο οποίο παρουσιάζεται εκτενώς η λειτουργία των σύγχρονων ευθύγραμμων κινητήρων (LSM), καθώς και των συστημάτων ανάρτησης EDS (ηλεκτροδυναμικό-απωστικό) και EMS (ηλεκτρομαγνητικό-ελκτικό). Στο τέλος της παρουσίασης αυτής, παρατίθενται τα διάφορα Maglev projects που υπάρχουν σε όλο τον κόσμο, καθώς και μια αναφορά των διαφόρων σχετικών καινοτόμων σχεδίων προς βελτίωση.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρομαγνητική, Πρόωση, Ανάρτηση, Αιώρηση, EDS, Maglev, Ευθύγραμμος, Κινητήρας, LSM, Ωθηση, Υπεραγωγός, Transrapid, TGV

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to highlight an innovative technology in the field of both human and merchandise transportation which has not yet been implemented in Greece. This technology is based on the principles of electromagnetism which led to the development of linear motors and specifically we intend to analyze the stability of magnetic levitation or suspension moving systems.

At first, there is a brief reference to the electric motion, electric and linear motors. Subsequently, the infrastructure and operation of the Transrapid system is analyzed. The analysis consists of the history and chronology of electromagnetic levitated trains, the vehicles and their track guideways, the operation and control center structure analysis, linear drive and suspension technology, electric power inductive supply system IPS, generic benefits of Transrapid Maglev trains and finally a summary of the TGV and other competing technologies.

Furthermore, the functioning of modern linear motor (LSM) is extensively presented, as well as the suspension systems EDS (electrodynamic-repellent) and EMS (electrodynamic-traction). At last, there is a reference to various existing Maglev projects all over the world and innovative improvement concepts.

KEY WORDS

Electromagnetic, Propulsion, Suspension, Levitation, EDS, Maglev, Linear, Motor, LSM, Hyperconductor, Transrapid, TGV

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου, κα Μαρία Γ. Ιωαννίδου, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές, τις υποδείξεις και την γνώση που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο θέμα γόνιμης δημιουργίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και όλους τους συμφοιτητές που γνώρισα στην διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Βασίλης Σιουρούνης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ

1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.2	ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	15
1.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	18
1.4	ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΣΥΣΤΗΜΑ TRANSRAPID – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Maglev

2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	24
2.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ OCS (OPERATION CONTROL SYSTEM)	27
2.3	ΣΥΣΤΗΜΑ ΩΘΗΣΗΣ - PROPULSION SYSTEM	30
2.4	ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ - LEVITATION SYSTEM.....	33
2.5	ΟΧΗΜΑΤΑ (VEHICLES)	40
2.6	ΔΙΑΔΡΟΜΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ - GUIDEWAY	44

2.7	TGV ΚΑΙ ΑΛΛΟΙ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΕΣ	49
2.7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	49
2.7.2	TGV	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ - LSM

3.1	ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ (ΣΕΚ).....	55
3.2	ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ...	59
3.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΟΣ	63
3.4	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΣΗ	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ EMS-EDS

4.1	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΕΛΚΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ (EMS)	66
4.2	ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΠΩΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ (EDS).....	70
4.2.1	EDS ΜΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ.....	70
4.2.2	EDS ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΕΣ	76
4.2.3	ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ.....	82
4.3	ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ.....	83

4.4	ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΕΣ ΑΓΩΓΙΜΕΣ ΣΠΕΙΡΕΣ	86
4.5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

PROJECTS Maglev-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΧΜΗΣ

5.1	Maglev PROJECTS ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ	92
5.2	ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΣΧΕΔΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ	93

	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	98
--	----------------	----

	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99
--	--------------------	----

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι, ίσως από τα πιο σημαντικά και θεμελιώδη πεδία γνώσης και εφαρμογής στην επιστήμη του ηλεκτρολόγου μηχανικού. Η απόλυτη και άμεση σύνδεση της ηλεκτρικής κίνησης με την ανθρώπινη δραστηριότητα, δείχνει τον βαθμό αναγκαιότητας αυτής στην ανθρωπότητα και τη σημασία που έχει η περαιτέρω ανάπτυξή της, έτσι ώστε να συμβάλλει στην δημιουργία πολλαπλών οφελών στην καθημερινή ζωή.

Η μηχανική καθώς και ο ηλεκτρισμός είναι απόλυτα συνδεδεμένα με τον άνθρωπο, και απαντώνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών της καθημερινότητας όπως είναι οι μηχανές, π.χ τα ηλεκτρικά τρένα, λεωφορεία, πλοία, και αυτοκίνητα, συστήματα ανύψωσης (γερανοί, ανελκυστήρες κ.α.), μεταφοράς και περιστροφής. Όλες αυτές οι μηχανές για να κινηθούν χρειάζονται ισχύ από κάποια κλάσματα του Watt μέχρι χιλιάδες η και εκατομμύρια Watt. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, ότι το αντικείμενο μελέτης των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης έχει αναρίθμητες πρακτικές εφαρμογές, αποτέλεσμα των οποίων είναι οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Ένα από αυτά είναι η ποιοτική βελτίωση των μέσων μεταφοράς (π.χ. άνεση, ταχύτητα, ασφάλεια), με ταυτόχρονη μείωση του ενεργειακού, οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους.

Σύμφωνα με τις επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις που λαμβάνουν μέρος τις τελευταίες δεκαετίες, δημιουργήθηκε μια νέα ώθηση και νέες δυνατότητες στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, τα οποία τα καθιστούν ακόμα πιο αποδοτικά και αποτελεσματικά στην λειτουργία τους. Τη σημερινή εποχή, θεωρούνται αναντικατάστατα και ως εκ τούτου, υπάρχει τεράστιο ενδιαφέρον και προοπτικές για το πεδίο αυτό. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η μελέτη και παρουσίαση αυτών είναι αναγκαία για την ενδελεχή κατανόησή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θεμελίωση των αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού το 1831 από τους Michael Faraday και Joseph Henry, καθώς και η ανάπτυξη και εξέλιξη των πρώιμων ηλεκτρικών κινητήρων, σήμαναν την γέννηση της ηλεκτρικής κίνησης και των συστημάτων που προκύπτουν από αυτήν. Το 1888 παράλληλα με τον AC κινητήρα του Tesla αναπτύχθηκε και ο DC κινητήρας του Thomas Edison, με ανάλογη επιστημονική διαμάχη, ως προς το βέλτιστο της απόδοσης και της λειτουργίας. Η διαμάχη αυτή, αποτέλεσε το έναυσμα της εξέλιξης και βελτίωσης των δύο αυτών ειδών κινητήρων, και εφαρμογής αυτών σε ολόένα και περισσότερους τομείς, κυρίως μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο. Λόγω των πλεονεκτημάτων της ευρείας παροχής AC ρεύματος, επικράτησε τελικά ο AC κινητήρας του Nicola Tesla.

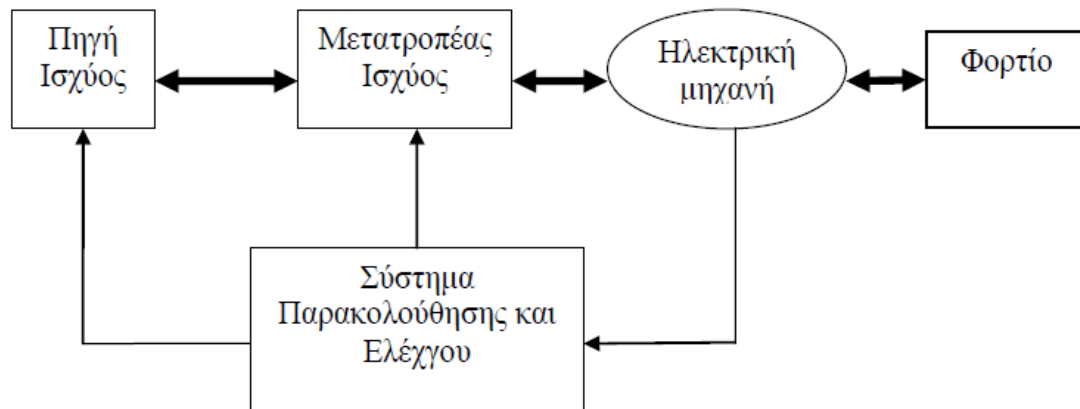
Η πραγματική επανάσταση, όμως, στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, ήρθε όταν αποκτήθηκε η δυνατότητα για ακριβή έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων, ώστε να επιτυγχάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα και μάλιστα αυτόματα. Τα πρώιμα συστήματα ελέγχου (μηχανικά ή ηλεκτρικά) δεν παρείχαν αρκούντως ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ είχαν εξαιρετικά χαμηλή απόδοση. Το τρανζίστορ, αρχικά, και η εξέλιξη της τεχνολογίας αυτού στα διάφορα προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος, έλυσαν το πρόβλημα και δημιούργησαν εύφορο έδαφος για την περαιτέρω ανάπτυξη του κλάδου.

Στην γενική τους μορφή, τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης συνιστούν ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά συστήματα, τα οποία αποτελούνται από πέντε θεμελιώδεις βαθμίδες:

- Πηγή ισχύος
- Μετατροπέα ισχύος

- Ηλεκτρική μηχανή
- Φορτίο
- Σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου

Η διασύνδεση παρακολούθησης και ελέγχου απεικονίζεται διαγραμματικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.1: Απλοποιημένο διάγραμμα τυπικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης

Όπως προκύπτει από το παραπάνω σχήμα, η ροή ενέργειας είναι αμφίδρομη. Είναι δυνατόν δηλαδή είτε η ηλεκτρική ενέργεια να μετατρέπεται και να μεταφέρεται προς την ηλεκτρική μηχανή και να αποδίδεται ως μηχανική στο φορτίο, είτε περίσσεια μηχανικής ενέργειας που διαθέτει το φορτίο, να μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της ηλεκτρικής μηχανής και να επιστρέφει μέσω του μετατροπέα προς την πηγή ηλεκτρικής ισχύος.

Η κάθε μια από τις παραπάνω βαθμίδες, απαιτείται να λειτουργεί, με τη μέγιστη δυνατή απόδοση και την καλύτερη δυνατή συνεργασία με τις υπόλοιπες βαθμίδες, έτσι ώστε, το συνολικό σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα. Η σύγχρονη τάση, μάλιστα, για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών απαιτήσεων, προστάζει το συνολικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση του συστήματος μετατροπέα –μηχανής- συστήματος ελέγχου, έτσι ώστε, η αλληλεπίδρασή τους κατά τη λειτουργία να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Όσο αφορά στο γενικευμένο αυτό σύστημα ηλεκτρικής κίνησης, η παροχή ισχύος είναι δυνατόν να προέρχεται από το εκάστοτε δίκτυο (τριφασική συμμετρική παροχή εναλλασσόμενης τάσης), είτε, να πρόκειται για συνεχή (ή ανορθωμένη) τάση από ανορθωτικές διατάξεις, συσσωρευτές, φωτοβολταϊκές συστοιχίες και κυψέλες καυσίμου. Ο μετατροπέας ισχύος, ο οποίος παρεμβάλλεται ανάμεσα στην πηγή ισχύος και στην ηλεκτρική μηχανή, έχει ως σκοπό, είτε απλά να αποκαταστήσει δυνατή την λειτουργία της, ή επιπλέον, να ελέγξει τη λειτουργία αυτής. Το σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου, άμεσα συνδεδεμένο, προϋποθέτει την λειτουργία των δύο παραπάνω βαθμίδων. Είναι εκείνο το σύστημα, το οποίο, ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου, τις προδιαγραφές και τη λειτουργία της δράσης ελέγχου (μέσω αισθητήρων και μετρητικών διατάξεων), θα δώσει στην έξοδο την επιθυμητή απόκριση. Η ηλεκτρική μηχανή, η οποία μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική (και αντιστρόφως), είναι το βασικό στέλεχος του συστήματος. Το είδος του ηλεκτροκινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στο σύστημα, εξαρτάται άμεσα από το φορτίο το οποίο θα κληθεί να εξυπηρετήσει. Οι δύο βασικές κατηγορίες διαχωρισμού των ηλεκτροκινητήρων είναι οι εξής: Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος και Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος.

Το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής, το κατέχουν οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, διαχωρισμένοι με την σειρά τους σε σύγχρονους και ασύγχρονους ηλεκτροκινητήρες. Συνήθως αυτοί, απαντώνται σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, ως περιστροφικοί ή κυλινδρικοί κινητήρες.

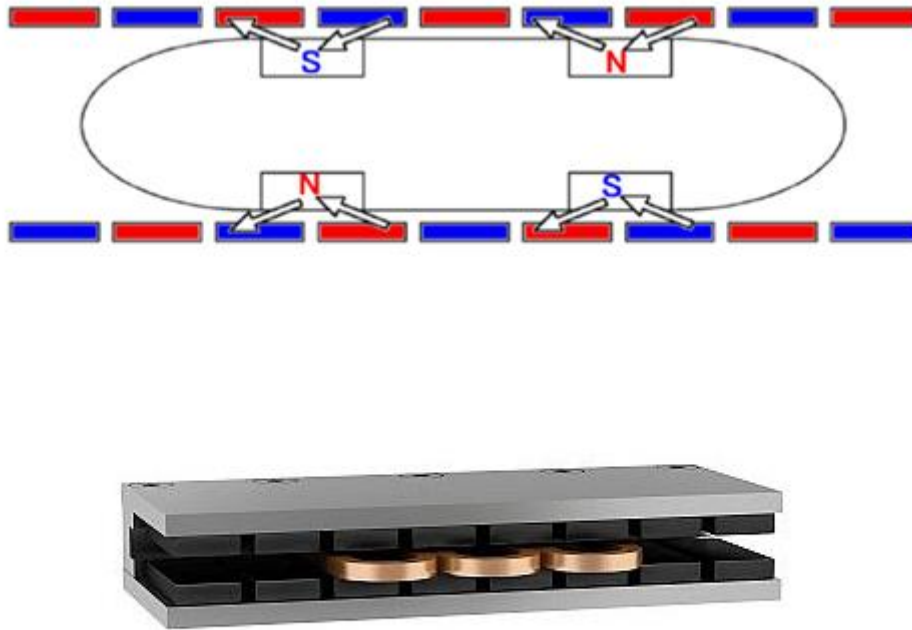
Τέλος το φορτίο αποτελεί το πρωταρχικό στοιχείο ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, πάνω στο οποίο δομείται όλος ο σχεδιασμός αυτού. Είναι άμεσα συνδεδεμένο στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα και ανταλλάσσει με αυτόν μηχανική ενέργεια. Η ποικιλία στην μορφή των φορτίων (σταθερής ισχύος, σταθερής ροπής, γραμμικής ροπής, παραβολικής ροπής) έχει συμβάλει σημαντικά στην εξέλιξη της θεωρίας και εφαρμογής των ηλεκτρικών συστημάτων γενικά, και των επιμέρους βαθμίδων τους ξεχωριστά [1].

1.2 ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΕΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες κατ' αρχήν μπορούν να διαιρεθούν σε όσα είδη διαιρούνται ο αντίστοιχοι περιστροφικοί κινητήρες, απ' τους οποίους μπορούν να προέλθουν με γεωμετρική ανάπτυξη. Έτσι έχουμε ευθύγραμμους σύγχρονους κινητήρες, ευθύγραμμους επαγωγικούς κινητήρες, ευθύγραμμους κινητήρες μαγνητικής αντιστάσεως κλπ. Επιπλέον οι ευθύγραμμοι κινητήρες μπορεί να διαιρεθούν σε διάφορες μορφές, τις κυριότερες απο τις οποίες αναφέρουμε στην συνέχεια.

Ευθύγραμμος κινητήρας επαγωγής, καλείται ο πολυφασικός ηλεκτρικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), ο οποίος έχει ευθύ στάτη, ούτως ώστε, αντί να παράγει περιστροφική, παράγει ευθύγραμμη κίνηση κατά μήκος του. Η πιο κοινά απαντώμενη μορφή λειτουργίας του βασίζεται στο μοντέλο του Lorentz, κατά το οποίο, η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι γραμμικά ανάλογη του φορτίου και του μαγνητικού πεδίου ($F = qV \times B$).

Στην ουσία, ο ευθύγραμμος περιστροφικός κινητήρας, είναι ο συνήθης περιστροφικός κινητήρας επαγωγής “ξετυλιγμένος”. Έτσι, ο δρομέας μετατρέπεται σε μια ράγα μαγνητών η σπειρωμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, το φορτίο μπορεί να συνδεθεί απευθείας στον κινητήρα, και επιτυγχάνεται ευθύγραμμη κίνηση, χωρίς περιστροφή, στις ευθύγραμμες συσκευές μετάδοσης.



Εικόνα 1.2.1: Σχέδιο ευθύγραμμου επαγωγικού κινητήρα [4]

Οι ευθύγραμμοι κινητήρες, μπορούν να διακριθούν σε όσα είδη διακρίνονται και οι αντίστοιχοι περιστροφικοί κινητήρες, από τους οποίους, μπορούν να προέλθουν με γεωμετρική ανάπτυξη. Έτσι, έχουμε DC ευθύγραμμους κινητήρες με ηλεκτρομαγνητικούς πόλους (μαγνήτες), σύγχρονους ευθύγραμμους κινητήρες (LSM), επαγωγικούς, μαγνητικής αντίστασης, υστερήσεως, κ.λ.π. Άλλες διαφοροποιήσεις μπορούν να προέλθουν με βάση αν ο στάτης ή ο δρομέας θα είναι βραχύς. Στις περισσότερες εφαρμογές, συναντώνται ευθύγραμμοι κινητήρες βραχέος δρομέα. Ο αριθμός των όψεων του πρωτεύοντος δίνει μια άλλη διαφοροποίηση. Έτσι, δύναται να υπάρχουν κινητήρες, των οποίων το δευτερεύον υποστηρίζεται συνήθως από σίδηρο, ή διπλής όψης. Ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται η μαγνητική ροή στον κινητήρα μπορεί, επίσης, να προσφέρει άλλες διαφοροποιήσεις. Η ροή, μπορεί να είναι οριζόντια ή εγκάρσια, με το πολικό βήμα να απαιτείται να μεταλλάσσεται [4].

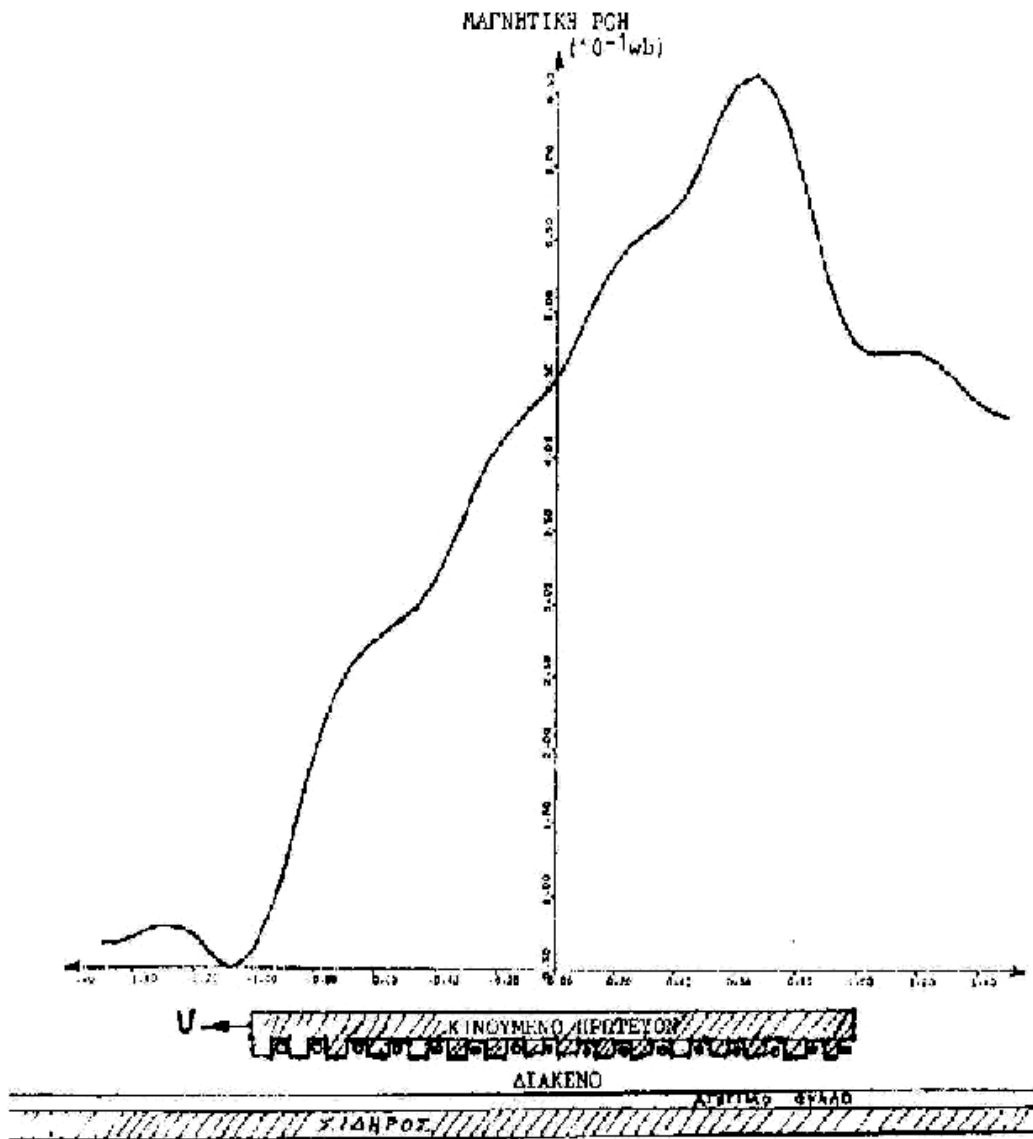
1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Παρακάτω γίνεται σύγκριση μεταξύ του ευθύγραμμου κινητήρα και του περιστροφικού.

Υπάρχει κατ' αρχάς 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 γραμμικού κινητήρα 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.

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 παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1.3: 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 περιφέρειάς 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.

Επίσης είναι σημαντικό να παραθέσουμε τα κυριότερα πλεονεκτήματα τα οποία αποκομίζονται με τη δημιουργία του ευθύγραμμου κινητήρα, έναντι του περιστροφικού.

- **Υψηλές ταχύτητες:** Η μέγιστη ταχύτητα ενός ευθύγραμμου κινητήρα, περιορίζεται μόνο από την τάση δικτύου και την ταχύτητα των ηλεκτρονικών έλεγχου.
- **Υψηλή ακρίβεια:** Η ακρίβεια, η ανάλυση και η περιοδικότητα ενός συστήματος ευθύγραμμου κινητήρα, ελέγχεται από σύστημα ανατροφοδότησης.
- **Γρήγορη απόκριση:** Το ποσοστό απόκρισης ενός συστήματος οδήγησης ευθύγραμμου κινητήρα, μπορεί να είναι 100 φορές μεγαλύτερο από αυτό μιας μηχανικής μετάδοσης. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες επιταχύνσεις και μικρότερους χρόνους αποκατάστασης, και κατά συνέπεια μεγαλύτερη απόδοση.
- **Ακαμψία:** Επειδή δεν υπάρχει κανένας μηχανικός σύνδεσμος, η αύξηση της ακαμψίας είναι απλά θέμα κέρδους και φορτίου. Το εύρος κίνησης μπορεί να είναι μεγαλύτερο από αυτό ενός φορτίου οδηγούμενου από σύστημα τροχών.
- **Μηδενικοί κραδασμοί:** Χωρίς μηχανικούς συνδέσμους δεν υπάρχουν κραδασμοί. Ωστόσο, υπάρχουν αναπόφευκτες αναταράξεις στο όχημα, σε περιπτώσεις διόρθωσης της πορείας του.
- **Ελεύθερη συντήρηση:** Επειδή, οι σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες δεν έχουν συνδεδεμένα εξαρτημένα μέρη, η συντήρηση και επισκευή, μπορεί να είναι ανεξάρτητη.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα εξίσου βασικά είναι και τα μειονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής :

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

β) Υψηλών απαιτήσεων και πολυπλοκότητας συστήματα οδήγησης και έλεγχου:

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

γ) Μεγαλύτερη δύναμη / μονάδα φορτίου: Ένα στοιχείο στο οποίο υστερούν οι ευθύγραμμοι κινητήρες είναι η δύναμη ανά μονάδα φορτίου. Έχουμε αναφέρει πως η συμπεριφορά τους είναι χειρότερη από αυτή των περιστροφικών κινητήρων ως προς τη δύναμη ώθησης, την απόδοση και το συντελεστή ισχύος. Επιπλέον υπάρχουν και τα φαινόμενα των άκρων και το φαινόμενο της οδόντωσης τα οποία έχουν δυσμενείς επιδράσεις στην απόδοση των ευθύγραμμων κινητήρων.

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

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

1.4 ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Σε έναν περιστροφικό κινητήρα βασικά ενδιαφερόμαστε για τη ροπή περιστροφής του δρομέα, που αντιστοιχεί στον ευθύγραμμο κινητήρα, στη δύναμη πρόωσης. Το πρόβλημά του αν υπάρχουν και άλλες δυνάμεις παραμένει 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). Σε έναν ευθύγραμμο κινητήρα όμως κατ' αρχάς δεν εξισορροπούνται οι "ακτινικές" δυνάμεις οι οποίες, με την ανάπτυξη του περιστροφικού κινητήρα σε ευθύγραμμο, γίνονται όλες συνπαράλληλες. 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 ευθύγραμμων κινητήρων θα ισχύουν τα εξής όσο 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' επαγωγής αντιθέτου φοράς προς τα ρεύματα του στάτη. Η αλληλεπίδραση αυτών των ρευμάτων είναι πάντοτε, απωστική λόγω του κανόνα του Lenz.

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 απο τα χαρακτηριστικά του ευθύγραμμου κινητήρα, αλλά και από την ολίσθηση [2].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΣΥΣΤΗΜΑ TRANSRAPID –

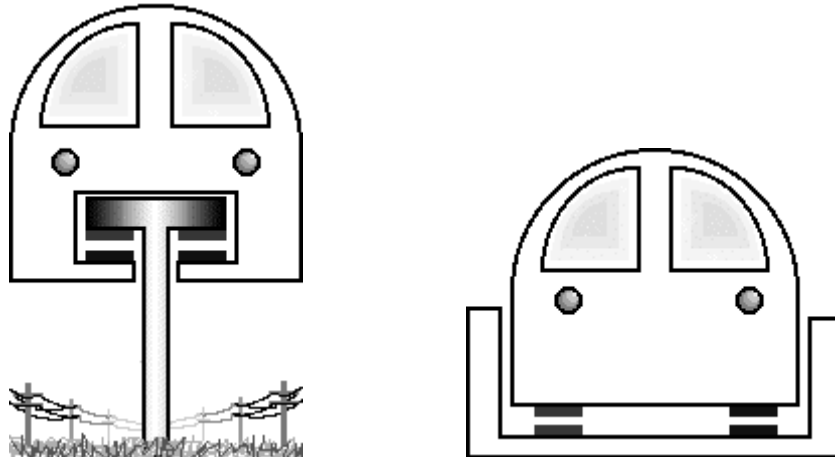
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Maglev

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την κατασκευή του πρώτου σιδηροδρόμου, λίγα έχουν αλλάξει όσον αφορά το βασικό τεχνολογικό σχεδιασμό. Τα τρένα υποστηρίζονται, οδηγούνται, επιταχύνονται και φρενάρουν από τους τροχούς. Προς επίτευξη καλύτερης οικονομικής αποδοτικότητας, περιβαλλοντικής συμβατότητας, υψηλής ταχύτητας και συγχρόνως μέγιστης ασφάλειας αναπτύχθηκε μια νέα τεχνολογική προσέγγιση: Τα συστήματα ηλεκτρομαγνητικής, χωρίς επαφή, ανάρτησης και προώθησης. Με άλλα λόγια – Maglev (magnetic levitation). Αντί της εφαρμογής και φθοράς μηχανικών εξαρτημάτων όπως τροχοί, άξονες, κιβώτια ταχυτήτων, το Maglev, χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά συστήματα για να επιτύχει αυτές τις λειτουργίες.

Ενός απλός προσδιορισμός για το Maglev, ως μέσο μεταφοράς, είναι η ανάρτηση ενός οχήματος επάνω από ένα μαγνητικό διάδρομο και η ώθηση κατά μήκος του με τη χρήση μαγνητικής ενέργειας. Προφανώς, είναι περισσότερο πολύπλοκο, εντούτοις, το αποτέλεσμα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι, ένα όχημα μπορεί να κινηθεί αβίαστα, σε μεγαλύτερες ταχύτητες, αποτελεσματικότερα, με ασφάλεια, ομαλά και με μεγαλύτερη σταθερότητα.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο όρος Maglev αναφέρεται, όχι μόνο σε οχήματα, αλλά και σε ολόκληρο σιδηροδρομικό σύστημα. Όλες οι λειτουργικές εφαρμογές της τεχνολογίας Maglev, έχουν την ελάχιστη δυνατή χρησιμοποίηση στα οχήματα, οπότε δεν είναι συμβατή με τα υπάρχοντα σιδηροδρομικά συστήματα. Το SPM Maglev σύστημα εφαρμοσμένης ανάρτησης, είναι «διαλειτουργικό» και επιτρέπει τη λειτουργία των συμβατικών και των Maglev οχημάτων στον ίδιο χρόνο, στην ίδια τροχιά. Υπάρχουν διάφοροι σχεδιασμοί διαδρομών, πάνω στους οποίους αναρτώνται τα Maglev οχήματα. Οι βασικότεροι είναι σχήματος -T-, -U-, -Y- κατασκευασμένοι από ασάλι, σκυρόδεμα ή άργιλο.



Εικόνα 2.1.a: EMS και EDS συστήματα ανάρτησης

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι τεχνολογιών Maglev:

Ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση (EMS): Χρησιμοποιεί τη μαγνητική ελκτική δύναμη μαγνητών, κάτω από τη ράγα, για να ανυψώσει το τρένο.

Ηλεκτρομαγνητική ανάρτηση (EDS): Χρησιμοποιεί την απωστική δύναμη, μεταξύ δύο μαγνητικών πεδίων, για να αναρτήσει το τρένο κατά μήκος της ράγας.

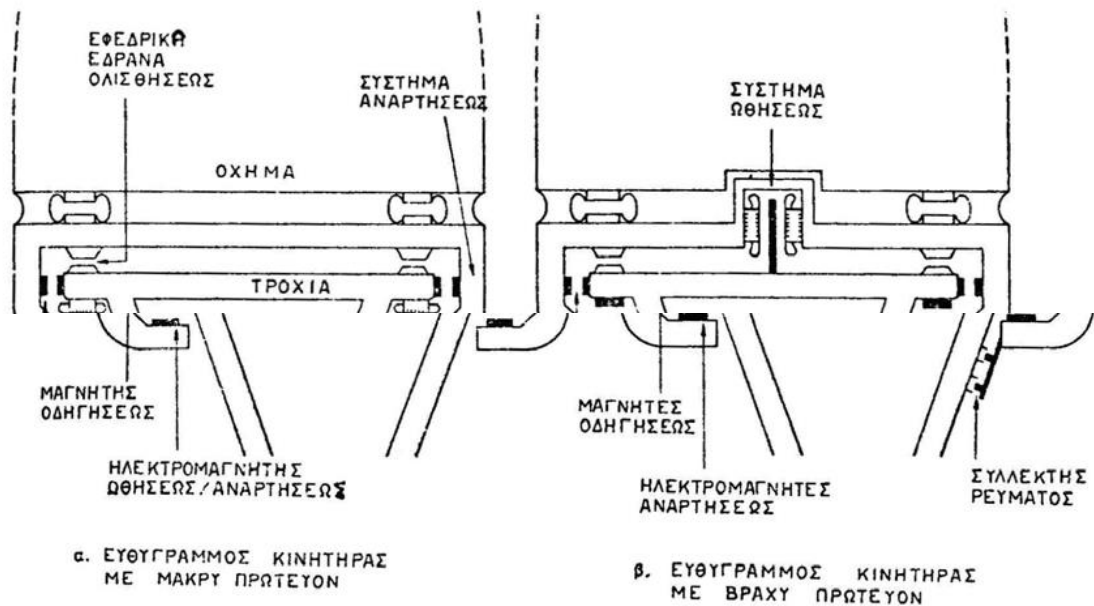
Σταθεροποιημένη ανάρτηση μόνιμων μαγνητών (SPM): Χρησιμοποιεί αντιτιθέμενες σειρές μόνιμων μαγνητών για να ανυψώσει το τρένο επάνω από τη ράγα.

Μια άλλη πειραματική τεχνολογία έτοιμη να εφαρμοστεί και πρακτικά, είναι η μαγνητοδυναμική ανάρτηση (MDS), η οποία χρησιμοποιεί την ελκτική μαγνητική δύναμη μιας σειράς από μόνιμους μαγνήτες κοντά σε μια χαλύβδινη διαδρομή, για να ανυψώσει και να διατηρήσει σε τροχιά το τρένο.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι οι ευθύγραμμοι κινητήρες συνδυαζόμενοι με τα συστήματα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης (Maglev SYTEMS) αποτελούν την καλύτερη επιλογή για τα συστήματα μεταφοράς για υψηλές ταχύτητες. Βεβαίως καθώς οι απώλειες από την αεραντίσταση αυξάνουν με τον κύβο της ταχύτητας δεν μπορούμε να υπολογίζουμε τρένα στον αέρα για ταχύτητες μεγαλύτερες από 400-500km/h. Ενώ οι ενδιάμεσοι σταθμοί επιβίβασης - αποβίβασης θα πρέπει ν' απέχουν τουλάχιστον 100km.

Για λόγους σύγκρισης με τα συμβατικά τρένα μπορούν να αναφερθούν τα παρακάτω:

- Ένα σύστημα Maglev θα καταναλίσκει περίπου 300Wh/επιβάτη/χιλιόμετρο (για μέση ταχύτητα 300km/h).
- Ένα συμβατικό ηλεκτροκίνητο τρένο 160Wh/επιβατοχιλιόμερο (για μέση ταχύτητα 250km/h).
- Ένα κοινό επιβατικό τετραθέσιο αυτοκίνητο για ταχύτητα 130km/h ξοδεύει 350Wh/επιβατοχιλιόμετρο.
- Ένα αεροπλάνο 400-600Wh/επιβατοχιλιόμετρο για ταχύτητες 900km/h. Ας σημειωθεί όμως ότι τα ενεργειακά λειτουργικά έξοδα δεν θα υπερβαίνουν το 10% του κόστους λειτουργίας για το Maglev.- Το Maglev χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια δεν εξαρτάται από υγρά καύσιμα (πετρέλαιο).- Το Maglev κινείται χωρίς τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις που δημιουργούν οι τροχοί σε υψηλές ταχύτητες.
- Το Maglev κινείται σχεδόν αθόρυβα με μόνο τον ήχο του οχήματος που διασχίζει τον αέρα.
- Η συντήρησή του είναι πολύ εύκολη και γίνεται σε αραιά διαστήματα αφού το μόνο κινητό τμήμα είναι το ίδιο το όχημα και η τροχιά δεν φθείρεται αφού δεν έρχεται σε επαφή μαζί της.
- Το φορτίο του τρένου κατανέμεται ομοιόμορφα εξαιτίας της ανάρτησης με ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, έτσι το σύστημα γίνεται πολύ ελαφρότερο απ' ότι υπάρχει στην περίπτωση στήριξης σε τροχούς.
- Η ακτίνα στροφής μπορεί να γίνει μικρότερη (ευκολότερη δηλαδή χάραξη τροχιάς) επειδή στις στροφές δεν βασιζόμαστε στην πρόσφυση των τροχιών, φθάνοντας τα 2,5km.
- Η πέδηση συνδυασμός ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής είναι ταχύτερη, ασφαλέστερη και με δυνατότητες αναγέννησης της ισχύος πέδησης.
- Το ουσιώδες μειονέκτημα των Maglev είναι η απαιτούμενη πολύ μεγαλύτερη επένδυση ανά Km γραμμής έναντι των συμβατικών τρένων [3].



Εικόνα 2.1.β: MAGLEV με ελκτικό σύστημα αναρτήσεως [3]

2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ OCS (OPERATION CONTROL SYSTEM)

Το Transparid Maglev System χρησιμοποιεί ένα-αυτόματης επικοινωνίας, εντολής και ελέγχου-σύστημα. Το Transparid Operation Control System (OCS) είναι ένα ράδιο-βασισμένο, αποκεντρωμένο σύστημα, το οποίο σχεδιάστηκε να είναι τεχνικά ασφαλές κάθε στιγμή και κάτω από όλες τις απρόβλεπτες συνθήκες.

Ο λειτουργικός στόχος

Προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα πλήρους χρήσης της λειτουργικής και τεχνικής ικανότητας του Transparid Maglev System στις υψηλές ταχύτητες, χρησιμοποιείται ένα ευφύες σύστημα ελέγχου λειτουργίας. Πάνω απ' όλα, αυτό το σύστημα, διασφαλίζει ότι όλες οι σημαντικές διαδικασίες (σε φυσιολογική λειτουργία), πραγματοποιούνται αυτόματα, χωρίς τη χρήση οδηγού και μέσα στην ευθύνη ασφάλειας για την οδηγική λειτουργία κατά τη διάρκεια της προγραμματισμένης μεταφοράς των επιβατών.

Ως βασική αρχή, τα τρένα λειτουργούν ξεχωριστά (δεν υπάρχει σχεδιασμός σύζευξης δύο τρένων). Οι λειτουργικές διαδικασίες εκκινούν αυτόματα σύμφωνα με ένα πρόγραμμα που αποθηκεύεται στο σύστημα ελέγχου λειτουργίας. Ακόμα και αν υπάρχουν αποκλίσεις από το καθορισμένο πρόγραμμα, το σύστημα μπορεί αυτόματα να ενεργοποιήσει τα μέτρα ώστε, τα επηρεασθέντα τρένα, να επανέλθουν στην προγραμματισμένη τους λειτουργία. Αυτά τα μέτρα, περιλαμβάνουν την παραλλαγή της λειτουργικής ταχύτητας ή τον περιορισμό ή την επέκταση των περιόδων στάσης στους σταθμούς. Μόνο σε μεμονωμένες περιπτώσεις και σε παρατυπίες (σε ορισμένες λειτουργίες επισκευής, σημαντικών αποκλίσεων από το πρόγραμμα, δυσλειτουργίες εξαιτίας εξωτερικών παραγόντων) υπάρχουν διαδικασίες, που πραγματοποιούνται από δράσεις του επικεφαλής του σταθμού στο κέντρο ελέγχου (cc control center). Γι' αυτόν το λόγο, προγραμματίζεται η μόνιμη επάνδρωση cc. Εντούτοις, μόνο τα προγραμματισμένα δρομολόγια θα παρακολουθούνται. Το λειτουργικό προσωπικό, απασχολείται στους σταθμούς και τα οχήματα για την εξυπηρέτηση των επιβατών, και συγκεντρώνεται σε εργασίες λειτουργίας, σε περιπτώσεις δυσλειτουργίας και έκτακτης ανάγκης.

Διαφύλαξη της προγραμματισμένης λειτουργίας

Η ασφάλεια της προγραμματισμένης λειτουργίας εγγυάται από ένα τεχνικό σύστημα ασφάλειας OCS. Όλες οι υπεύθυνες λειτουργίες ελέγχου ασφαλείας, πραγματοποιούνται με τη χρήση safe και fail-safe μικροεπεξεργαστών τύπου SIMIS. Οι υπολογιστές αυτής της σχεδίασης, αποτελούνται από τρία ανεξάρτητα κανάλια υπολογιστών, ιδίων πυρήνων, τα οποία λειτουργούν με τους σύγχρονους κύκλους και εντολές. Τα σήματα της διαδικασίας απελευθέρωσης πραγματοποιούνται μόνο εφόσον τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα. Με τον τρόπο αυτό, οι λειτουργικές αποκλίσεις μπορούν να ανιχνευθούν συγκρίνοντας τα ενεργά προγράμματα online. Κρυφές αστοχίες στο SIMIS εντοπίζονται από προγράμματα δοκιμών τα οποία «τρέχουν» από πίσω. Η λειτουργία ασφαλείας πραγματώνεται εάν δύο ή τρία κανάλια παράγουν τα ίδια αποτελέσματα.

Οι διακόπτες και οι εγκαταστάσεις του Transrapid Maglev System εγκαθίστανται κατά μήκος του διαδρόμου-ράγα (σταθμοί, χώροι στάθμευσης, εγκαταστάσεις συντήρησης), με τέτοιο τρόπο ώστε, όπου είναι απαραίτητο να ελέγχουν και να

προστατεύουν προσωπικό και επιβάτες. Οι θέσεις όλων των οχημάτων παρακολουθούνται και διαχειρίζονται από το OCS.

Βασική δομή του συστήματος

Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει τον τεχνικό εξοπλισμό για τη λειτουργική διαχείριση του Transrapid Maglev System, δηλ. τις λειτουργικές μονάδες σχεδιασμού, σχεδιασμού εργασιών, ελέγχου και διαφύλαξης της προγραμματισμένης λειτουργίας καθώς επίσης και τις λειτουργίες εποπτείας και ελέγχου των υποδομών. Τα στοιχεία του συστήματος είναι καταχωρήμενα βάσει της ακόλουθης ιεραρχίας 3 επιπέδων.

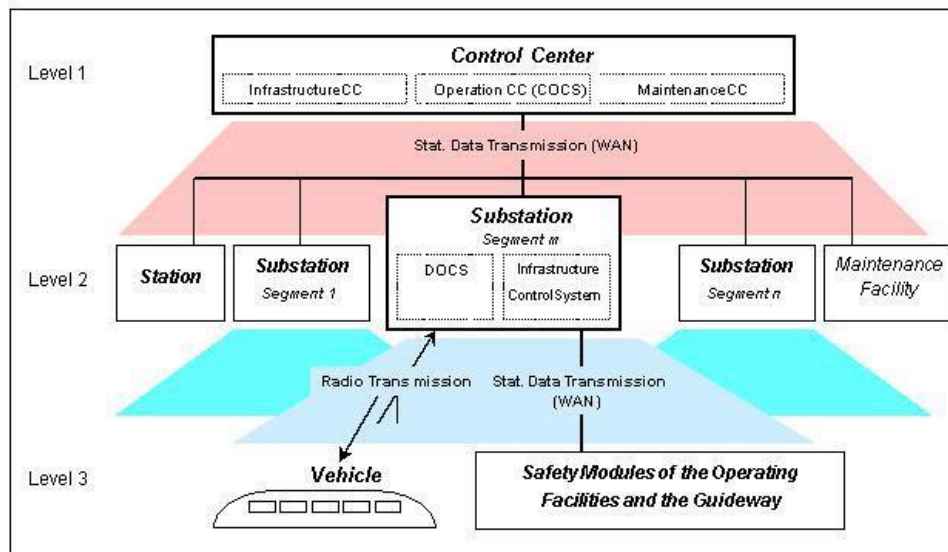
1. Κεντρικός εξοπλισμός και λειτουργίες, συνδυασμένες σε ένα κέντρο ελέγχου.
2. Αποκεντρωμένες λειτουργίες και εξοπλισμός, τοποθετημένα κυρίως στους υποσταθμούς.
3. Κινητός εξοπλισμός και λειτουργίες, τοποθετημένα στα οχήματα και, πρότυπα και λειτουργίες ασφαλείας, τοποθετημένα σε κτίρια λειτουργίας και σταθμούς διακοπών κατά μήκος της διαδρομής.

Σύνδεση και μετάδοση δεδομένων ανάμεσα στα επίπεδα του συστήματος ελέγχου πραγματοποιούνται από ευρείας-γραμμής δίκτυα οπτικών ινών (WAN = wide area network).

Σύνδεση με τα οχήματα παρέχεται από το Transrapid Maglev System – συγκεκριμένα 38GHz σύστημα ράδιο-μετάδοσης.

Συνήθως, δεν κατασκευάζονται ξεχωριστά κτίρια για τον εξοπλισμό του συστήματος ελέγχου. Οι χώροι και τα δωμάτια που απαιτούνται, είναι ενσωματωμένα σε αυτά των υποσταθμών, του διαδρόμου, του κέντρου ελέγχου, των εγκαταστάσεων συντήρησης και των σταθμών.

Transrapid Operation Control System structure



Εικόνα 2.2: Απλοποιημένο διάγραμμα δομής του Transrapid OCS [5]

2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΩΘΗΣΗΣ – PROPULSION SYSTEM

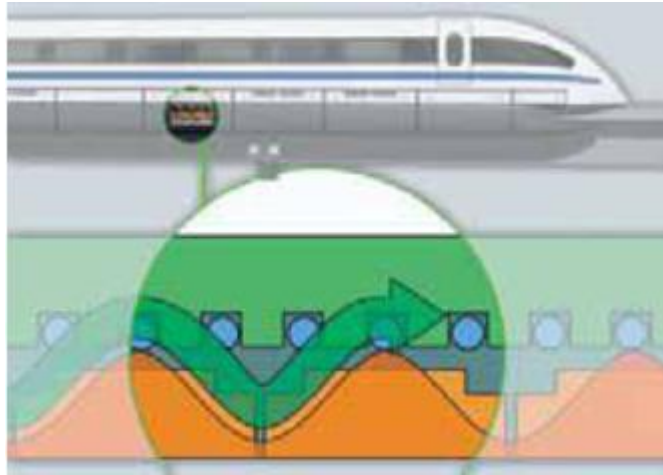
Σε αντίθεση με τα αυτοκίνητα και τα συμβατικά τρένα, το σύστημα ώθησης για το Transrapid Maglev σύστημα, δεν είναι τοποθετημένο επάνω στο όχημα, αλλά στο διάδρομο-ράγα. Η λειτουργία της non-contact ώθησης και του συστήματος πέδησης(ευθύγραμμος κινητήρας μακρύ στάτη),είναι ανάλογη ενός περιστροφικού κινητήρα, του οποίου ο στάτης έχει ξετυλιχθεί και εφαρμοσθεί κάτω από το διάδρομο-ράγα. Αντί του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, το φορτίο στα τριφασικά τυλίγματα, παράγει ένα κινούμενο μαγνητικό πεδίο. Κατά συνέπεια, το όχημα "σύρεται" σύγχρονα και χωρίς επαφή από τους μαγνήτες ανάρτησης, οι οποίοι τώρα λειτουργούν ως στοιχείο διέγερσης του κινητήρα.



Εικόνα 2.3.α: Από τον περιστροφικό, στον ευθύγραμμο κινητήρα επί του οχήματος [18]

Συγκεκριμένα, ο σύγχρονος ευθύγραμμος κινητήρας (LSM-Linear Synchronous Motor), παράγει δύναμη ώθησης λόγω ρεύματος στον στάτη, και κατά συνέπεια ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτό το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αλληλεπιδρά με ένα σετ μόνιμων μαγνητών-οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο όχημα- για τη δημιουργία ώθησης. Οι μόνιμοι μαγνήτες, συμπεριφέρονται ως το δευτερεύον του κινητήρα, ισοδύναμοι με ένα δρομέα στις συμβατικές μηχανές, επιτρέποντας την ευθύγραμμη κίνηση. Το όχημα ωθείται από ένα κινούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, όσο εφαρμόζεται ρεύμα στο στάτη κάτω από αυτό. Η κίνηση του οχήματος ρυθμίζεται από ένα περίπλοκο σύστημα έλεγχου, το οποίο ενσωματώνει την τεχνολογία αντίληψης θέσης.

Με τη βοήθεια μετατροπέων, η ταχύτητα μπορεί απείρως να ποικίλει, αλλάζοντας τη συχνότητα του τριφασικού ρεύματος. Εάν η κατεύθυνση του κινούμενου πεδίου αντιστραφεί, τότε ο κινητήρας μετατρέπεται σε γεννήτρια και κατά συνέπεια φρενάρει το όχημα χωρίς καμία επαφή με το διάδρομο-ράγα. Η ενέργεια πέδησης, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί και να ανατροφοδοτηθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 2.3.b: Ένα ηλεκτρικό φορτίο, παράγει ένα οδεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στα τυλίγματα, το οποίο ωθεί το όχημα κατά μήκος των μαγνητών ανάρτησης [18]

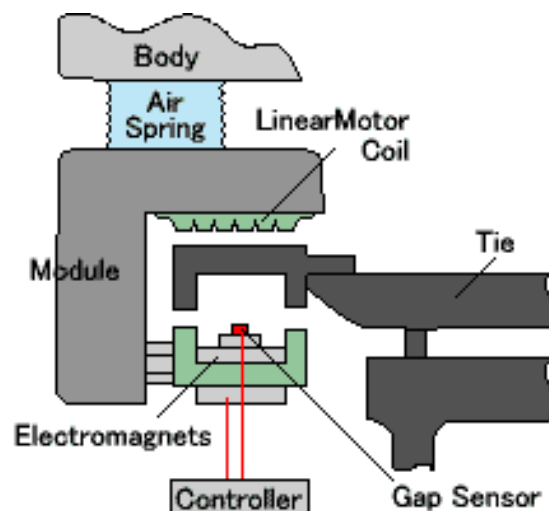
Ο ευθύγραμμος κινητήρας μακρύ στάτη(longstator), διαιρείται σε τμήματα του διαδρόμου-ράγα, τα οποία ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται ανεξάρτητα, με την παροχή να εφαρμόζεται στο τμήμα εκείνο από το οποίο περνά το τρένο εκείνη τη στιγμή. Αυτό οδηγεί στη υψηλή απόδοση των LSM συστημάτων ώθησης(πάνω από 80%). Το μήκος του "ενεργοποιημένου" τμήματος είναι τυπικά 2km. Όταν το όχημα αφήνει το ενεργοποιημένο τμήμα, η παροχή του LSM ενεργοποιείται στο επόμενο, ενώ αποκόπτεται το προηγούμενο.

Συνολικά, η ενέργεια του συστήματος παρέχεται από το εθνικό δίκτυο εκ μετατροπής, καθώς επίσης και από τις εγκαταστάσεις έλεγχου της ώθησης, οι οποίες βρίσκονται σε υποσταθμούς κατά μήκος της διαδρομής. Το σύστημα ανάρτησης και ο υπόλοιπος εξοπλισμός του τρένου, τροφοδοτούνται εξ ολοκλήρου χωρίς επαφή, μέσω γραμμικών γεννητριών ενσωματωμένων στους μαγνήτες ανάρτησης. Επομένως, στο Transrapid δεν απαιτούνται εναέριες γραμμές. Τα συμβατικά οχήματα φέρουν τις μηχανές τους επί της ατράκτου. Αφού όμως, πλήρης ενέργεια απαιτείται μόνο σε μερικά τμήματα της διαδρομής, το σύστημα οδήγησης είναι στην ουσία ένα περιττό και ανεπαρκές φορτίο. Με τον κινητήρα του Transrapid να είναι τοποθετημένος στο διάδρομο-ράγα, η απόδοσή του μπορεί να είναι προσαρμοσμένη στις τοπικές συνθήκες (υψηλότερη παροχή για λόφους και σημεία επιτάχυνσης, χαμηλότερη παροχή για επίπεδα τμήματα ή σημεία επιβράδυνσης) [5], [18], [19],[20].

2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ -LEVITATION SYSTEM

Οι ηλεκτρικά ελεγχόμενοι μαγνήτες υποστήριξης, οι οποίοι βρίσκονται και στις δυο πλευρές κατά μήκος ολόκληρου του οχήματος, έλκουν το όχημα στα σιδηρομαγνητικά πακέτα του στάτη, τα οποία είναι ενσωματωμένα στην κάτω πλευρά του διαδρόμου - ράγα.

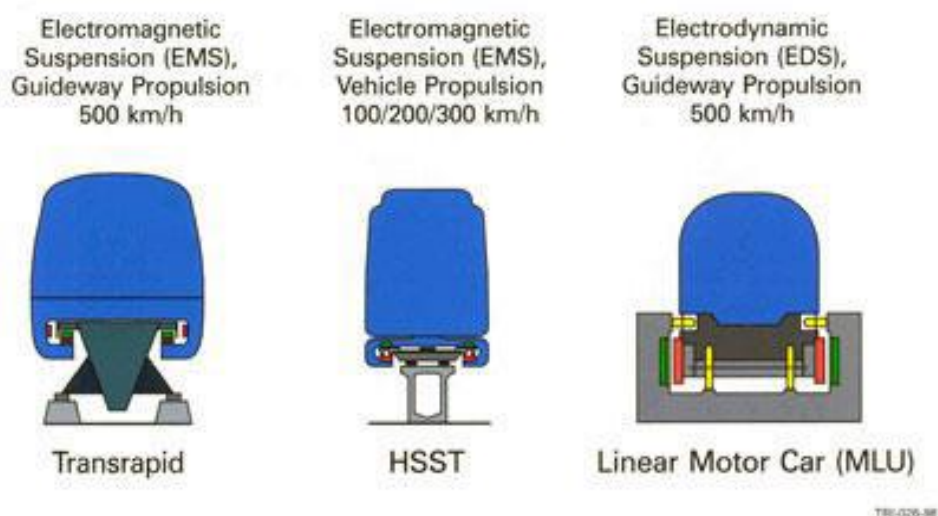
Οι μαγνήτες οδήγησης, προσαρτημένοι και αυτοί και στις δύο πλευρές κατά μήκος ολόκληρου του οχήματος, διατηρούν το όχημα στην πορεία του. Ηλεκτρικά συστήματα εγγυώνται ότι η απόσταση διατηρείται σταθερή (ονομαστικά 10mm). Όπως είναι φανερό στο παρακάτω σχήμα, αισθητήρες προσαρμοσμένοι στους μαγνήτες οδήγησης (πλάγιους) και ανάρτησης, ελέγχουν το ύψος του διακένου. Το σήμα ελέγχου (ως σήμα εισόδου) που προέρχεται από αυτούς, διοχετεύεται μέσω ενισχυτή (amplifier), ο οποίος παρεμβάλλεται ανάμεσα στο κύκλωμα που συνδέει τις on-board μπαταρίες με τα τυλίγματα των ηλεκτρομαγνητών. Καθώς το ύψος του διακένου παραμένει σταθερό, το σήμα από τους αισθητήρες προς τον ενισχυτή είναι μηδενικό(στην ουσία ο ενισχυτής λειτουργεί ως ανοιχτός διακόπτης). Σε περίπτωση απόκλισης από τις οριακές τιμές διακένου, το σήμα ενεργοποιεί τον ενισχυτή, ο οποίος προσαρμόζει κατάλληλα (ενεργοποιώντας την κατάλληλη συστοιχία αντιστάσεων, άρα και κέρδους του ενισχυτή) την τροφοδοσία των τυλιγμάτων από την on-board μπαταρία, ούτως ώστε να δημιουργηθεί κατάλληλο πεδίο και το διάκενο να επανέλθει στις επιτρεπτές του τιμές (οπότε και επανέρχεται στη λειτουργία του ανοικτού διακόπτη) [21], [22].



Εικόνα 2.4.a: Σύστημα ανάρτησης και ελέγχου του διακένου [21]

Για να αιωρηθεί, το Transrapid απαιτεί λιγότερη ενέργεια ακόμα και από τον εξοπλισμό κλιματισμού. Το σύστημα ανάρτησης είναι εφοδιασμένο με on-board μπαταρίες κι έτσι, ανεξάρτητο από το σύστημα προώθησης. Το όχημα είναι ικανό να αιωρείται περισσότερο από μια ώρα , χωρίς εξωτερική παροχή ενέργειας. Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, οι on-board μπαταρίες, επαναφορτίζονται από ευθύγραμμες γεννήτριες οι οποίες είναι ενσωματωμένες στους μαγνήτες υποστήριξης. Δυσ διαφορετικοί τύποι Maglev τρένων έχουν παρουσιαστεί και κατασκευαστεί, στο σύνολο τους με ταχύτητες μέχρι 500 km/h.:

- Μαγνητικής έλξης - EMS (Electro-Magnetic-Suspension) συστήματα, χρησιμοποιώντας σέρβο-ελεγχόμενους ηλεκτρομαγνήτες ενσωματωμένους στο όχημα, ελκόμενοι προς τα πάνω σε ένα διάδρομο σιδήρου. Παράδειγμα EMS συστήματος: Το Γερμανικό Transrapid TR 08 όχημα επίδειξης και 30km πίστα δοκιμών, με ταχύτητα έως 450 km/h.
- Μαγνητικής άπωσης – EDS (Electro-Dynamic-Suspension) συστήματα, χρησιμοποιώντας κρυστατικά ψυχόμενους υπεραγώγιμους μαγνήτες ενσωματωμένους στο όχημα, οι οποίοι απωθούνται από πεδίο ρευμάτων, που προκαλούνται σε τυλίγματα ενσωματωμένα στις πλαϊνές πλευρές του τρένου. Παράδειγμα EDS συστήματος: Το Ιαπωνικό Yamanashi τρένο επίδειξης, με ταχύτητες των 500 km/h σε πίστα δοκιμών 18km [23].



Εικόνα 2.4.b: Τα είδη της Maglev ανάρτησης [21]

Συστήματα ανάρτησης

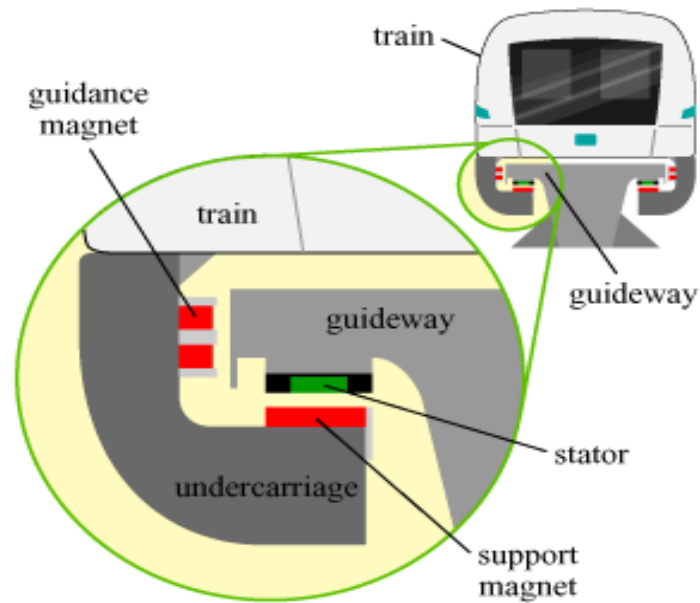
Το EMS δημιουργήθηκε πρακτικά από την πρόοδο στα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, τα οποία διατηρούν το διάκενο αέρος ανάμεσα στο όχημα και το διάδρομο-ράγα, με σκοπό να αποτρέψουν την επαφή μεταξύ τους.

Διαφοροποιήσεις στο βάρος του ωφέλιμου φορτίου, στο δυναμικό φορτίο και παρατυπίες στους διαδρόμους-ράγες, αντισταθμίζονται με την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου, με βάση μετρήσεις του διάκενου αέρος οχήματος/διαδρόμου.

Όσον αφορά το EDS, πρέπει να τονιστεί ότι, το όχημα πρέπει να είναι εξοπλισμένο με τροχούς η οποιοδήποτε άλλο είδος μηχανικής ανάρτησης, για την εκκίνηση και το σταμάτημα, διότι το EDS δεν έχει τη δυνατότητα αιώρησης σε ταχύτητες κάτω των 25mph. Το EDS, έχει εξελιχθεί με πρόοδο στη κρυογενική και υπεραγωγίμη μαγνητική τεχνολογία.

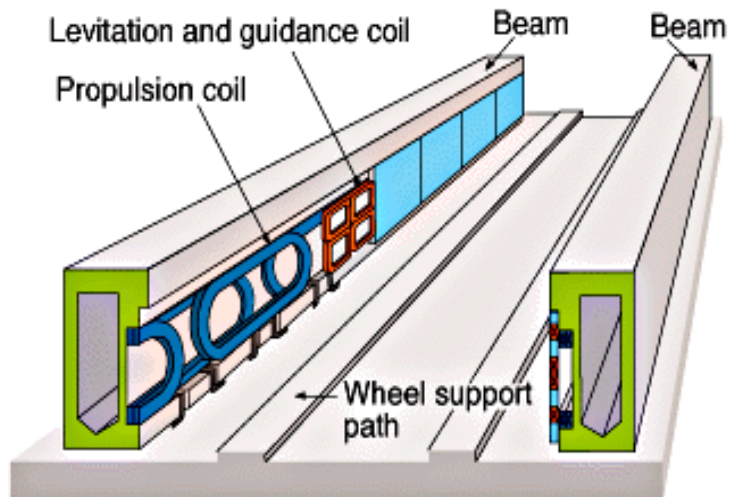
Το Maglev Track

Στη Γερμανία, οι μηχανικοί ανέπτυξαν πρώτοι το EMS σύστημα, αποκαλούμενο και ως Transrapid. Σε αυτό το σύστημα, (όπως έχει αναφερθεί παραπάνω) το κάτω μέρος του οχήματος εφαρμόζει σε έναν ασφάλινο διάδρομο-ράγα. Οι ηλεκτρομαγνήτες που συνδέονται στο πάτωμα του τρένου, κατευθύνονται επάνω και προς τον διάδρομο και άρουν το τρένο περίπου 1cm επάνω από το διάδρομο, ακόμα και όταν αυτό βρίσκεται εν στάση. Άλλοι μαγνήτες οδήγησης, ενσωματωμένοι στην άτρακτο του τρένου, διατηρούν σταθερή την πορεία του κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Η Γερμανία έχει επιδείξει ότι, το Transrapid Maglev τρένο, μπορεί να φθάσει επανδρωμένο τα 300mph.



Εικόνα 2.4.c: Οι μαγνήτες οδήγησης και EMS ανάρτησης του TR Maglev Track [6]

Το μαγνητισμένο σπείρωμα κατά μήκος του διαδρόμου, τροφοδοτούμενο με ηλεκτρική ισχύ, δημιουργεί μοναδικό σύστημα μαγνητικών πεδίων, τα οποία έλκουν και ωθούν το τρένο κατά μήκος του διαδρόμου. Το ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο τροφοδοτεί τα σπειρώματα που βρίσκονται κατά μήκος του διαδρόμου, εναλλάσσεται συνεχώς, ούτως ώστε να αλλάζει και την πολικότητα των μαγνητισμένων σπειρωμάτων. Αυτή η αλλαγή πολικότητας, προκαλεί μαγνητικό πεδίο εμπρός του τρένου, με σκοπό να το ωθήσει μπροστά, ενώ μαγνητικό πεδίο στο οπίσθιο μέρος του τρένου, προσδίδει περισσότερη ώθηση στην ίδια κατεύθυνση.



Εικόνα 2.4.d: Η διάταξη των σπειρωμάτων των μαγνητών ανάρτησης, οδήγησης και ώθησης κατά μήκος του διαδρόμου [6]

Τα Maglev τρένα «επιπλέουν» σε ένα στρώμα αέρα, απαλλαγμένα από την τριβή. Αυτή η έλλειψη τριβής και η αεροδυναμική σχεδίαση των τρένων, επιτρέπουν να επιτευχθούν, οι πρωτοφανείς για την επίγεια μεταφορά, ταχύτητες άνω των 500 km/h (ένα Boeing-777 επιβατικό αεροπλάνο έχει μέγιστη ταχύτητα 905 km/h). Ο σχεδιασμός του συστήματος ανάρτησης και οδήγησης Transrapid, είναι εξοπλισμένος με αυτόματα διαγνωστικά συστήματα, διασφαλίζοντας πως, κάθε αστοχία οποιουδήποτε στοιχείου του συστήματος, να μην οδηγήσει σε διαταραχή της λειτουργίας του [6].

Οικολογικό αποτύπωμα

Η εισαγωγή ενός νέου συστήματος μεταφοράς όπως αυτό του Transrapid, προσφέρει οικολογικά πλεονεκτήματα και συνεισφέρει στην άμβλυση της μόλυνσης που προκαλείται από άλλες μορφές μεταφοράς. Ορισμένα από αυτά επισημαίνονται παρακάτω:

- Απουσία θορύβου κύλησης ή προώθησης λόγω της non-contact τεχνολογίας.
- Απουσία καυσαερίων ή άλλων επιβλαβών αερίων κατά μήκος της διαδρομής.
- Ανεξάρτητο από πρωτογενείς πηγές ενέργειας.

- Χαμηλή κατάληψη εκτάσεων από τους ανυψωμένους και at-grade διαδρόμους.
- Ο ανυψωμένος διάδρομος δεν διαιρεί το τοπίο, τις αναπτυσσόμενες δομές ή τους βιολογικούς βιοτόπους, ενώ ο at-grade διάδρομος επιτρέπει τη μετάβαση για τα αμφίβια και τα μικρά ζώα.
- Ελάχιστα αναχώματα και πρόσθετες κατασκευές οδηγούν στην ελάχιστη διαφοροποίηση του τοπίου.
- Η ευελιξία του σχεδιασμού του διαδρόμου επιτρέπει την τοπογραφική προσαρμογή του συστήματος με την ελάχιστη διάσπαση.

Εκπομπές θορύβου

Συγκριτικά με άλλα συστήματα μεταφοράς, το Transrapid είναι εξαιρετικά «ήσυχο». Σε ταχύτητες 155mph, ταξιδεύει σχεδόν αθόρυβα διαμέσου των πόλεων και των μητροπολιτικών περιοχών. Εξαιτίας της non-contract τεχνολογίας προώθησης και ανάρτησης, οι εκπομπές θορύβου του συστήματος, σε ταχύτητες άνω των 155mph, προέρχονται μόνο από τον αεροδυναμικό θόρυβο.

Τα επίπεδα του pass-by θορύβου σε ανυψωμένο διάδρομο είναι ιδιαίτερα ευνοϊκά σε σύγκριση με τα υπόλοιπα συστήματα, ενώ σε at-grade διάδρομο ακόμα χαμηλότερα.

Κατανάλωση ενέργειας

Τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος Transrapid είναι αποτέλεσμα αρκετών σχεδιαστικών χαρακτηριστικών.

- Σύγχρονα ηλεκτρονικά ισχύος
- Αποφυγή της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας για την προώθηση, με στοιχεία βασισμένα στην ενέργεια τριβής
- Υψηλής αποδοτικότητας σύγχρονος long-stator κινητήρας
- Τροφοδότηση του διαδρόμου ανά τμήματα

- Μικρής μάζας οχήματα (περίπου 0,5 μετρικοί τόνοι ανά θέση)
- Χαμηλή αντίσταση όδευσης (περίπου 0,2 ανά θέση) στα 400km/h

Υπάρχουν εμφανή βήματα προς την κατεύθυνση αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας των συστημάτων Maglev.

- Εξάλειψη ή ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων του on-board συστήματος ανάρτησης.
- Για τα EDS συστήματα, μεγιστοποίηση της απόδοσης διαδρόμων, μέσω του σχεδιασμού και βελτιστοποίησης του on-board συστήματος ανάρτησης.
- Μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος προώθησης, όσο το δυνατόν περισσότερο αναφορικά με τις απαιτήσεις κόστους.
- Ελαχιστοποίηση της αεροδυναμικής έλξης.

Μαγνητικά πεδία

Ο αντίκτυπος των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από το σύστημα Transrapid σε επιβάτες και περιβάλλον είναι εξαιρετικά μικρός. Είναι στην ουσία, συγκρίσιμο με το σύννηθες μαγνητικό πεδίο της γης και αρκετά χαμηλότερο από αυτό των κοινών οικιακών συσκευών. Τα μαγνητικά πεδία κατά μήκος του διαδρόμου, είναι ακόμα ασθενέστερα. Επιπλέον, τα μαγνητικά πεδία, γύρω από το Transrapid σύστημα, είναι πολύ χαμηλότερα από αυτά πολλών άλλων συμβατικών ηλεκτρικών συστημάτων μεταφοράς, όπως υπόγειοι σιδηρόδρομοι και μετρό.

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα οποία παράγονται από τον long-stator κινητήρα τους μαγνήτες ανάρτησης και οδήγησης και το σύστημα ράδιο-μετάδοσης έχουν μετρηθεί από διάφορους ειδικούς επιστήμονες κατά τη διάρκεια πολλών ετών. Καθ'όλο το φάσμα συχνοτήτων, οι εντάσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είναι από 20 έως 1000 φορές χαμηλότερες από τα αποδεκτά όρια. Κατά συνέπεια, τα δυσμενή αποτελέσματα στους βηματοδότες ή μαγνητικές λωρίδες ανάγνωσης καρτών, πρέπει να αποκλειστούν.

Αεροδυναμικά αποτελέσματα

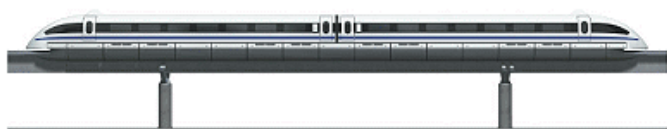
Η ροή αέρα η οποία περιβάλλει το Transrapid, έχει μελετηθεί εκτενώς στο TVE (Transrapid Test Facility) με τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Δεν υπάρχει μια αντιληπτή αεροδυναμική επίπτωση κάτω από τον ανυψωμένο διάδρομο, σε ολόκληρο το εύρος ταχυτήτων.
- Τα αεροδυναμικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τον κοινό αέρα, μπορούν να ανιχνευθούν όταν το όχημα περνά από έναν at-grade διάδρομο. Παρ'όλα αυτά, τα μικρά χαλίκια, ακριβώς κάτω από το όχημα και το διάδρομο, δεν διαταράσσονται.
- Η ταχύτητα ροής του αέρα κατά μήκος του οχήματος σε απόσταση 5m και σε ταχύτητα 400km/h είναι μικρότερη των 8km/h.

2.5 ΟΧΗΜΑΤΑ (VEHICLES)

Τα οχήματα Transrapid, περιλαμβάνουν έναν ελάχιστο αριθμό 2 τμημάτων, καθένα από τα οποία αποτελείται, κατά μέσο όρο, από 90 καθίσματα. Ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδίου και τον όγκο κυκλοφορίας που καλούνται να εξυπηρετήσουν, τα τρένα μπορούν να αποτελούνται από έως και 10 τμήματα (οκτώ μέσων και δυο τμημάτων τέλους).

Two sections



Three sections



Σχήμα 2.5.1.a: Βαγόνια δύο και τριών τμημάτων [6]

Εντούτοις, το Transrapid, είναι κατάλληλο και για μεταφορά εμπορευμάτων. Για την υπερταχεία μεταφορά φορτίου, ειδικά τμήματα φορτίου μπορούν να συνδυαστούν με τμήματα επιβατών, ή να σχεδιαστούν ως αποκλειστικά τρένα μεταφοράς φορτίου(15 τόνοι φορτίου ανά τμήμα). Δεδομένου ότι, το σύστημα προώθησης είναι εφαρμοσμένο στο διάδρομο-ράγα, ούτε το μήκος του οχήματος ούτε το φορτίο, επηρεάζουν τη δυνατότητα επιτάχυνσης.

Τα Transrapid τρένα, είναι μοντέρνα σχεδιαστικά, ελκυστικά, ευρύχωρα, οχήματα τα οποία ακολουθούν τα πιο πρόσφατα πρότυπα της εναέριας, σιδηροδρομικής και μαζικής μεταφοράς. Υπάρχουν 2 διαθέσιμα στυλ οχημάτων, τα οποία απαρτίζουν ένα τρένο Transrapid: τα ενδιάμεσα και τα οχήματα τέλους. Αν και ο σχεδιασμός της ατράκτου ποικίλει ανάλογα με τη χρήση (επιβατικό, εμπορικό), το πάτωμα και όλα τα υπόλοιπα στοιχεία, παραμένουν ίδια.

Κάθε τμήμα τέλους, εξοπλίζεται με μια καμπίνα οδηγού, ένα on-board σύστημα έλεγχου λειτουργίας και την περιοχή αποσκευών των επιβατών και των άλλων ωφέλιμων φορτίων. Αν και ο οδηγός των Transrapid είναι στην ουσία παθητικός, είναι απαραίτητος για την παρακολούθηση όλων των λειτουργιών του οχήματος, μέσω της κονσόλας λειτουργίας, και για τον χειρισμό έκτακτων περιπτώσεων. Τα μεσαία τμήματα είναι καθόλα όμοια με τα τμήματα τέλους, μόνο που δεν διαθέτουν την καμπίνα του οδηγού και τον on-board OCS (Operation Control System) εξοπλισμό.

	Ακραίο τμήμα	Μέσο τμήμα
Χωρητικότητα επιβατών	108	128
Μήκος	26.99 m	24.77 m
Πλάτος	3.7 m	3.7 m
Ύψος	4.16 m	4.16 m
Βάρος	48 t	47 t
Χωρητικότητα φορτίου	14 t	17.5 t
Συνολικό βάρος	62 t	64.5 t

Πίνακας 2.5.1.a: Βαγόνια δύο και τριών τμημάτων [6]

Δομή του οχήματος

Κάθε βαγόνι του οχήματος αποτελείται από δυο βασικά στοιχεία: το πάτωμα και την άτρακτο. Αυτά, κατασκευάζονται και εξοπλίζονται ανεξάρτητα και έπειτα συναρμολογούνται για να διαμορφώσουν ένα πλήρες βαγόνι.

Στο πάτωμα του οχήματος, περιλαμβάνονται όλα τα Maglev στοιχεία, οι μαγνήτες ανάρτησης και οδήγησης (πλάγιοι), τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία ανάρτησης, on-board συστήματα ισχύος (π.χ. μπαταρίες), τα ηλεκτρονικά του οχήματος και τα συστήματα θέρμανσης/εξαερισμού/κλιματισμού.

Στα οχήματα περιλαμβάνονται δυο ξεχωριστά συστήματα ανάρτησης. Μια πρωτεύουσα ανάρτηση, ανάμεσα στους μαγνήτες στήριξης και οδήγησης και στα στηρίγματά τους, και μια δευτερεύουσα ανάρτηση, ανάμεσα στα πλαίσια ανάρτησης και του σώματος των οχημάτων με το χώρο των επιβατών. Οι μαγνήτες υποστήριξης και οδήγησης τοποθετούνται, μέσω της πρωτεύουσας ανάρτησης, σε ανεξάρτητο πλαίσιο της ανάρτησης σε κάθε βαγόνι. Τα πλαίσια ανάρτησης, συνδέονται ξεχωριστά στο σώμα του οχήματος, μέσω της δευτερεύουσας ανάρτησης. Η δευτερεύουσα ανάρτηση, είναι

απαραίτητη για να επιτρέπει στους μαγνήτες να προσαρμόζουν τις ελάχιστες διαφοροποιήσεις στον διάδρομο-ράγα και να εξομαλύνουν το ταξίδι των επιβατών.

Επιβατικά οχήματα

Τα Transrapid Επιβατικά οχήματα είναι σχεδιασμένα, για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του σύγχρονου ταξιδιώτη, με φωτεινό ευρύχωρο εσωτερικό, με αρκετή ελευθερία κινήσεων, εύκολη είσοδο/έξοδο, ελεύθερη πρόσβαση και θελκτικότητες κατάλληλες για το τρένο του 21ου αιώνα. Ο εσωτερικός σχεδιασμός στοχεύει σε ένα σύνολο σημαντικών στόχων, τόσο για τον χειρισμό, όσο και για τον επιβάτη:

- Κοινή δομή και κοινά συστατικά για τις περισσότερες εσωτερικές παραλλαγές
- Ευελιξία, προς ικανοποίηση των ιδιαίτερων απαιτήσεων του επιβάτη
- Ρυθμίσεις διάταξης των θέσεων χωρίς ταμπέλες
- Πληροφορίες και συστήματα ψυχαγωγίας των επιβατών
- Ευέλικτη σχεδίαση για προσαρμογή επιπρόσθετων λειτουργικών

μονάδων(όπως τουαλέτες, τηλέφωνο, on-board catering), χωρίς ιδιαίτερες μορφοποιήσεις στη δομή.

Η ευελιξία στη διάταξη των θέσεων, επιτρέπει τη δημιουργία πρώτης, business και οικονομικής κλάσης, καθώς και θέσεις αναπηρίας προσαρμοσμένες στο χρήστη.

Intercity τρένα

Τα Intercity Transrapid τρένα, είναι σχεδιασμένα με βάση το μέγιστο χρόνο ταξιδιού, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του επιβάτη(τουριστικός/bussiness). Το πρότυπο του εσωτερικού του intercity τρένου, περιλαμβάνει υπερυψωμένα ράφια αποσκευών, περιοχές αποθήκευσης για τις ογκώδεις αποσκευές, on-board εγκαταστάσεις τουαλετών, πρώτη (2+2 κάθισμα ανά σειρά) και οικονομική (2+3 καθίσματα ανά σειρά) κλάση θέσεων.

Οι εγκαταστάσεις τουαλετών είναι σχεδιασμένες για την πρόσβαση επιβατών με κινητικές δυσκολίες και είναι εξοπλισμένες με τα πιο σύγχρονα συστήματα υγιεινής και συντήρησης.

Προαστιακά τρένα

Τα Transrapid Προαστιακά τρένα, είναι σχεδιασμένα με βάση τον ελάχιστο χρόνο ταξιδιού, λαμβάνοντας υπόψη και αυτά τη φύση του επιβάτη. Δυο ζεύγη ευρείων θυρών, είναι τοποθετημένα και χωρίζουν το κάθε βαγόνι σε ίσα τμήματα, ούτως ώστε να διευκολύνεται σε μέγιστο βαθμό η επιβίβαση και αποβίβαση. Το πρότυπο σχεδιασμού του εσωτερικού περιλαμβάνει, ίδιου τύπου χώρους αποσκευών και θέσεις με το intercity τρένο, με τη διαφορά των μεγάλων διαδρόμων που προσδίδουν μεγαλύτερη χωρητική δυναμική.

Εμπορικά τρένα

Υπάρχουν δυο τρέχουσες εκδόσεις των εμπορικών-φορτηγών τρένων. Τα τμήματα φορτίου είναι σχεδιασμένα, ώστε να διαχειριστούν τα standard-τύπου containers και παλέτες. Έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς μέχρι 17,5 μετρικών τόνων αγαθών υψηλής προτεραιότητας, με την ίδια ταχύτητα με αυτή των επιβατικών τρένων. Τα τμήματα φορτίου, μπορούν να διαταχθούν με την κλασσική μορφή των superspeed τρένων, ή να προστεθούν σε επιβατικά, προς μεταφορά αποσκευών ή επιπρόσθετων αγαθών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χειριστή.

2.6 ΔΙΑΔΡΟΜΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ - GUIDEWAY

Σε αντιδιαστολή με τα συμβατικά σιδηροδρομικά συστήματα, ο διάδρομος-ράγα του Transrapid, έχει ένα ενσωματωμένο σύστημα προώθησης, και από κοινού με το όχημα, διαμορφώνει ένα πλήρες σύστημα.

Προς την επίτευξη της καλύτερης δυνατής άνεσης, οι προδιαγραφές του διαδρόμου από άποψη κατασκευής, εξοπλισμού, διαθεσιμότητας και υπηρεσιών, είναι ιδιαίτερα αυστηρές. Ακόμα και σε επίπεδες ή υπερυψωμένες, χαλύβδινες ή από

σκυρόδεμα κατασκευές, ο διάδρομος του Transrapid καλύπτει όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Η ακρίβεια της επιφάνειας λειτουργίας, εξασφαλίζεται με την ενσωμάτωση ολόκληρης διαδικασίας, από το αρχικό σχεδιάγραμμα της διαδρομής, στην κατασκευή των τμημάτων του διαδρόμου και στην τελική εγκατάσταση και ανάθεση, με τη χρήση των πιο σύγχρονων τεχνικών και αυτοματοποιημένου εξοπλισμού.

Ο μονός ή διπλός διάδρομος του Transrapid Maglev συστήματος αποτελείται από μεμονωμένες λωρίδες, φτιαγμένες από χάλυβα ή σκυρόδεμα στα τυποποιημένα μήκη των 15 ως 145 m. Ο διάδρομος μπορεί να είναι at-grade ή ανυψωμένος, ανάλογα με τις ανάγκες της διαδρομής.

Ανυψωμένος διάδρομος

Ένας ανυψωμένος διάδρομος είναι εξαιρετικά κατάλληλος σε περιοχές όπου δεν μπορούν να τροποποιηθούν λόγω οικολογικών ή αγροτικών κτημάτων και/ή όπου υπάρχουσες γραμμές κυκλοφορίας δεν μπορούν να εμποδιστούν από μια νέα γραμμή. Διάφορα ύψη στύλων έως 45m και τυποποιημένες λωρίδες διαδρομής έως 145m, επιτρέπουν ευέλικτη τοπογραφική του διαδρόμου. Οι ανυψωμένοι διάδρομοι είναι τοποθετημένοι σε ξεχωριστά θεμέλια, με τους στύλους να είναι προσαρμοσμένοι στην περιβάλλουσα μορφολογία εδάφους. Σε περιοχές με άσχημη εδαφική μορφολογία, οι ανυψωμένοι διάδρομοι, μπορούν επίσης να βρουν εφαρμογή, σε ύψος κοντινό του εδάφους, το οποίο μπορεί συχνά να είναι οικονομικότερη κατασκευή από την at-grade με συνεχή θεμέλια.

Η χρήση των ανυψωμένων διαδρόμων, προκαλεί λίγη έως καθόλου, διαταραχή στο αρχικό τοπίο. Συνεπώς, δεν υπάρχει σχεδόν κανένας αντίκτυπος στο έδαφος ή στις επιφάνειες υδάτων.

At-Grade διάδρομος

Ο at-grade διάδρομος κατασκευάζεται κυρίως εκεί όπου μπορεί να συνυπάρχει με υπάρχουσες κυκλοφοριακές διαδρομές (δρόμοι, σιδηρόδρομοι), όπως επίσης, σε σήραγγες και κύριες αστικές κατασκευές όπως γέφυρες και σταθμοί.

Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά είναι το τυποποιημένο μήκος λωρίδων των 15m και ύψος 3 έως 8m. Οι at-grade διάδρομοι, τοποθετούνται σε συνεχή θεμέλια και τυπικά περιφραγμένοι για μεγαλύτερη ασφάλεια.

Σύστημα αλλαγής πορείας

Τα τρένα Transrapid, αλλάζουν πορεία με τη χρήση εύκαμπτων ατσάλινων «διακοπών». Αυτοί, αποτελούνται από συνεχείς σειρές ατσάλινων τμημάτων μήκους 180-340m, τα οποία κάμπτονται ελαστικά με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών ρυθμιστών οδήγησης. Η λειτουργία τους είναι ηλεκτρονικά διαφυλαγμένη και ελεγχόμενη. Οι εύκαμπτοι «διακόπτες» είναι, είτε at-grade ή ανυψωμένοι. Στην ευθεία, ένα όχημα μπορεί να διασχίσει τον «διακόπτη», χωρίς περιορισμό της ταχύτητας. Σε θέσεις διασταύρωσης συρμών, η ταχύτητα περιορίζεται στα 128mph ή στα 62mph.

Στις εγκαταστάσεις στάθμευσης και συντήρησης, τα οχήματα μπορούν να εναλλάσσονται με τη χρήση «παλέτας» μεταφοράς. Αυτές οι «παλέτες», λειτουργούν με πλευρική κίνηση ενός ευθέως κομματιού του διαδρόμου (με το όχημα να στέκεται εν στάση) για την παράλληλη πρόσβαση πολλαπλών οχημάτων [16], [17].

Υποδομές

Το μέγεθος της επίγειας εργασίας που απαιτείται για τα θεμέλια ενός διαδρόμου εξαρτάται από τις εδαφικές συνθήκες. Τυπικά, τα επίπεδα θεμέλια είναι ικανοποιητικά. Οι σειρές στύλων, είναι απαραίτητες, μόνο όπου οι εδαφικές συνθήκες είναι δύσκολες. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα θεμέλια τοποθετούνται περίπου 12 ίντσες κάτω από την επιφάνεια, για να ελαχιστοποιήσουν τις επιρροές, στην απορροή των υδάτων και σε μικρά ζώα. Εξαιτίας του «ανοιχτού» σχεδιασμού τους, υπάρχουν επίσης, περάσματα για τα μικρά ζώα κάτω από τους at-grade διαδρόμους.

Σήραγγες

Λόγω των εύκαμπτων παραμέτρων ευθυγράμμισης της διαδρομής τους, οι Transrapid διάδρομοι μπορούν να προσαρμοστούν ευκολότερα στα περιγράμματα του τοπίου. Επομένως, οι σήραγγες είναι σπανίως απαραίτητες, ακόμη και σε λοφώδη ή ορεινή έκταση. Σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται σήραγγες, οι απαραίτητες διαδρομές, για το Transrapid, είναι μικρότερες από αυτές των κοινών σιδηροδρόμων, λόγω του ομαλού, αεροδυναμικού σχήματος των οχημάτων.

Παράμετροι ευθυγράμμισης διαδρόμων

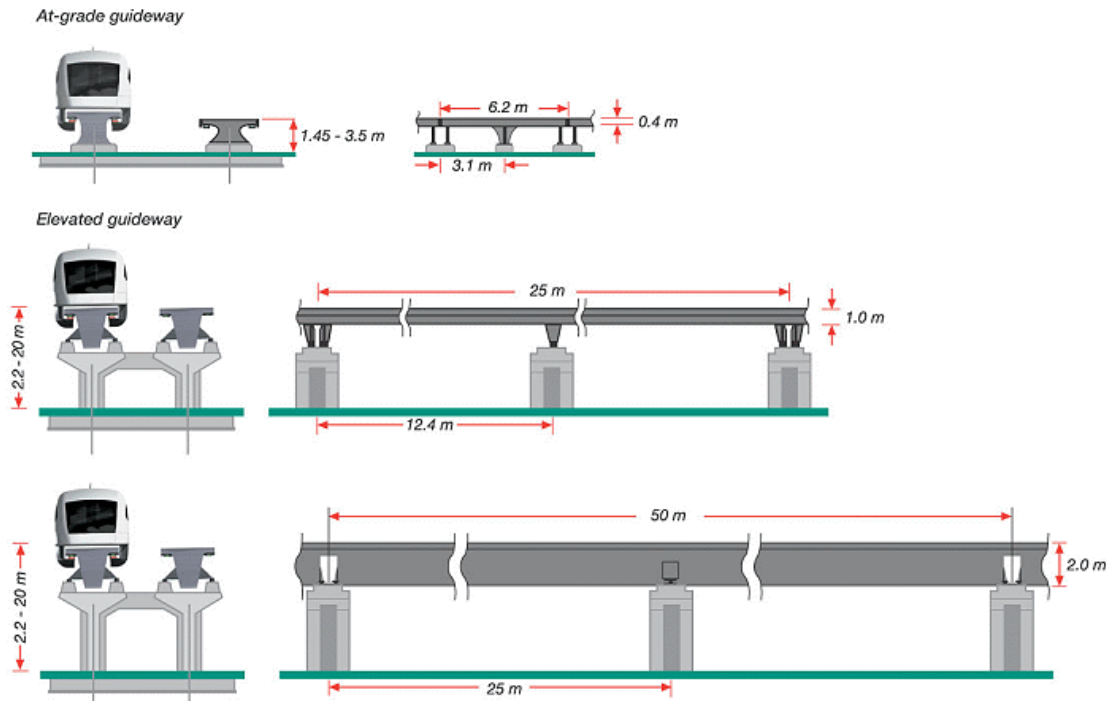
Δύο είναι τα στοιχεία, τα οποία επιτρέπουν στο Transrapid σύστημα να έχει εξαιρετικά ευνοϊκές παραμέτρους ευθυγράμμισης. Αυτά είναι, η ενεργή καθοδήγηση των οχημάτων και η ενσωμάτωση του συστήματος προώθησης κατά μήκος του διαδρόμου. Αυτά τα καινοτόμα στοιχεία του συστήματος, επιτρέπουν κλίσεις ανάβασης 10% (σε αντιδιαστολή του 4% των συμβατικών σιδηροδρομικών συστημάτων) και διάβαση καμπυλών μέχρι 12ο χωρίς καμία δυσκολία. Αυτά τα στοιχεία, επιτρέπουν επίσης, την ευέλικτη εφαρμογή του διαδρόμου στο εκάστοτε τοπίο, χωρίς ιδιαίτερες εργασίες εδάφους, επιτρέποντας συνάμα και τη συνύπαρξή του με υπάρχουσες διαδρομές, εξοικονομώντας γη και χρήματα.

Διασύνδεση με άλλα μέσα μεταφοράς και διαδρομές

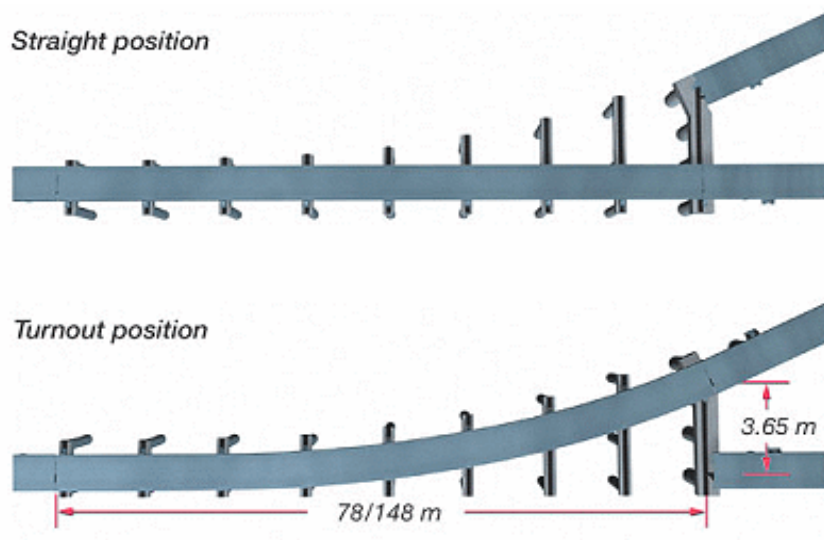
Για μέγιστη άνεση και ικανοποίηση του επιβάτη, οι σταθμοί Transrapid είναι πάντοτε διασυνδεδεμένοι με αλλά διαθέσιμα μέσα μεταφοράς (σιδηρόδρομοι, αυτοκινητόδρομοι, αεροδρόμια). Η ενσωμάτωση των υπηρεσιών Transrapid σε ολόκληρο το δίκτυο μεταφορών, παρέχει υψηλά οφέλη και απόδοση μεταφορών στο επιβατικό κοινό.

Η δημόσια αποδοχή και η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος Transrapid, εξαρτάται από την δυνατότητα πρόσβασης στους σταθμούς του. Επομένως, κατά τον σχεδιασμό της διαδρομής, δίδεται προσοχή στην διασφάλιση εγγύτητας σε όλα τα διαθέσιμα συστήματα και όχι μόνο στους αυτοκινητοδρόμους. Ουσιαστική ανακούφιση από την κυκλοφοριακή συμφόρηση, μπορεί να πραγματοποιηθεί, εάν οι οδηγοί μπορούν να μεταφέρονται άνετα στο σύστημα Transrapid. Αυτό απαιτεί

ταχεία, αξιόπιστη και οικονομική πρόσβαση σε κύριους αυτοκινητοδρόμους και τη διαθεσιμότητα ικανοποιητικών εγκαταστάσεων στάθμευσης και αναχώρησης /αποχώρησης από τους σταθμούς [6].



Εικόνα 2.6.a: At-grade και ανυψωμένος διάδρομος [6]



Εικόνα 2.6.b: Σύστημα αλλαγής πορείας [6]

2.7 ΤGV ΚΑΙ ΑΛΛΟΙ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΕΣ

2.7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίγεια μεταφορά σε υψηλές ταχύτητες (HSGT), η οποία δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένη, παρέχει κυρίως εξυπηρέτηση σε ταχύτητες, οι οποίες βρίσκονται στο μέσο του εύρους ταχυτήτων των αυτοκινήτων και των αεροσκαφών (από 500-200 m/s). Η τεχνολογία Maglev είναι μια εναλλακτική της HSGT τεχνολογίας. Μια άλλη εναλλακτική είναι το κορεατικό HSR. Διαφορά πρόσφατα ανεπτυγμένα συστήματα HSR, παρουσιάζουν εντυπωσιακά χαρακτηριστικά απόδοσης και έχουν τη δυνατότητα ικανοποίησης πολλών απαιτήσεων της εγχώριας μεταφοράς. Από την άλλη, το γαλλικής κατασκευής TGV (train a grande vitesse), προσφέρει μια αποδεδειγμένη, εμπορικά επιτυχημένη εξυπηρέτηση 83 m/s και έχει αναπτυχθεί και σε άλλες χώρες, χωρίς αναπτυξιακό ρίσκο. Η περαιτέρω ανάπτυξη θα αυξήσει αναμφισβήτητα τα όρια απόδοσης του, παρά τις δαπάνες και τους κινδύνους που το συνοδεύουν. Σε σύγκριση με τα Maglev συστήματα, σε γενικές γραμμές, το TGV ανταποκρίνεται ικανοποιητικά. Άλλωστε, σε επίπεδο ολοκλήρωσης και εμπορικής ιστορίας, τα Maglev συστήματα, παρουσιάζουν μεγαλύτερο ρίσκο από το TGV, ακόμα και αν προσφέρουν σημαντικά μεγαλύτερα επίπεδα απόδοσης. Το TGV και το HSR δεν είναι οι μόνοι «ανταγωνιστές» των συστημάτων Maglev. Ευρέως διαδεδομένα συστήματα είναι το γερμανικό ICE (InterCity Express) καθώς και το ιαπωνικό Shinkansen. Τα τέσσερα αυτά συστήματα, παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, καταδεικνύοντας το εύρος της αγοράς των μεταφορών και τον ανταγωνισμό που οφείλει να υπερκεράσει η τεχνολογία Maglev, ούτως ώστε να εγκατασταθεί ως κορυφαίο, παγκόσμιο και κύριο μέσο επίγειας μαζικής μεταφοράς.

2.7.2 TGV

Το TGV (train a grande vitesse), είναι ένα σύστημα των γαλλικών high-speed σιδηροδρόμων, το οποίο αναπτύχθηκε από την GEC-Alsthom και την SNCF και λειτουργήσε πρωτίστως από την SNCF. Μετά την εναρκτήρια υπηρεσία του TGV μεταξύ Παρισιού και Λυών το 1981, το δίκτυο TGV, το οποίο κεντροθετείται στο Παρίσι, έχει επεκταθεί για τη σύνδεση πόλεων σε ολόκληρη τη Γαλλία και τις γειτονικές χώρες. Καθιέρωσε το ρεκόρ για το ταχύτερο τροχοφόρο τρένο, στα 574,8 km/h στις 3 Απριλίου 2007, και κρατά ,επίσης, και την υψηλότερη μέση

ταχύτητα κανονικής εξυπηρέτησης επιβατών, παγκοσμίως. Το TGV είναι ένα αναγνωρισμένο εμπορικό σήμα της SNCF.

Η επιτυχία της πρώτης γραμμής, οδήγησε σε μια επέκταση του δικτύου, με τις νέες γραμμές να κατασκευάζονται στο νότο, τη δύση, το βορρά και τα ανατολικά της χώρας. Πρόθυμες να μιμηθούν την επιτυχία αυτού του γαλλικού δικτύου, γειτονικές χώρες όπως το Βέλγιο, η Ιταλία και η Γερμανία, κατασκεύασαν τις δικές τους γραμμές υψηλής ταχύτητας (high-speed rails). Τα TGV, ενώνονται με την Ελβετία μέσω του γαλλικού δικτύου, με το Βέλγιο, τη Γερμανία και την Ολλανδία μέσω του δικτύου Θαλής, ενώ το δίκτυο Eurostar ενώνει Γαλλία και Βέλγιο με το Ηνωμένο Βασίλειο. Διάφορες γραμμές έχουν σχεδιαστεί, περιλαμβάνοντας επεκτάσεις στο εσωτερικό της Γαλλίας και των γειτονικών περιοχών.

Τα οχήματα του δικτύου TGV, ταξιδεύουν με ταχύτητες έως 320 km/h σε εμπορική χρήση. Ένα ειδικά τροποποιημένο όχημα δυο μηχανών, έφθασε την ταχύτητα των 547,8 km/h σε δοκιμαστική λειτουργία, ενώ το TGV διπλού καταστρώματος, μόλις, απέτυχε να καταρρίψει το παγκόσμιο ρεκόρ των 581 km/h του 2003 του ιαπωνικού Maglev τρένου. Η μέθοδος, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατάρριψη αυτού του ρεκόρ, εντούτοις, δεν είναι εφαρμόσιμη για εμπορικές εφαρμογές, εξαιτίας υπερφόρτωσης του κινητήρα, φθοράς της γραμμής και του κινητήρα, υπερβολικών δονήσεων, θορύβου και έλλειψη μεθόδου στάσης έκτακτης ανάγκης.

Η υψηλή ταχύτητα του TGV πραγματοποιείται μέσω της χρήσης ειδικά σχεδιασμένων LGVs (lignes a grande vitesse, high-speed lines), χωρίς απότομες καμπύλες και με υψηλής ισχύος ηλεκτρικούς κινητήρες, διευρυμένους τροχούς, χαμηλό βάρος αξόνων, αρθρωμένα βαγόνια, και in-cab σηματοδότησης (εξαλείφοντας την ανάγκη οδηγών προς παρατήρηση των πλευρικών σημάτων στις υψηλές ταχύτητες). Τα οχήματα TGV κατασκευάζονται από την Alstom και, συχνά, σε συνεργασία συμπαραγωγών όπως η Bombardier. Εκτός από μικρούς συρμούς, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ταχυδρομικού υλικού μεταξύ Παρισιού, Λυών και Προβενς, το TGV είναι πρώτα από όλα μια επιβατική υπηρεσία.

Το ταξίδι με το TGV, έχει αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό το αεροπορικό ταξίδι μεταξύ των πόλεων, εξαιτίας του συνολικά μικρότερου χρόνου ταξιδιού (ειδικότερα

για διαδρομές μικρότερες των τριών ωρών). Το TGV, παρότι είναι γενικά μια ασφαλής μορφή μεταφοράς, έχει καταγράψει ατυχήματα.

Ανάπτυξη

Αρχικά, προγραμματίστηκε ότι το TGV, θα ωθούνταν από ηλεκτρικές μηχανές αεροστροβίλου. Οι αεροστρόβιλοι επιλέχθηκαν λόγω του μικρού τους μεγέθους, την καλή αναλογία τους δύναμη/βάρους και την δυνατότητα παροχής υψηλής ισχύος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το πρώτο πρωτότυπο TGV001, ήταν το μοναδικό TGV, το οποίο κατασκευάστηκε με αυτή τη μηχανή(μετά την αύξηση της τιμής του πετρελαίου κατά τη διάρκεια της ενεργειακής κρίσης του 1973, οι αεροστρόβιλοι κρίθηκαν μη πρακτικοί και το πρόγραμμα στράφηκε στη λύση της ηλεκτρικής ενέργειας από εναέριες γραμμές).

Η ηλεκτρική ενέργεια επρόκειτο να παραχθεί από νέους σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας της Γαλλίας. Το TGV001 δεν ήταν ένα «σπαταλημένο» πρωτότυπο. Ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με αεροστρόβιλους, ήταν μόνο μια από τις πολλές τεχνολογίες για το ταξίδι υψηλής ταχύτητας με τρένο. Εξέτασε, επίσης, τα φρένα υψηλής ταχύτητας, τα οποία απαιτήθηκαν για να αποσβέσουν το μεγάλο ποσό της κινητικής ενέργειας ενός τρένου υψηλής ταχύτητας, την αεροδυναμική της υψηλής ταχύτητας και τη σηματοδότηση. Η άρθρωσή του απέδειξε ότι, δυο συνδεδεμένα βαγόνια, μπορούσαν να συνεργήσουν σε ένα όχημα, επιτρέποντας την ελεύθερη και ελεγχόμενη κίνηση όσον αφορά το ένα το άλλο. Ο εσωτερικός και εξωτερικός του σχεδιασμός, αποτέλεσε τη βάση των πρόωρων σχεδίων του TGV, συμπεριλαμβανομένης και της διακριτικής μορφής «μύτης» του εμπρόσθιου μέρους των πρώτων TGV αυτοκινήτων.

Η θεσμοθέτηση του ηλεκτρισμού ως βασική πηγή κίνησης, απαίτησε μια σημαντική εξέταση του σχεδίου. Το πρώτο ηλεκτρικό πρωτότυπο ολοκληρώθηκε το 1974 και ονομάστηκε Zebulon, εξετάζοντας ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως, το καινοτόμο μοντάρισμα των μελών της μηχανής, παντογράφους, ανάρτηση και πέδηση.

Το 1976, η γαλλική κυβέρνηση, χρηματοδότησε το σχέδιο TGV και η κατασκευή του LGV Sud-Est, της πρώτης γραμμής υψηλής ταχύτητας, ξεκίνησε τη λειτουργία της αμέσως μετά. Έπειτα από την παραγωγή δυο οχημάτων (Patrick και Sophie), τα

οποία είχαν δοκιμαστεί και τροποποιηθεί ουσιαστικά, η πρώτη παραγωγική έκδοση παραδόθηκε στις 25 Απριλίου 1980.

Γραμμές

Οι νεώτερες γραμμές υψηλής ταχύτητας, επιτρέπουν ταχύτητες έως 320 km/h σε κανονική λειτουργία. Αρχικά, τα LGVs είχαν οριστεί ως γραμμές, οι οποίες επιτρέπουν ταχύτητες μεγαλύτερες των 200 και, αργότερα, των 250 km/h. Τα TGVs λειτουργούν, επίσης, σε συμβατικές γραμμές, στην κανονική μέγιστη ταχύτητα ασφάλειας αυτών των γραμμών, μέχρι ένα μέγιστο των 220 km/h. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα που έχει το TGV έναντι των Maglev τρένων, λόγω του ότι, μπορεί να εξυπηρετήσει περισσότερους προορισμούς και χρησιμοποιήσει αστικούς κεντρικούς σταθμούς.

Παροχή ισχύος

Τα LGVs ηλεκτροδοτούνται στα 25 kV, 50 Hz AC. Η μηχανική τάση των αλυσωτά συνδεδεμένων καλωδίων, είναι σχεδιασμένη μεγαλύτερη των κανονικών γραμμών, εξαιτίας των ταλαντώσεων που υφίστανται και της ανάγκης γρηγορότερης όδευσης των κυμάτων (από τα τρένα), για την αποφυγή των μόνιμων κυμάτων, τα οποία θα οδηγούσαν στη θραύση τους. Το εμπρόσθιο μέρος του οχήματος, τροφοδοτείται από ένα καλώδιο, το οποίο διασχίζει την οροφή του τρένου. Τα τρένα Eurostar είναι αρκετά μακριά σε μήκος, ούτως ώστε οι ταλαντώσεις μεταξύ των εμπρόσθιων και οπίσθιων μελών, να είναι μετριασμένες. Στις κλασικές γραμμές, οι χαμηλότερες μέγιστες ταχύτητες, αποτρέπουν τα προβλήματα ταλάντωσης.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του TGV έναντι των υπόλοιπων τεχνολογιών, είναι ότι μπορεί να εκμεταλλευτεί την υπάρχουσα υποδομή. Αυτό, καθιστά μια πιο απλή και ανέξοδη πρόταση από την σύνδεση των κέντρων των πόλεων με χρήση του Transrapid. Διαδρομές και σταθμοί μεταξύ πόλεων, κατασκευάζονται για τρένα χαμηλότερης ταχύτητας.

Ωστόσο, οι σχεδιαστές διαδρομών LGV, τείνουν να χτίσουν νέους ενδιάμεσους σταθμούς στις προαστιακές περιοχές ή την επαρχία. Αυτό επιτρέπει στο TGV να σταματήσει, χωρίς μεγάλη καθυστέρηση, δεδομένου ότι, ο περισσότερος χρόνος

ξοδεύεται στη διαδρομή. Επιπλέον, πολλοί σταθμοί των πόλεων είναι τερματικοί, ενώ οι γραμμές LGV μπορούν να παρακάμπτουν συχνά τις πόλεις αυτές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι σταθμοί κατασκευάζονται στο μέσο της διαδρομής μεταξύ δυο κοινοτήτων.

Εξοπλισμός κίνησης

Τα TGVs συνδέονται με πολλαπλές, ημι-μόνιμες αρθρωμένες μονάδες, με βαγονέτα Jacobs μεταξύ των βαγονιών να υποστηρίζουν αυτά τα δυο. Τα βαγόνια ισχύος στο εμπρόσθιο και οπίσθιο μέρος των τρένων, έχουν τα δικά τους βαγονέτα. Τα τρένα μπορούν να επεκταθούν συνδέοντας δυο TGVs, με τη χρήση συζευκτών, οι οποίοι βρίσκονται στις άκρες των βαγονιών ισχύος.

Το σχέδιο άρθρωσης είναι κατάλληλο για συνθήκες εκτροχιασμού, δεδομένου ότι τα βαγόνια των επιβατών τείνουν να είναι όρθια (σύμφωνα με τις ράγες). Τα συνήθη τρένα, εν αντιθέσει, μπορούν να χωριστούν με συζευκτήρες τύπου «σουγιά».

Μειονέκτημα αυτής της σχεδίασης ατράκτου, αποτελεί ο δύσκολος διαχωρισμός των βαγονιών. Καθώς τα βαγόνια ισχύος μπορούν να αποσυνδεθούν από το τρένο, μέσω τυπικών διαδικασιών απόζευξης, απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός για την απόζευξη των υπόλοιπων βαγονιών, με ταυτόχρονη ανάρτηση ολόκληρου του σώματος του τρένου. Όταν αποσυνδεθούν, η άκρη ενός βαγονιού μένει χωρίς βαγονέτο, όποτε ένα επιπλέον πλαίσιο βαγονέτων απαιτείται για να το υποστηρίξει.

Το SNCF, ενεργοποιεί ένα στόλο περίπου 400 TGVs. Επτά τύποι TGV ή παραγωγών του TGV λειτουργούν αυτή την περίοδο στο γαλλικό δίκτυο και είναι οι εξής:

- TGV Sud-Est (επιβατικό), TGV La Poste (εμπορικό)
- TGV Atlantique (8 έως 10 βαγονιών)
- TGV Réseau (έως 8 βαγονιών)
- Eurostar
- TGV Duplex (δυο καταστρωμάτων για μεγαλύτερη χωρητικότητα επιβατών)

- Thalys PBA και PBKA
- TGV Pos

Όλα τα TGVs μπορούν να λειτουργήσουν και στα 25 kV, 50 Hz AC, και σε νεώτερες γραμμές (συμπεριλαμβανομένων LGV) και στα 15 kV DC σε παλαιότερες γραμμές. Τα τρένα, τα οποία διασχίζουν και άλλες χώρες, οφείλουν να προσαρμόζονται σε άλλες τάσεις. Κατά τη διάβαση περιοχών παροχής διαφορετικής τάσης, πίνακες δεικτών υπενθυμίζουν στον οδηγό να κλείσει την ισχύ στις μηχανές έλξης και να θέσει το διακόπτη επιλογής στο κατάλληλο σύστημα. Μόλις ανιχνεύσει το τρένο τη σωστή παροχή, ένας δείκτης φωτίζει στο ταμπλό και ο οδηγός μπορεί να εκκινήσει τις μηχανές έλξης.

Μελλοντικά TGVs

Οι SNCF και Alstom, διεξάγουν έρευνες για νέες τεχνολογίες, οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην υψηλής ταχύτητας μεταφορά.

Η ανάπτυξη των TGV τρένων, βασίζεται στον τύπο AGV (Automotrice a grande vitesse). Το σχέδιο AGV διαθέτει κινητήρες σε κάθε βαγόνι. AGVs ίδιου μήκους με τα TGVs, διαθέτουν έως 450 θέσεις, με επιθυμητή ταχύτητα τα 360 km/h. Το AGV πρωτότυπο, αποκαλύφθηκε στις 5 Φεβρουαρίου του 2008 από την Alstom.

Βραχυπρόθεσμα, τα σχέδια προσανατολίζονται στην αύξηση της ικανότητας του TGV κατά 10%, με την αντικατάσταση των κεντρικών βαγονιών ισχύος, ενός διπλού TGV, με βαγόνια επιβατών. Αυτά τα βαγόνια θα έχουν στο κάτω μέρος τους τροφοδοτικά βαγονέτα, ούτως ώστε να καλύπτουν τις απώλειες ισχύος [7].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΙ

ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ - LSM

3.1 ΤΥΠΟΙ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ (ΣΕΚ)

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι ευθύγραμμων σύγχρονων κινητήρων (ΣΕΚ). Σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες με υποστήριξη σιδήρου (συμβατικός σύγχρονος ευθύγραμμος κινητήρας) και σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες χωρίς σίδηρο, με χρήση υπεραγωγίων μαγνητών. Ο σύγχρονος ευθύγραμμος αυτός κινητήρας καλείται υπεραγωγίσιμος σύγχρονος κινητήρας ή απλά σύγχρονος ευθύγραμμος κινητήρας αέρος. Οι σύγχρονοι ευθύγραμμοι κινητήρες αέρος επιβάλλεται να κατασκευαστούν με βραχύ δευτερεύον, δηλαδή με λίγους μόνον υπεραγωγίσιμους μαγνήτες, γιατί το κόστος και η συντήρηση υπεραγωγίων μαγνητών είναι πολυδάπανη για όλο το μήκος της γραμμής, πέρα από τα άλλα προβλήματα που πιθανόν να εμφανιστούν.

Οι ευθύγραμμοι σύγχρονοι κινητήρες με υποστήριξη σιδήρου μπορούν να κατασκευαστούν είτε με βραχύ πρωτεύον είτε με βραχύ δευτερεύον. Για λόγους τεχνολογίας, ο συνήθης ΣΕΚ σιδήρου έχει βραχύ δευτερεύον. Έτσι θα μελετήσουμε στο παρόν και τους δύο τύπους σύγχρονων κινητήρων με βραχύ δευτερεύον. Η λειτουργική συμπεριφορά των κινητήρων με βραχύ πρωτεύον άλλωστε δεν διαφέρει ουσιαστικά (εκτός από την μικρότερη άεργο ισχύ που έχει). Έτσι, θα θεωρήσουμε ότι έχουμε στο πρωτεύον ένα μακρύ τριφασικό τύλιγμα. Το τύλιγμα του πρωτεύοντος συνήθως ενεργοποιείται κατά τμήματα, όταν πάνω του υπάρχει το κινούμενο δευτερεύον, για να ελαττωθούν οι θερμικές απώλειες και η άεργος ισχύς του συστήματος. Το τύλιγμα τροφοδοτείται με ένα τριφασικό σύστημα τάσεων έτσι ώστε μπορούμε να υποθέσουμε ότι το ισοδύναμο φύλλο ρεύματος θα έχει πυκνότητα ρεύματος:

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

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

Όπου

K_W = συντελεστής τυλίγματος, N = αριθμός αγωγών μιας φάσεως και $\kappa = \pi/\tau$. Δηλαδή η γραμμική πυκνότητα είναι ένα αρμονικό κύμα με κυματαριθμό το κ .

Βεβαίως στη γενική περίπτωση θα υπάρχουν και άλλες χωρικές αρμονικές (γενικά μπορούμε να αποδείξουμε ότι οι μη μηδενικές αρμονικές έχουν κυματαριθμούς που δίνονται από τη σχέση $\alpha_n = (6n+1) \cdot \kappa$ για n ακέραιο).

Έτσι υπάρχουν οι αρμονικές με κυματαριθμούς:

$$\alpha_0 = -\kappa, \alpha_{-1} = -5 \cdot \kappa, \alpha_1 = 7 \cdot \kappa, \alpha_{-2} = -11 \cdot \kappa, \alpha_2 = 13 \cdot \kappa$$

Όπως και στα τυλίγματα των ΕΕΚ το τύλιγμα είναι διπλό ώστε να εξουδετερώσουμε κυρίως την 5η (α_{-1}) και 7η (α_1) αρμονική που είναι και η ισχυρότερες. Δηλαδή χρησιμοποιούμε δύο τυλίγματα που απέχουν στο χώρο διάστημα $\tau/5$ ή $\tau/6$. Έτσι συνήθως θα είναι $K_W = \cos(\pi/10)$ ή $\cos(\pi/12)$.

Επειδή οι υπόλοιπες αρμονικές έχουν πολύ μικρό μέτρο, τελικά για διπλό τύλιγμα πρωτεύοντος, μπορούμε να θεωρήσουμε χωρίς αισθητό σφάλμα ότι όλες μαζί οι αρμονικές έχουν αμελητέα επίδραση στην κίνηση και στην απόδοση των ΣΕΚ. Η ισοδύναμη τάση του πρωτεύοντος στο χώρο Fourier θα είναι λοιπόν:

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

Ενώ η συχνότητα της είναι ω . Δηλαδή η διέγερση αυτή αντιπροσωπεύει αρμονικό κύμα που κινείται στην κατεύθυνση x προς το $+\infty$, με ταχύτητα φάσεως $v_s = \omega/\kappa$, που καλείται και σύγχρονη ταχύτητα.

Στην περίπτωση τώρα του βραχέος δευτερεύοντος, το τύλιγμά του, είναι ένα τύλιγμα συνεχούς, δηλαδή, για διδιάστατη ανάλυση, αποτελείται από $2 \cdot n$ εν σειρά αγωγούς

που διαρρέονται οι μισοί με ρεύμα μιας σταθερής φοράς I_0 και οι άλλοι μισοί με ρεύμα αντίθετης φοράς. Σχεδόν πάντα στους ΣΕΚ, το πλάτος των αγωγών του δευτερεύοντος είναι ίσο με το πλάτος των αγωγών του πρωτεύοντος L . Επίσης η μέση απόσταση μεταξύ αγωγών μιας φοράς από τους αγωγούς της άλλης φοράς είναι πάντοτε ίση προς το πολικό βήμα του πρωτεύοντος. Επειδή κάθε ζεύγος αγωγών προσαγωγής – επιστροφής ισοδυναμεί με ένα πλαίσιο με διαστάσεις τ και L , προκύπτει ένα στατικό κύμα με πυκνότητα μετασχηματισμένη κατά Fourier που δίδεται από τη σχέση :

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

Όπου δ είναι το πάχος του ισοδύναμου φύλλου ρεύματος εκάστου αγωγού του δευτερεύοντος και x_m η απόσταση του μέσου του m -ιστού πλαισίου, συνήθως από το μέσον του τυλίγματος. Η ισοδύναμη τάση του τυλίγματος του δευτερεύοντος στο χώρο Fourier θα είναι :

$$V_2^0(\alpha) = \alpha \cdot I_{y,2}^0$$

Το στατικό αυτό κύμα κινείται στην κατεύθυνση του άξονα x με ταχύτητα v . Άρα μπορούμε να πούμε ότι έχει κατά Doppler συχνότητα $\omega' = -\alpha v$ (διαφορετική για κάθε κυματαριθμό α). Έτσι σε σχέση με το ακίνητο πρωτεύον υπάρχουν δύο αλληλεπιδρόντα κύματα το ένα με συχνότητα ω και το άλλο με συχνότητα $-\alpha v$. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι για να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος οι δύο συχνότητες πρέπει να συμπίσουν. Δηλαδή όταν $\omega = -\alpha v$.

Όμως το πρώτο κύμα έχει μόνο ένα κυματαριθμό $\alpha = -k$ άρα για την αλληλεπίδραση πρέπει $\omega = k \cdot v$, άρα $v = \omega / k = v_s$. Δηλαδή το δευτερεύον πρέπει να κινείται με ταχύτητα φάσεως του πρωτεύοντος που είναι η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα. Γι'αυτό και οι ευθύγραμμοι αυτοί κινητήρες ονομάζονται σύγχρονοι. Η

αλληλεπιδρώσα συνιστώσα του δευτερεύοντος θα έχει ισοδύναμη τάση, λοιπόν, ίση προς :

$$V_2^0(-\kappa) = -\kappa \cdot I_{y,2}^0(-\kappa)$$

Παρ' όλο που τα αρμονικά αυτά κύματα έχουν την ίδια συχνότητα και ταχύτητα φάσεως, έχουν εν γένει στο χώρο κάποια φασική διαφορά φ . Άρα αν θεωρήσουμε τη διέγερση του πρωτεύοντος:

$$V_1^0(-\kappa) = \sqrt{2} \cdot I \cdot (-\kappa) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \delta(\alpha + \kappa)$$

σαν μέγεθος αναφοράς, τότε η διέγερση του δευτερεύοντος θα είναι:

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

Υπολογισμός Δύναμης Ανάρτησης L

Η δύναμη ανάρτησης L μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση :

$$L = \frac{\partial W}{\partial g}$$

Όπου :

$$W = \frac{Q}{2\omega}$$

και αποτελεί την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια

Άρα:

$$L = \frac{1}{2\omega} \frac{\partial Q}{\partial g}$$

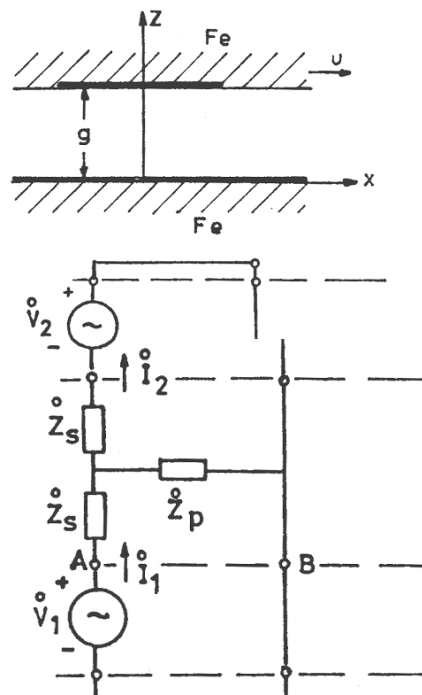
Κατά συνέπεια θα είναι:

$$L = -\frac{\mu_0 \cdot e^{-\kappa \cdot g}}{8 \cdot \kappa^2} V_1 \cdot V_2 \cdot \cos\varphi$$

Η δύναμη αυτή για $0 < \varphi < \pi/2$ είναι αρνητική (ελκτική μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) ενώ για $\pi/2 < \varphi < \pi$ γίνεται θετική (απωστική μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) [8].

3.2 ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Το ισοδύναμο κύκλωμα για τον σύγχρονο ευθύγραμμο κινητήρα σιδήρου φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.2.1.a: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου ευθύγραμμου κινητήρα [8]

Τα Z_s , Z_p είναι οι αντιστάσεις στο χώρο Fourier του ισοδύναμου τετραπόλου του διάκενου αέρος πάχους g , για $\alpha = -\kappa$. Δηλαδή:

$$Z_s = \frac{\kappa}{j \cdot \mu_o} \cdot \tanh\left(\frac{\kappa \cdot g}{2}\right)$$

$$Z_p = \frac{\kappa}{j \cdot \mu_o} \cdot \frac{1}{\sinh(\kappa \cdot g)}$$

Το επίπεδο ακριβώς πάνω από το πρωτεύον αντιπροσωπεύεται από τα σημεία A και B. Τα \dot{U}_1 και \dot{U}_2 αντιπροσωπεύουν τις τάσεις πρωτεύοντος δευτερεύοντος που είναι αντίστοιχα :

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

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

Επιλύοντας το ισοδύναμο κύκλωμα μπορώ να αποδείξω ότι :

$$\underline{\dot{I}_{AB} = \dot{I}_1 = \frac{1}{Z_A} \cdot \left[\frac{\dot{V}_1}{\tanh(\kappa \cdot g)} + \frac{\dot{V}_2}{\tanh(\kappa \cdot g)} \right]}$$

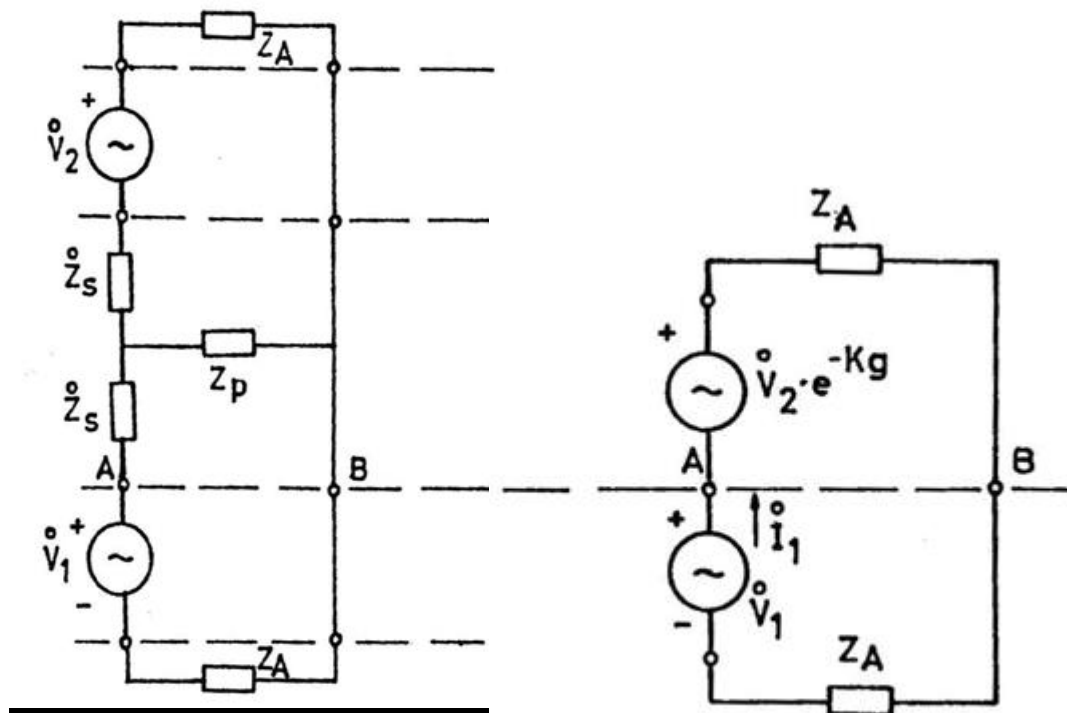
Όπου:

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

και

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_{AB}$$

Το μοντέλο για τον σύγχρονο ευθύγραμμο κινητήρα αέρος με διάκενο g, με το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα του φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί :



Σχήμα 3.2.1.b: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου ευθύγραμμου κινητήρα [8]

Κατά Thevenin μπορούμε να αποδείξουμε ότι τα παραπάνω δύο κυκλώματα όπως παρουσιάζονται στο σχήμα είναι ισοδύναμα. Συνεπώς θα είναι:

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

όπου

$$Z_A = \frac{|\alpha|}{j \cdot \mu_o}$$

Έχοντας υπολογίσει το ισοδύναμο ρεύμα στο χώρο Fourier στο αντίστοιχο επίπεδο ακριβώς πάνω από το πρωτεύον και για τους δυο τύπους κινητήρων μπορώ να χρησιμοποιήσω, για τον υπολογισμό δυνάμεων και ισχύος τις ακόλουθες σχέσεις :

Δύναμη ωθήσεως ανά m πλάτος:

$$T = -\frac{1}{2} \cdot \text{Real} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overset{0}{V}_{AB}^*(\alpha) \cdot \overset{0}{I}_{AB}(\alpha)}{\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

Ισχύς ανά m πλάτος:

$$P + jQ = \frac{1}{2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overset{0}{V}_{AB}(\alpha) \cdot \overset{0}{I}_{AB}^*(\alpha)}{\alpha^2} \cdot \omega \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

Δύναμη αναρτήσεως ανά m πλάτους:

$$L = \frac{\mu_0}{4} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{|\overset{0}{V}_{AB}(\alpha)|^2}{\alpha^2} - \frac{|\overset{0}{I}_{AB}(\alpha)|^2}{\mu_0^2} \right] \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

που δίδουν τις δυνάμεις και την ισχύ ευθύγραμμων διατάξεων συναρτήσει των μεγεθών:

$$\overset{0}{V}_{AB}(\alpha), \overset{0}{I}_{AB}(\alpha)$$

Ανά m πλάτους του κινητήρα.

Κατά τη χρήση των τύπων αυτών, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για τον υπολογισμό των μεγεθών Q, L :

- (α) ότι το πρωτεύον τροφοδοτείται κατά τμήματα
- (β) ότι το δευτερεύον του ΣΕΚ σιδήρου έχει πεπερασμένο μήκος σιδήρου στο δευτερεύον. Οι σύγχρονοι κινητήρες σιδήρου μπορούν να κατασκευαστούν με δευτερεύον αποτελούμενο από μια σειρά μόνιμων μαγνητών, στους οποίους τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική πρόοδος και υπάρχουν διαθέσιμοι σε λογικές τιμές.

3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΑΕΡΟΣ

Οι συμβολισμοί T_A και T_F ονομάζονται δυνάμεις πρόωσης του ΣΕΚ αέρος και σιδήρου αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι ο κινητήρας αέρος "χρειάζεται" πολύ λιγότερη άεργη ισχύ για να λειτουργήσει και αυτό αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματά του. Αν συγκρίνουμε τώρα την T_A με την T_F θα δούμε ότι για ίδια V_1 , V_2 και ίδια διάκενα: $T_A \ll T_F$

Δηλαδή φαίνεται ότι ο κινητήρας σιδήρου πλεονεκτεί έχοντας μεγαλύτερη δύναμη ωθήσεως άρα και πραγματική ισχύ. Όμως η εικόνα αυτή είναι παραπλανητική για τους εξής λόγους :

Η δύναμη ωθήσεως που ασκείται λ.χ. στο πρωτεύον θα είναι πάντοτε ανάλογη της παραστάσεως :

$$\text{Real} \left[\overset{\circ}{J}_x \cdot \overset{\circ}{B}_z \right]$$

Όπου

$$\overset{\circ}{J}_x, \overset{\circ}{B}_z$$

Αποτελούν τους παραστατικούς μιγάδες των αρμονικών κυμάτων που εκφράζουν το ρεύμα των αγωγών του πρωτεύοντος και την κάθετη μαγνητική επαγωγή στους αγωγούς.

Η ο J_x εξαρτάται αποκλειστικά από το ρεύμα του πρωτεύοντος άρα είναι ίδια και στους δυο κινητήρες ενώ η ο B_z δημιουργείται κυρίως από το ρεύμα των αγωγών του δευτερεύοντος που βρίσκονται σε άυλακες σιδήρου ή των υπεραγωγών του δευτερεύοντος.

3.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΣΗ

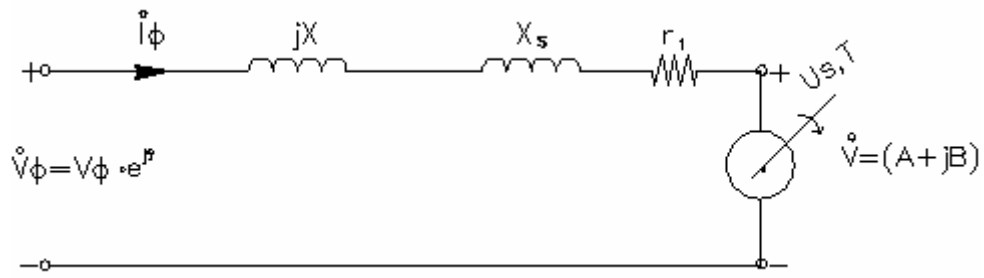
Η ανάλυση που ακολουθεί είναι παρόμοια για όλα τα είδη σύγχρονων κινητήρων (σιδήρου, αέρος, ευθύγραμμων, περιστροφικών). Για κάθε τύπο κινητήρος ισχύουν τα παρακάτω :

- Η πραγματική ισχύς (P) που μετατρέπεται σε μηχανική είναι ανάλογη του I_{ϕ} .
Άρα: $P=3 \cdot A \cdot I_{\phi}$
- Η άεργος ισχύς Q αποτελείται από δύο τμήματα Q_1 και Q_2 για τα οποία ισχύουν τα ακόλουθα :
 1. Η Q_1 είναι ανάλογη του I_{ϕ} , $Q_1 = 3 \cdot B \cdot I_{\phi}$ (Άεργος ισχύς εξ' αλληλεπαγωγής πρωτεύοντος δευτερεύοντος).
 2. Η Q_2 είναι ανάλογη του I_{ϕ}^2 , $Q_2 = 3 \cdot X \cdot I_{\phi}^2$ (Άεργος ισχύς εξ' αυτεπαγωγής πρωτεύοντος)

Για λειτουργία υπό σταθερή τάση πρέπει να λάβουμε υπόψη την άεργο ισχύ σκεδάσεως Q_s (στους αύλακες ή και στις πλάγιες συνδέσεις).

Συνήθως $Q_s = (3 \sim 5\%) Q_2$. Επίσης πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ωμικές απώλειες πρωτεύοντος που είναι ίσες προς $P_L = 3 \cdot I_{\phi}^2 \cdot r_1$, όπου $r_1 =$ φασική αντίσταση πρωτεύοντος.

Επειδή τα μεγέθη P, Q_1 είναι ανάλογα της I_{ϕ} κατά μέτρο, στο ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση για το σύγχρονο κινητήρα, που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, το I_{ϕ} λαμβάνεται ως μέγεθος αναφοράς (δηλαδή είναι πραγματικός θετικός αριθμός ίσος με την ενεργό φασική ένταση I_{ϕ}).



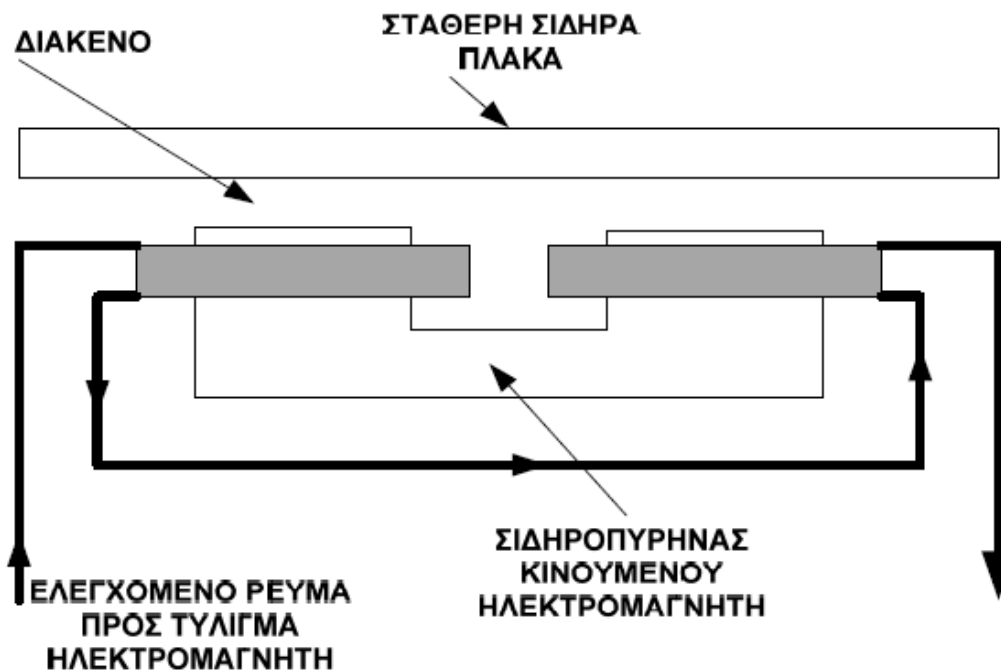
Σχήμα 3.4.a: Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση [9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

EMS - EDS

4.1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΕΛΚΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ (EMS)

Το ηλεκτρομαγνητικό ελκτικό σύστημα ανάρτησης βασίζεται στην ελκτική δύναμη που ασκείται από ένα σύνολο ηλεκτρομαγνητών που βρίσκονται στη βάση του κινουμένου οχήματος, σε μια σταθερή σιδηρομαγνητική δοκό που εκτείνεται κατά μήκος της διαδρομής του οχήματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα 4.1.α: Σύνολο ηλεκτρομαγνητών στο σύστημα ανάρτησης EMS [10]

Η ελκτική δύναμη των ηλεκτρομαγνητών, είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας του οχήματος και δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{B_n^2}{2\mu_0} \cdot S$$

Όπου B_n η κάθετος μαγνητική επαγωγή στην επιφάνεια S του πέλδου του ηλεκτρομαγνήτου.

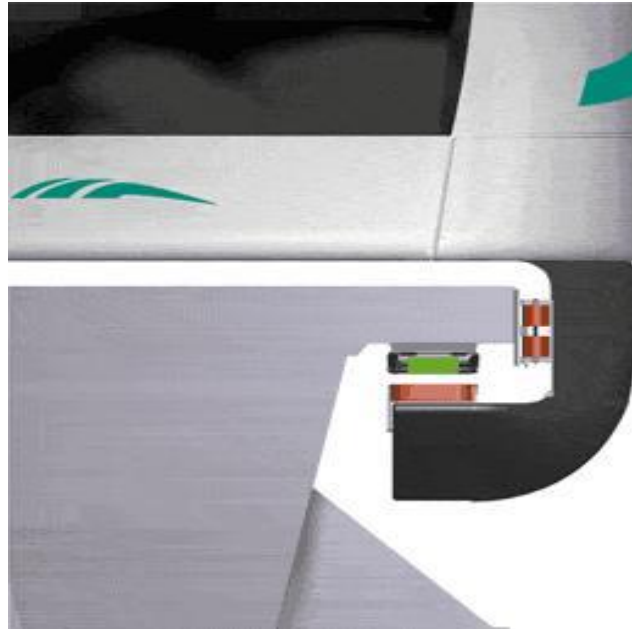
Για τιμές του B_n αρκετά πριν από την τιμή κορεσμού του σιδήρου ($B_n < 1$ Tesla), η B_n είναι κατά προσέγγιση ανάλογη του ρεύματος I του ηλεκτρομαγνήτου. Κατά προσέγγιση μάλιστα ισχύει:

$$\frac{B_n}{\mu_0} \cdot d = N \cdot I$$

όπου N τα ελίγματα του ηλεκτρομαγνήτου και d το μήκος του διακένου. Άρα:

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

Το σύστημα αυτό είναι φανερό ότι είναι ασταθές, δηλαδή αν το διάκενο αυξηθεί η δύναμη έλξεως ελαττώνεται που σημαίνει ότι το διάκενο αυξάνεται περισσότερο. Αν το διάκενο ελαττωθεί η δύναμη έλξεως αυξάνεται που σημαίνει ότι το διάκενο ελαττώνεται ακόμη περισσότερο κτλ. Έτσι αν για κάποιο ρεύμα I στον ηλεκτρομαγνήτη το διάκενο ισορροπίας είναι το d η διατήρησή του καθίσταται δυνατή μόνο με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού συστήματος αυτομάτου ελέγχου που μεταβάλλει το ρεύμα του ηλεκτρομαγνήτη έτσι ώστε το d να μένει σταθερό. Με το σύστημα αυτό λειτουργεί ήδη το σύστημα TRANSRAPID όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.1.b: Σύστημα TRANSRAPID [10]

Το ελκτικό σύστημα είναι εξαιρετικά απλό με μόνο μειονέκτημα την εγγενή αστάθειά του και επομένως χρειάζεται τη λειτουργία συστήματος αυτομάτου ελέγχου.

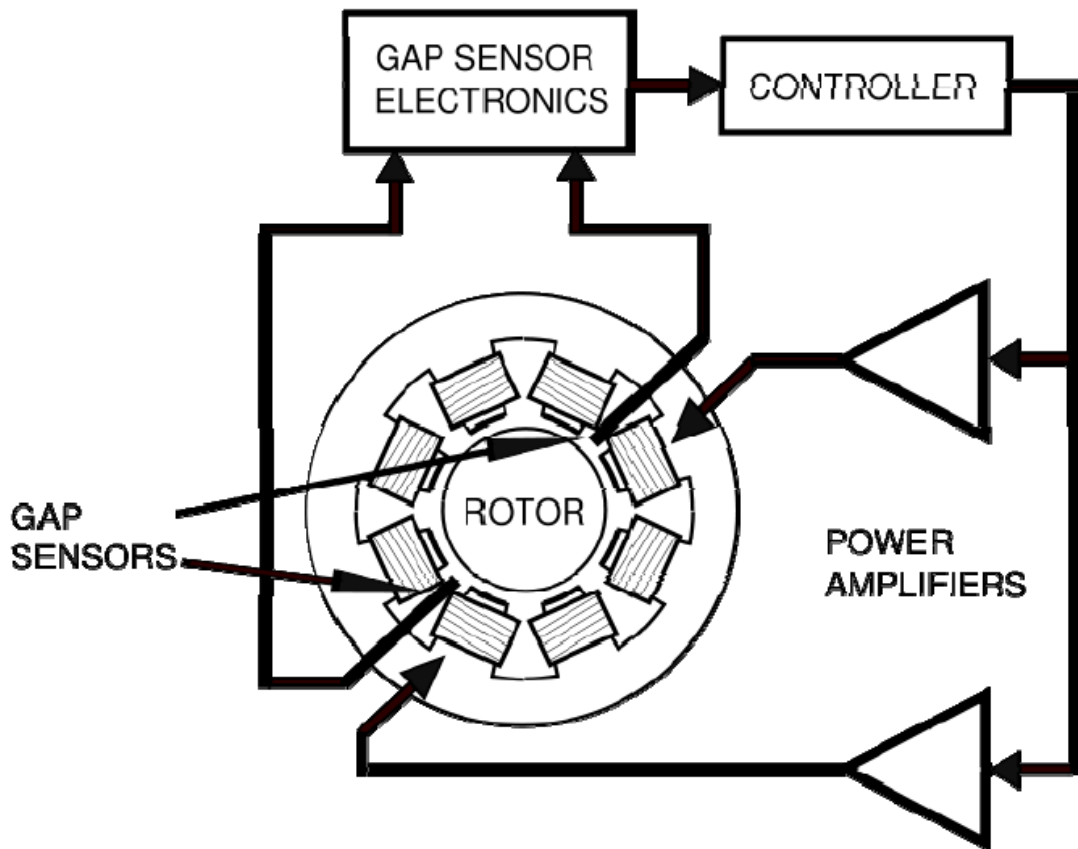
Το διάκενο d συνήθως είναι περίπου 10mm. Αυτό αν και μικρό έχει αποδειχτεί στην πράξη ότι επιτρέπει την ανάπτυξη ταχυτήτων έως και 500 Km/h χωρίς προβλήματα.

Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή για το ελκτικό σύστημα προκύπτει εάν στη θέση (ενός αριθμού) των ηλεκτρομαγνητών χρησιμοποιηθούν μόνιμοι μαγνήτες, οι οποίοι μπορούν να καλύπτουν $\lambda\chi$ το 80% του βάρους του κενού οχήματος. Η ανάρτηση του υπόλοιπου βάρους του οχήματος και του βάρους των επιβατών του θα καλύπτεται από τους ηλεκτρομαγνήτες των οποίων ο έλεγχος του ρεύματος λειτουργίας τους μπορεί να εξασφαλίσει το σταθερό διάκενο.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή του ελκτικού ηλεκτρομαγνητικού συστήματος αποτελούν τα ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν.

Χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ελεγχόμενους ηλεκτρομαγνήτες μπορούμε να στηρίξουμε περιστρεφόμενους σιδηρομαγνητικούς άξονες που φέρουν σημαντικό βάρος, ενώ το διάκενο διατηρείται σταθερό με μικρομετρική ακρίβεια. Η συσκευή αυτή λοιπόν μπορεί να υποκαταστήσει ένα κοινό ρουλεμάν και ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό ρουλεμάν. Η δομή ενός τέτοιου ρουλεμάν είναι παρεμφερής με αυτήν μιας συνήθους τετραπολικής περιστροφικής κυλινδρικής μηχανής (όπως

φαίνεται στο σχήμα 4.1.c). Σκοπός είναι η δημιουργία τεσσάρων ηλεκτρομαγνητικών ελκτικών δυνάμεων που ελέγχονται ηλεκτρομαγνητικά έτσι ώστε με την ρύθμιση του ρεύματος των ηλεκτρομαγνητών το διάκενο να παραμένει σταθερό [9].



Σχήμα 4.1.c: Δομή τετραπολικής περιστροφικής κυλινδρικής μηχανής [10]

Εν γένει τα ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν συνδυάζονται σε 2 τύπους:

- α. Σαν ακτινικά ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν που έχουν κυλινδρικά διάκενα αέρα και μπορούν να παραλάβουν κάθετα φορτία (ακτινικά).
- β. Σαν κωνικά ηλεκτρομαγνητικά που μπορούν να παραλάβουν ακτινικά και αξονικά φορτία και το διάκενο έχει κωνικό σχήμα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν έναντι των κοινών ρουλεμάν έχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Δεν υπάρχει μηχανική φθορά στον άξονα, η θέση του άξονα βρίσκεται κάτω από έλεγχο ακριβείας και οι απώλειες περιστροφής τους είναι πολύ μικρότερες. Έτσι λ.χ. σε ένα στροβιλοσυμπιεστή με μια άτρακτο 1000 kg και στις

10000 PRM ένα συμβατικό Ρουλεμάν έχει 478 KW απώλειες ενώ ένα HMP μόνο 3,5 KW. Εν τούτοις το κόστος τους είναι μεγαλύτερο των συμβατικών πράγμα που δεν επιτρέπει τη πλήρη υποκατάσταση των συμβατικών ρουλεμάν για όλες τις χρήσεις.

Στα συνήθη ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν το υλικό κατασκευής του άξονα επιτρέπει δυνάμεις της τάξης των 40 N/cm².

$$\frac{F}{S} = \frac{B_n^2}{2\mu_0}$$

Για

$$B_n \approx 1, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$$

Προκύπτει ότι:

$$\frac{F}{S} = \frac{10^7}{8\pi} \cdot \frac{N}{m^2} = \frac{10^3}{8\pi} \frac{N}{cm^2} \approx 40 \frac{N}{cm^2}$$

Για δεδομένη διάμετρο η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, για τα ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν, είναι μεγαλύτερη έως 4 φορές έναντι των κοινών ρουλεμάν και διπλάσια απ' την ταχύτητα των υδροπνευματικών ρουλεμάν [9].

4.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΠΩΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ (EDS)

4.2.1 EDS ΜΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ

Στα ηλεκτροδυναμικά συστήματα ανάρτησης η δύναμη ανάρτησης είναι η απωστική δύναμη η οποία ασκείται μεταξύ ενός αγώγιμου φύλλου, ή ενός συνόλου διαδοχικών βραχυκυκλωμένων αγώγιμων σπειρών (δευτερεύον), και ενός ταχέως κινουμένου κλειστού αγωγού διαρρεομένου από συνεχές ρεύμα (πρωτεύον).

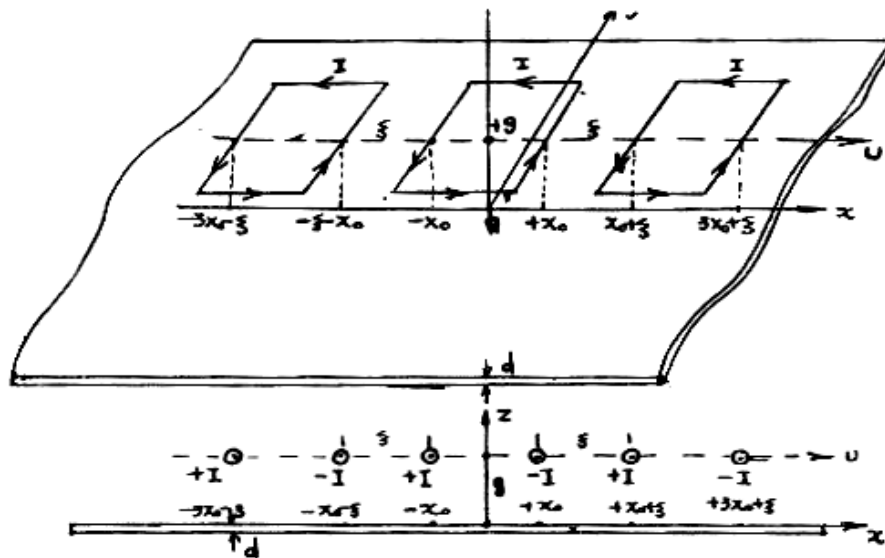
Στο υπεραγώγιμο ηλεκτροδυναμικό σύστημα ανάρτησης το πρωτεύον είναι ένα σύνολο υπεραγώγιμων ορθογωνίων πλαισίων διαρρεομένων από ισχυρά ρεύματα

(χωρίς ωμικές απώλειες). Τα πλαίσια αυτά είναι συνήθως ορθογωνικά πλάτους L , και η κίνηση γίνεται κάθετα ως προς το L .

Το δευτερεύον είναι συνήθως ένα φύλλο αλουμινίου με πάχος d της τάξεως 1 cm. Μεταξύ τους υπάρχει διάκενο g (της τάξεως των 5-20 cm). Δεν υπάρχουν σιδηρομαγνητικά υλικά, άρα ο συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας $\mu = \mu_0$ παντού.

Αυτό σημαίνει ότι έχουμε το τρισδιάστατο μοντέλο εργασίας (Σχήμα 4.2.1.a). Στο συγκεκριμένο μοντέλο του σχήματος 84 έχουμε 3 ορθογωνικά πλαίσια διαρρεόμενα από ομόρροπα ρεύματα I . Το αντίστοιχο διδιάστατο μοντέλο είναι βεβαίως προσέγγιση που όμως μπορεί να μας δώσει καλά υπολογιστικά αποτελέσματα, ανά m πλάτους L .

Τα υπαγωγίμα πλαίσια έχουν διαστάσεις $(2 \cdot x_0 \cdot L)$ και απέχουν απόσταση δ μεταξύ τους. Τα πλαίσια βρίσκονται πάντοτε επί του κινητηρίου οχήματος και απέχουν απόσταση g από το δευτερεύον αγωγίμο φύλλο, το οποίο έχει πάχος d και αγωγιμότητα σ . Η ταχύτητα του κινητηρίου οχήματος (δηλαδή η σχετική ταχύτητα πρωτεύοντος- δευτερεύοντος) συμβολίζεται με v .



Σχήμα 4.2.1.a: Τρισδιάστατο μοντέλο εργασίας [11]

Η ισοδύναμη διδιάστατη διέγερση θα είναι ένα σύνολο από πολύ λεπτούς αγωγούς στην κατεύθυνση y που διαρρέονται από συνεχές ρεύμα I . Κάθε λεπτός αγωγός που

διαρρέεται από ρεύμα I και απέχει απόσταση x_k από το μέσον της διάταξης έχει ισοδύναμη τάση αντίστοιχα την :

$$V(a) = -\alpha \cdot I_0 e^{-j\alpha \cdot x_k}$$

Αν l έχουμε ένα πλαίσιο με διαστάσεις $2 \cdot x_0$. L η συνολική διέγερση του θα είναι ίση προς :

$$V_1(a) = \alpha \cdot I_0 \cdot e^{j\alpha \cdot x_0} - \alpha \cdot I_0 \cdot e^{-j\alpha \cdot x_0} = 2 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0)$$

Εάν έχουμε δυο όμοια πλαίσια που τα κέντρα τους απέχουν απόσταση 2δ , ($\delta > x_0$) και διαρρέονται από ίσα και ομόρροπα ρεύματα ή ισοδύναμη τάση τους θα είναι:

$$V_2(a) = 2 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0) \cdot e^{-j\alpha \delta} + 2 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0) \cdot e^{j\alpha \delta}$$

Δηλαδή:

$$V_2(a) = 4 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0) \cdot \cos(\alpha \cdot \delta)$$

Εάν τα πλαίσια διαρρέονται από ίσα αλλά αντίρροπα ρεύματα η ισοδύναμη τάση τους θα είναι:

$$V_2(a) = 2 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0) \cdot e^{-j\alpha \delta} - 2 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0) \cdot e^{j\alpha \delta}$$

$$V_2(a) = 4 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0) \cdot \sin(\alpha \cdot \delta)$$

Για κ πλαίσια με ίσα και όμορροπα ρεύματα I_0 ισαπέχοντα, σε απόσταση 2δ μεταξύ τους, μπορώ να αποδείξω ότι:

$$V_\kappa(a) = 2 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0) \cdot [1 + e^{-j2\alpha\delta} + e^{-j2 \cdot (2\alpha\delta)} + e^{-j3 \cdot (2\alpha\delta)} + \dots + e^{-j(\kappa-1) \cdot (2\alpha\delta)}]$$

Άρα

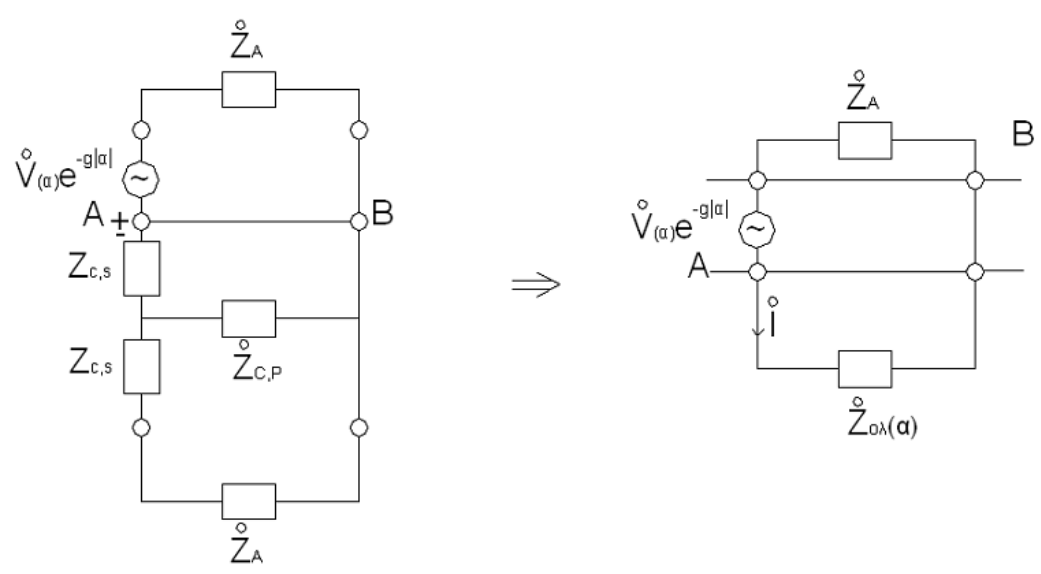
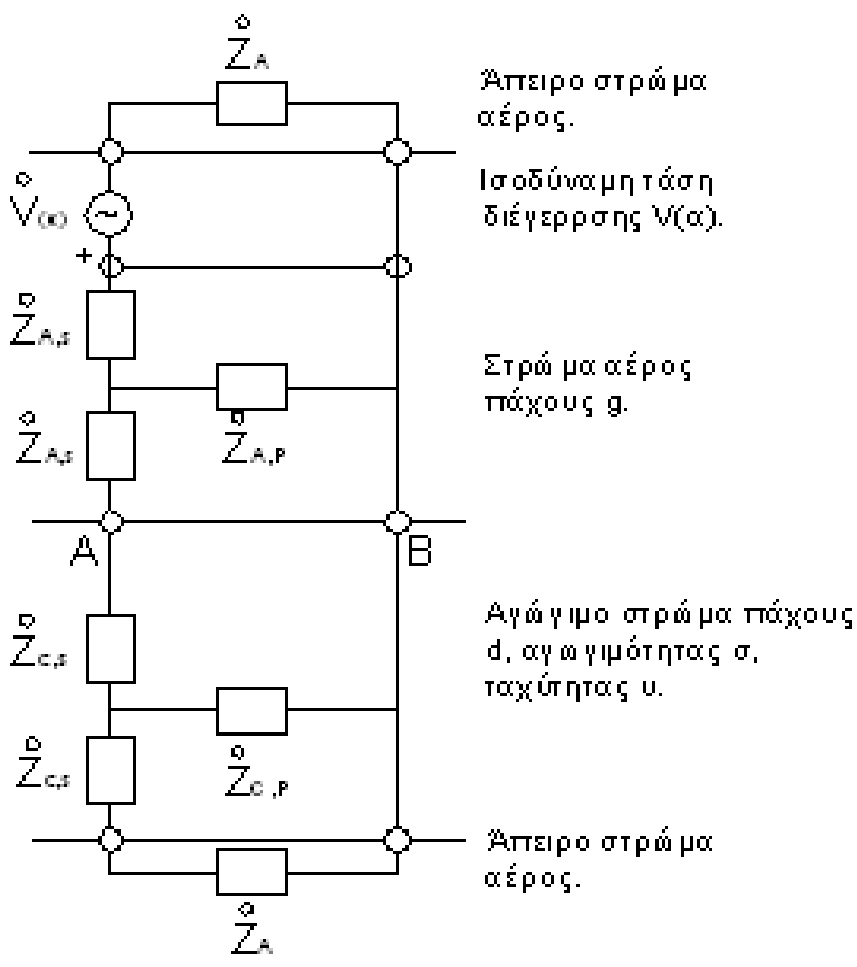
$$V_{\kappa}^0(a) = 2 \cdot j \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sin(\alpha \cdot x_0) \cdot \left[\frac{1 - e^{-j\kappa \cdot (2\alpha\delta)}}{1 - e^{-j2\alpha\delta}} \right]$$

Ακόμα, αν τα κ πλαίσια εναλλάσσουν φορά ρεύματος διαδοχικά μπορεί ν' αποδειχτεί ότι:

$$V_{\kappa}^0(a) = 2j\alpha I_0 \sin(\alpha x_0) \cdot \left[\frac{1 - (-e^{-j(2\alpha\delta)})^{\kappa}}{1 - e^{-j2\alpha\delta}} \right]$$

Στις δυο τελευταίες περιπτώσεις για τον υπολογισμό της ισοδύναμης τάσης $V(a)$, ως αρχή των συντεταγμένων ελήφθη το μέσο του πρώτου πλαισίου. Επειδή στους τελικούς τύπους υπολογισμού των δυνάμεων L,D εισέρχεται η $|V(a)|$.

Το ισοδύναμο κύκλωμα της ηλεκτρομαγνητικής διάταξης, καθώς και οι νόμοι-σχέσεις που το διέπουν, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.2.1.b: Το ισοδύναμο κύκλωμα της ηλεκτρομαγνητικής διάταξης [11]

$$I(\alpha) = \frac{V(\alpha) \cdot e^{-|\alpha|g}}{Z_A + Z_{ολ}(\alpha)}$$

Όπου:

$$Z_A = \frac{|\alpha|}{j \cdot \mu_0}, \quad Z_{ολ}(\alpha) = \frac{Z_A + \tanh(\gamma \cdot d) \cdot Z_C}{1 + \frac{Z_A}{Z_C} \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}$$

Όπου:

$$\gamma^2 = \alpha^2 + j \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot \alpha \cdot v, \quad Z_C = \frac{\gamma}{j\mu_0}$$

$$V_{AB} = I(\alpha) \cdot Z_{ολ}(\alpha)$$

Οι παραπάνω αποτελούν τους νόμους – σχέσεις που διέπουν το ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτρομαγνητικής διάταξης.

Για συνεχές ρεύμα, οι δυνάμεις, οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, προκύπτουν από τους παρακάτω τύπους:

$$D = \text{Real} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| I(\alpha) \right|^2 \cdot \frac{Z_{ολ}^*(\alpha)}{\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

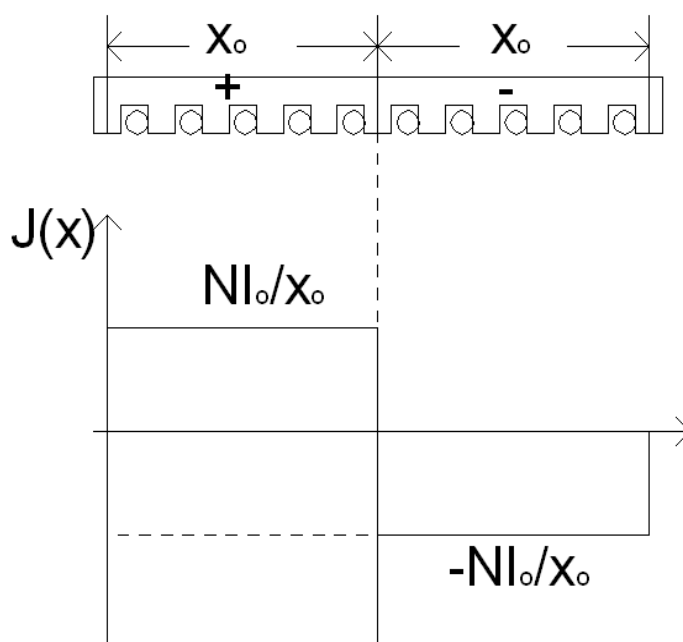
$$L = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left| I(\alpha) \right|^2 \cdot \left(\left| \frac{Z_{ολ}(\alpha)}{\alpha} \right|^2 - \frac{1}{\mu_0^2} \right) \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

Οι δυνάμεις αυτές είναι βεβαίως ανά m του πλάτους της διέγερσης.

4.2.2 EDS ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΕΣ

Αντί υπεραγωγού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρομαγνήτης διότι, η κινούμενη σπείρα, σχετικά με το αγώγιμο φύλλο του δευτερεύοντος, είναι ισοδύναμη με ένα μαγνήτη. Για ευθύγραμμες διατάξεις, η διασπορά του τυλίγματος πραγματοποιείται σε όλο το μήκος του ηλεκτρομαγνήτη.

Η διέγερση του πρωτεύοντος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.2.2.α: Η πυκνότητα ρεύματος $J(x)$ σε σχέση με το πολικό βήμα [12]

Η ισοδύναμη γραμμική πυκνότητα ρεύματος της παραπάνω διέγερσης, για N σύνολο αγωγών τυλίγματος και I_0 ρεύματος αυτών, δίνεται από τη σχέση:

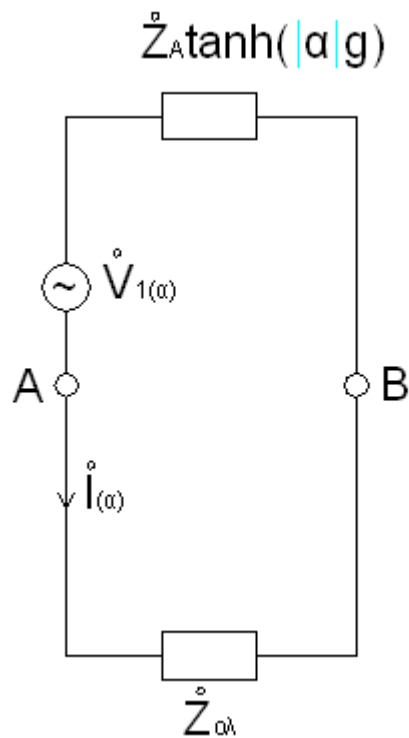
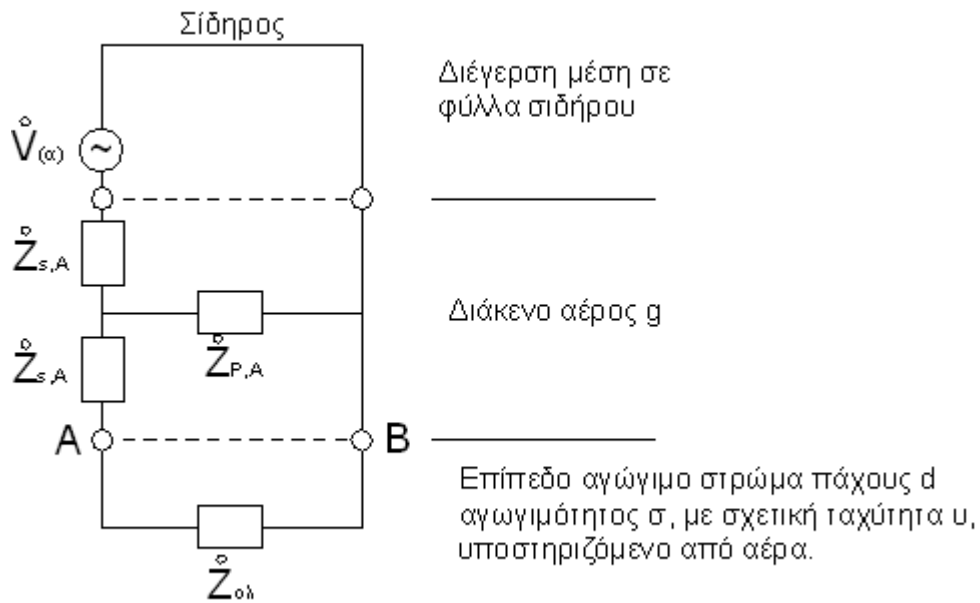
$$J = \frac{N \cdot I_0}{2 \cdot x_0}$$

και είναι αρνητική μετά το μέσο της διάταξης.

Η ισοδύναμη τάση διέγερσης είναι ίση προς:

$$\overset{0}{V}(\alpha) = \alpha \cdot J \cdot \frac{4 \cdot j}{\alpha} \cdot \sin^2\left(a \cdot \frac{x_0}{2}\right) = \frac{4 \cdot N \cdot I_0 \cdot j}{\chi_0} \cdot \sin^2\left(a \cdot \frac{x_0}{2}\right)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης, καθώς και το ισοδύναμο Thevenin αυτού, φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.2.2.b: Το ισοδύναμο κύκλωμα της ηλεκτρομαγνητικής διάταξης, το ισοδύναμο Thevenin καθώς και οι νόμοι-σχέσεις που το διέπουν [12]

Όπου:

$$Z_{\sigma\lambda}^0 = \frac{Z_A^0 + Z_C^0 \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}{1 + \frac{Z_A^0}{Z_C^0} \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}$$

$$V_1(\alpha)^0 = \frac{V(\alpha)^0}{\cosh^2\left(\frac{g \cdot |\alpha|}{2}\right)}$$

$$V_{AB}^0 = I(\alpha)^0 \cdot Z_{\sigma\lambda}^0$$

Συνεπώς καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$I(\alpha)^0 = \frac{V_1(\alpha)^0}{Z_{\sigma\lambda}^0 + Z_A^0 \cdot \tanh(g \cdot |\alpha|)}$$

Οι δυνάμεις L, D ανά m πλάτους πρωτεύοντος, υπολογίζονται από τα παρακάτω ολοκληρώματα:

$$D = \text{Real} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I(\alpha)^0 \cdot V_{AB}^0(\alpha)^*}{\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{2\pi} = \int_{-\infty}^{+\infty} D_1(\alpha) \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

$$L = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{|V_{AB}^0|^2}{\alpha^2} - \frac{|I(\alpha)^0|^2}{\mu_0^2} \right] \cdot \frac{d\alpha}{2\pi} = \int_{-\infty}^{+\infty} L_1(\alpha) \cdot \frac{d\alpha}{2\pi}$$

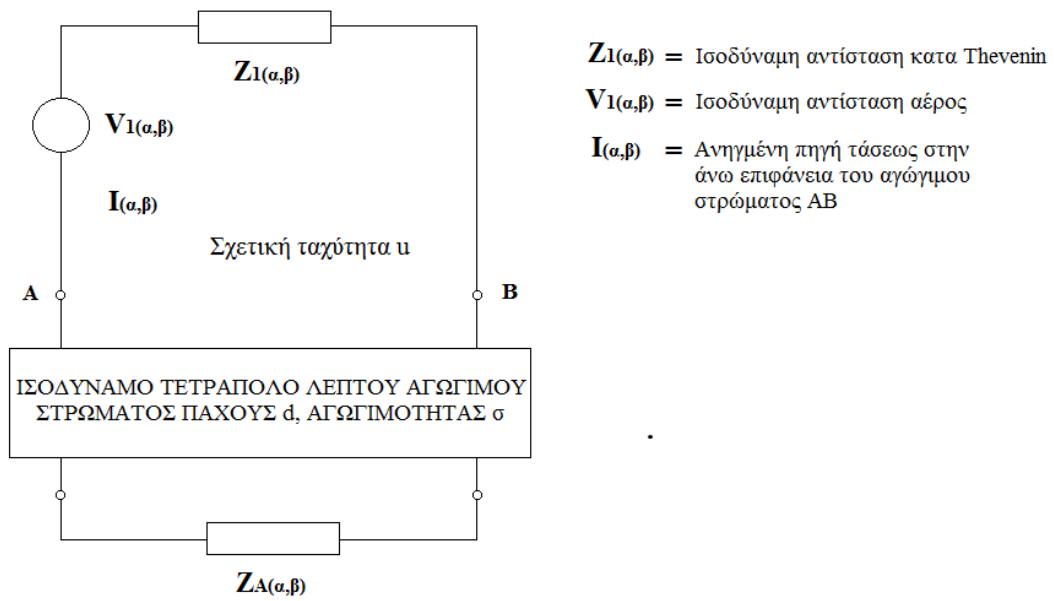
Το EDS σύστημα, μπορεί να λειτουργήσει και, εάν στη θέση των σιδηρομαγνητών τοποθετηθούν μόνιμοι μαγνήτες, σύμφωνα με την διάταξη του παρακάτω σχήματος:



Η διάταξη αυτή, ονομάζεται διάταξη Halbach, έχει την ιδιότητα να δημιουργεί ισχυρό μαγνητικό πεδίο στο κάτω μέρος της και αμελητέο στο πάνω και αποτελείται από 4 κατακόρυφους και 5 οριζόντιους κατ'εναλλαγή διαδοχικούς μόνιμους μαγνήτες.

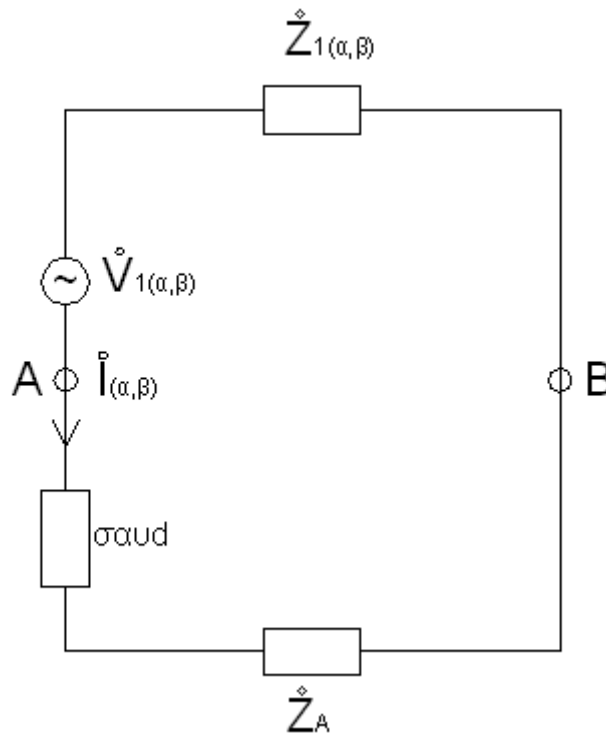
Ο λόγος της δύναμης ανάρτησης προς τη δύναμη ανάσχεσης L/D , είναι, κατά κάποιο τρόπο, μέτρο της ενεργειακής ποιότητας του συστήματος ανάρτησης (L το βάρος του οχήματος και D η ισχύς απωλειών του συστήματος). Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος L/D , τόσο μικρότερη ισχύς καταναλώνεται για τη λειτουργία του συστήματος ανάρτησης.

Αφού όλα τα ηλεκτροδυναμικά συστήματα έχουν κοινά χαρακτηριστικά, καταλήγουμε στην μοντελοποίηση τους στο χώρο Fourier, με το παρακάτω ενοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα:



Σχήμα 4.2.2.c: Το ενοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα [13]

Για μεγάλες ταχύτητες, το ισοδύναμο τετράπολο λεπτού αγωγίμου στρώματος, πάχους d και αγωγιμότητας σ , μπορεί να αντικατασταθεί με αντίσταση $\sigma d \omega' = \sigma d u$. Όποτε, καταλήγουμε στο παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα:



Σχήμα 4.2.2.d: Ισοδύναμο κύκλωμα με αντίσταση $\sigma d u d$ [13]

Σύμφωνα με το παραπάνω κύκλωμα και τις σχέσεις που το χαρακτηρίζουν, εξάγεται ο λόγος L/D ίσος προς:

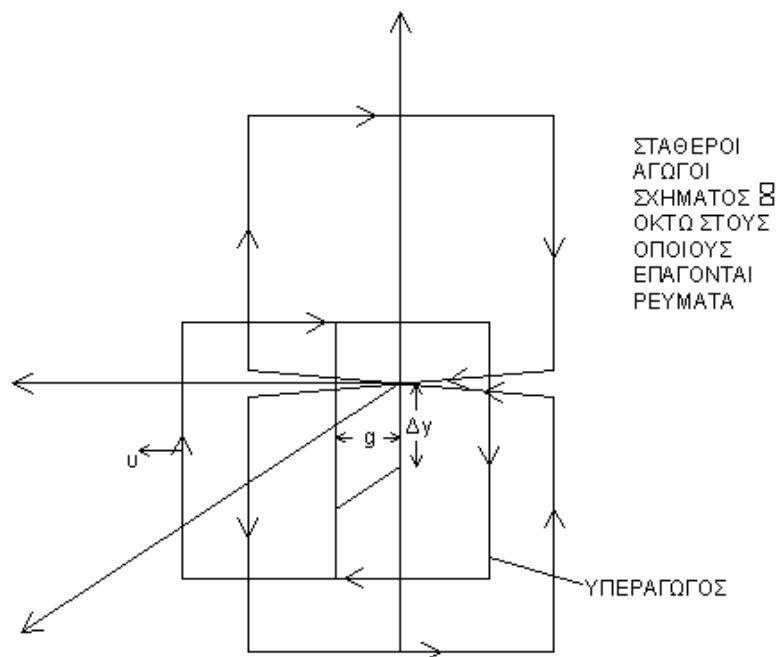
$$\frac{L}{D} = \frac{\mu_0 \cdot \sigma \cdot v \cdot d}{2}$$

όπου αποδεικνύεται ότι είναι και ανεξάρτητος της διέγερσης πρωτεύοντος.

4.2.3 ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ

Οφείλουμε να αναφερθούμε σε ένα, μεμονωμένης χρήσης, σύστημα ανάρτησης, το πλευρικό. Σύμφωνα με αυτό, υπάρχει μια επίπεδη ορθογωνική σπείρα στο πρωτεύον και ένα σύνολο από διπλές ορθογωνικές σπείρες στο δευτερεύον, με απόσταση πρωτεύοντος-δευτερεύοντος ίση με g (διάκενο αέρος).

Το πρωτεύον καθώς κινείται στην κατεύθυνση x με ταχύτητα v , δεν επάγει ρεύμα στο δευτερεύον (λόγω της ειδικής αντισυμμετρίας του συστήματος του δευτερεύοντος), εφόσον οι άξονες συμμετρίας των δύο σπειρών δεν έχουν απόσταση κατά τον άξονα y .



Σχήμα 4.2.3.a: Απεικόνιση πλευρικής ανάρτησης [13]

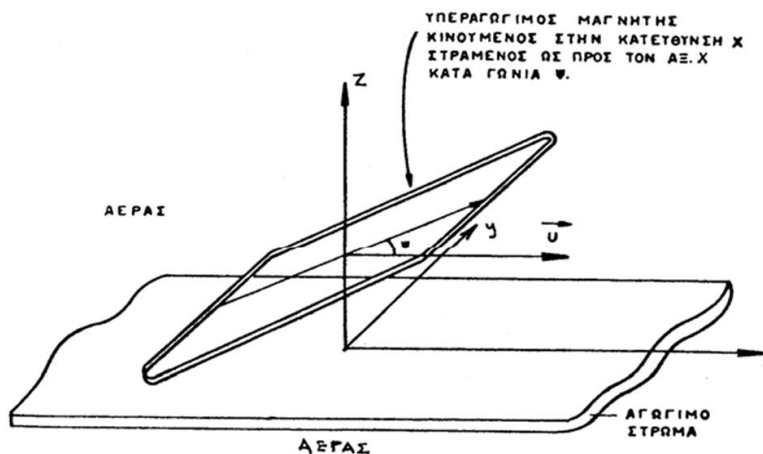
Εάν υπάρξει μικρή σχετικά πλάγια μετακίνηση (Δy στην κατεύθυνση y) τότε δημιουργούνται επαγωγικά ρεύματα στο δευτερεύον τα οποία τείνουν να επαναφέρουν στην αρχική θέση.

Η πλάγια αυτή δύναμη F_y επαναφοράς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δύναμη ανάρτησης και μπορεί να υπολογιστεί με αριθμητικές μεθόδους ανάλογες με αυτές των συστημάτων EDS και EMS.

4.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Το διδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των ευθύγραμμων επαγωγικών συστημάτων, δίδει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα στη μελέτη του ευθύγραμμου επαγωγικού κινητήρα. Το ίδιο ισχύει και για τους υπόλοιπους ευθύγραμμους κινητήρες ωθήσεως, όπως τον σύγχρονο. Εν τούτοις η χρήση του διδιάστατου μοντέλου μελέτης για τα συστήματα ηλεκτροδυναμικής ανάρτησης, δεν δίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αφού συνήθως τα "υπεραγωγίμα" πλαίσια είναι ορθογώνια πεπερασμένου πλάτους, δηλαδή δεν μπορούμε να υποθέσουμε ότι $\partial/\partial y=0$.

Έτσι, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για την ακριβέστερη μελέτη τους διδιάστατους Μ/μους Fourier, εισάγοντας και την μεταβλητή β (κυματαριθμό στην κατεύθυνση y). Τα βασικό τρισδιάστατο μοντέλο της περιπτώσεως αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

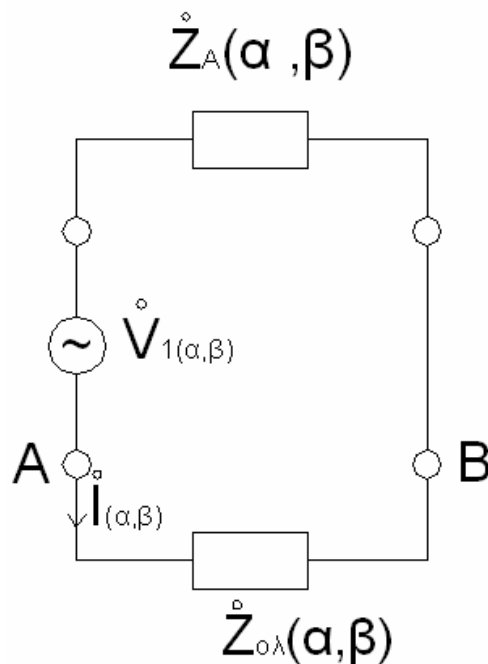


Σχήμα 4.3.a: Τρισδιάστατο μοντέλο συστήματος ανάρτησης [14]

Έστω λοιπόν ότι ένα υπεραγωγίμο πλαίσιο κινείται με ταχύτητα v στην κατεύθυνση x . Το πλαίσιο είναι εν γένει ένας κλειστός ρευματοφόρος αγωγός με ρεύμα I_0 που ορίζεται, κατά προσέγγιση από μια τεθλασμένη πολυγωνική γραμμή οριζόμενη από τα σημεία A_1, A_2, \dots, A_N όπου το σημείο A_k έχει συντεταγμένες (x_k, y_k, z_k) .

Το πλαίσιο βρίσκεται υπεράνω ενός αγώγιμου επίπεδου στρώματος πάχους d και αγωγιμότητας σ , το οποίο εν γένει θεωρείται ότι έχει άπειρες διαστάσεις κατά τους άξονες x και y . Για λόγους απλοποίησης η άνω επιφάνεια του επίπεδου αγώγιμου αυτού στρώματος λαμβάνεται στη θέση $z=0$, άρα $z_k > 0$ για κάθε A_k .

Το ισοδύναμο μοντέλο μελέτης του ηλεκτροδυναμικού αυτού συστήματος στο χώρο των τρισδιάστατων Μ/μών Fourier παραμένει βασικά το ίδιο, με το αυτό του σχήματος 4.2.1.b το οποίο όπως προαναφέρθηκε μετατρέπεται προς το ακόλουθο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος [14]:



Σχήμα 4.3.b: Ισοδύναμο μοντέλο μελέτης του ηλεκτροδυναμικού συστήματος μέσω τρισδιάστατων Μ/μών Fourier [14]

Όπου:

$$Z_{o\lambda}^0 = \frac{Z_A^0 + Z_C^0 \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}{1 + \frac{Z_A^0}{Z_C^0} \cdot \tanh(\gamma \cdot d)}$$

Με:

$$Z_A^0 = \frac{\gamma_A}{j \cdot \mu_0}, \quad \gamma_A = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$$

Και:

$$Z_C^0 = \frac{\gamma}{j \cdot \mu_0}, \quad \gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + j \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot \alpha \cdot v}$$

Άρα:

$$I(\alpha, \beta) = \frac{V_1(\alpha, \beta)}{Z_A^0 + Z_{o\lambda}^0}$$

Και:

$$V(\alpha, \beta) = I(\alpha, \beta) \cdot Z_{o\lambda}^0 = \frac{V_1(\alpha, \beta) \cdot Z_{o\lambda}^0}{Z_A^0 + Z_{o\lambda}^0}$$

4.4 ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΕΣ ΑΓΩΓΙΜΕΣ ΣΠΕΙΡΕΣ

Σε μερικά ηλεκτροδυναμικά απωστικά συστήματα το δευτερεύον αποτελείται από μια σειρά διαδοχικών βραχυκυκλωμένων αγωγίμων σπειρών κατά μήκος της διαδρομής. Το πρωτεύον είναι συνήθως μια σειρά υπεραγωγών επί του σχήματος. Το πρωτεύον με την κίνησή του με ταχύτητα v δημιουργεί επαγωγικά ρεύματα στις βραχυκυκλωμένες αγωγίμες σπείρες του δευτερεύοντος. Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz θα δημιουργούνται μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δυνάμεις των οποίων η δράση θα μπορούσε να εξουδετερώσει το αίτιο της δημιουργίας των επαγωγικών δυνάμεων.

Κατ' αρχάς λοιπόν, δημιουργούνται δυνάμεις ανάσχεσης (D) των οποίων η δράση αντιτίθεται στην ταχύτητα v . Επίσης, θα δημιουργηθούν δυνάμεις ανάρτησης των οποίων η δράση στοχεύει στην απομάκρυνση πρωτεύοντος-δευτερεύοντος ώστε να περιοριστεί η επαγωγική αλληλεπίδρασή τους. Είναι πιθανόν για μια ειδική κατηγορία σπειρών δευτερεύοντος να δημιουργηθούν πλάγιες δυνάμεις (F_y), οι οποίες στοχεύουν να φέρουν σε αντισυμμετρική θέση το πρωτεύον και το δευτερεύον ώστε η μαγνητική ενέργεια του δευτερεύοντος να ελαχιστοποιηθεί (ή να μηδενιστεί). Για τη θεωρητική εξέταση αυτών των συστημάτων πρέπει κατ' αρχήν να μελετηθούν οι δυνάμεις μεταξύ δύο τουλάχιστον τυλιγμάτων (στον κενό χώρο) που διαρρέονται από συνεχές ρεύμα.

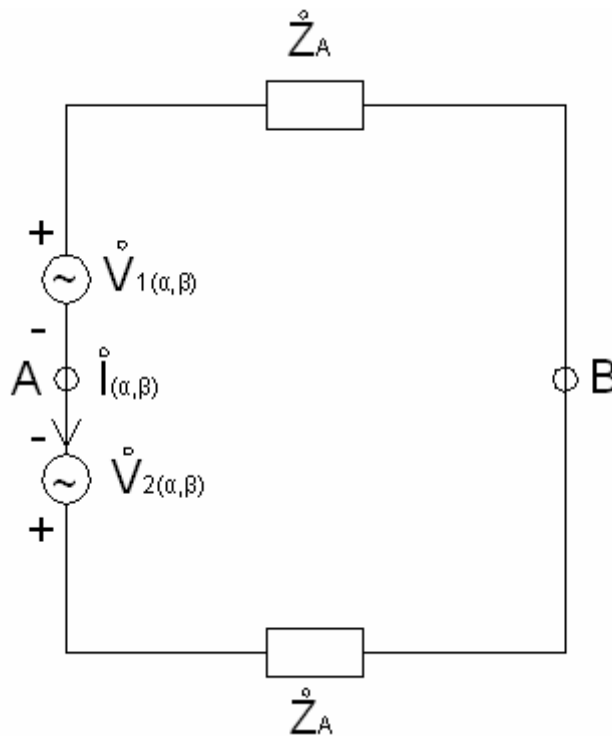
Η μελέτη αυτή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους :

- a. **Με τη μέθοδο του Newman.** Χρησιμοποιώντας τον τύπο που δίνει την αλληλεπαγωγή μεταξύ των δύο τυλιγμάτων (πρωτεύοντος-δευτερεύοντος). Η αλληλεπίδραση δίδεται από το διπλό επικαμπύλιο ολοκλήρωμα :

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\ell_1} \oint_{\ell_2} \frac{d\ell_1 \cdot d\ell_2}{r_{12}}$$

όπου I_1, I_2 οι κλειστοί βρόχοι που περιγράφουν τα τυλίγματα πρωτεύοντος δευτερεύοντος και r_{12} η αντίσταση μεταξύ των dl_1 και dl_2 . Η M μπορεί να προσδιοριστεί αριθμητικά αρκεί να δοθούν οι καμπύλες 1, 2 σαν ένα σύνολο από σημεία με τις συντεταγμένες τους.

- b. Με τη μέθοδο των Μ/μων Fourier.** Το πρωτεύον και το δευτερεύον (κάποια χρονική στιγμή) βρίσκονται σε κάποιες μεταξύ τους θέσεις και μεταξύ τους υπάρχει κάποιο διάκενο αέρος. Σε ένα αυθαίρετο επίπεδο AB που βρίσκεται στο διάκενο μεταξύ πρωτεύοντος - δευτερεύοντος οι δυο διεγέρσεις έχουν ισοδύναμες τάσεις $V_1(\alpha, \beta), V_2(\alpha, \beta)$. Εάν οι δυο διεγέρσεις βρίσκονται στον αέρα το ισοδύναμο κύκλωμα στο χώρο Fourier είναι όπως στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.4.a: Ισοδύναμο κύκλωμα με μετασχηματισμό Fourier [14]

Όπου:

$$Z_A = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{j \cdot \mu_0} = \frac{c}{j \cdot \mu_0}$$

Έτσι προκύπτει ότι:

$${}^0I(a, \beta) = \frac{{}^0V_1(a, \beta) - {}^0V_2(a, \beta)}{2 \cdot Z_A}$$

Επίσης:

$${}^0V(a, \beta) = \frac{{}^0V_2(a, \beta) + {}^0V_1(a, \beta)}{2}$$

Αρα χρησιμοποιώντας τα γνωστά ολοκληρώματα που δίνουν τα $D=F_x$, $L=F_z$ και κατά αναλογία F_y θα είναι τελικά:

$$F_x = \frac{\mu_0}{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha}{c^3} \cdot \text{Jmag}({}^0V_1(a, \beta) \cdot {}^0V_2^*(a, \beta)) \cdot \frac{da \cdot d\beta}{4 \cdot \pi^2}$$

$$F_y = \frac{\mu_0}{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\beta}{c^3} \cdot \text{Jmag}({}^0V_1(a, \beta) \cdot {}^0V_2^*(a, \beta)) \cdot \frac{da \cdot d\beta}{4 \cdot \pi^2}$$

$$F_z = \frac{\mu_0}{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{c^2} \cdot \text{Real}({}^0V_1(a, \beta) \cdot {}^0V_2^*(a, \beta)) \cdot \frac{da \cdot d\beta}{4 \cdot \pi^2}$$

Για τον αριθμητικό υπολογισμό των F_x , F_z , F_y απαιτείται:

- η εύρεση των ισοδύναμων αγώγιμων τάσεων στο επίπεδο AB
- και ο αριθμητικός υπολογισμός των ολοκληρωμάτων

Έτσι η μέθοδος αυτή δεν είναι απλούστερη της μεθόδου Newman. Πλεονεκτεί όμως κατά το ότι εάν ένα τύλιγμα (λ.χ. το τύλιγμα δευτερεύοντος) υποστηρίζεται από σίδηρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την κατάλληλη σχεδίαση του αντίστοιχου ισοδύναμου στο χώρο M/μου Fourier.

Εάν περιοριστούμε στα συστήματα με υπεραγωγούς, που είναι και τα πιο πιθανά υποψήφια συστήματα απωστικής ηλεκτροδυναμικής ανάρτησης, η μέθοδος Newman

είναι πιθανόν να οδηγεί σε ταχύτερους υπολογισμούς και πιο ακριβή αποτελέσματα για τις δυνάμεις . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εάν χωρίσουμε σε σχετικά μικρά τμήματα (N τμήματα, Δl_1), (M τμήματα, Δl_2) τα δύο τυλίγματα που αλληλεπιδρούν. Οι υπολογισμοί των δυνάμεων οδηγούν σε ένα άθροισμα ($M \times N$) όρων και η διαφόριση σε $2 \times M \times N$ όρους. Αντίστοιχα, εάν λόγω μορφολογίας των τυλιγμάτων μπορούν με ικανοποιητική προσέγγιση να διαιρεθούν σε N_1 και M_1 ευθύγραμμα τμήματα, ώστε να υπολογίσουμε τις ισοδύναμες τάσεις τους στο χώρο Fourier, το γινόμενο των τάσεων που εμφανίζεται στα ολοκληρώματα έχει $M_1 \times N_1$ όρους. Επιπλέον, η ολοκλήρωση ως προς α και β απαιτεί ένα σημαντικό αριθμό όρων N_α (για το α) και N_β (για το β), άρα ο υπολογισμός οδηγεί σε ένα άθροισμα ($N_1 \times M_1 \times N_\alpha \times N_\beta$) όρων που σαφώς είναι πολύ περισσότεροι των ($2 \times M \times N$) όρων της μεθόδου Newman. Εάν όμως η τάση είναι γνωστή (π.χ. ορθογωνικά πλαίσια) ενδεχομένως οι όροι $N_\alpha \times N_\beta$, που απαιτούνται για τον αριθμητικό υπολογισμό των δυνάμεων, να είναι λιγότεροι των αντίστοιχων όρων του Newman $2 \times M \times N$.

4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η εφαρμογή των εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τα διαφορά συστήματα ανάρτησης, συμβάλουν στο σχεδιασμό και κατασκευή των επιμέρους στοιχείων των συστημάτων αυτών.

Αρχικά, όσον αφορά ένα Maglev όχημα το οποίο χρησιμοποιεί EMS ανάρτηση, οι απλές εξισώσεις βοηθούν στον καθορισμό του αριθμού των ηλεκτρομαγνητών οι οποίοι απαιτούνται για τη ανάρτηση του οχήματος, η ακόμα και στα δομικά χαρακτηριστικά τους.

Ως παράδειγμα θεωρούμε ότι, κάτω από ένα αγωγίμο φύλλο σιδηρού, σε διάκενο $g=1\text{cm}$ και στα πλαϊνά του οχήματος είναι τοποθετημένοι n ηλεκτρομαγνήτες $N=100$ σπειρών με επιφάνεια προσβολής(ως προς το αγωγίμο φύλλο) που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$2(b_1 \times b_2) = 2(0,2 \times 0,2) = 0,08 \text{cm}^2$$

Όπου:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$$B_{\text{oper}} = 0,87 \text{ T}$$

$$\beta = 300000 \text{ Nt}$$

Η δύναμη ανάρτησης L , ως γνωστόν, δίνεται από τον τύπο:

$$L = \frac{1}{2\mu_0} B^2 S$$

όπου S η συνολική επιφάνεια προσβολής και το μαγνητικό πεδίο δίνεται από τον τύπο:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2g}$$

$2g$ το συνολικό μήκος διακένου ανάμεσα στον ηλεκτρομαγνήτη και το αγώγιμο φύλλο, όπου I το ρεύμα του ηλεκτρομαγνήτη.

Αντικαθιστώντας το B με B_{oper} και εξισώνοντας την L με β ($L=\beta$), έχουμε ότι $S=1\text{m}^2$ και $NI=14000$ αμπερελιγματα. Το πλήθος των ηλεκτρομαγνητών του οχήματος λαμβάνεται από την $2n(b_1 \times b_2)=S$ και είναι $n=12$ (6 ανά πλευρά).

Είναι φανερό ότι, αλλάζοντας τη γεωμετρία ή την ισχύ των ηλεκτρομαγνητών, καταφέρνουμε τη βέλτιστη προσέγγιση σε διάφορες τεχνοοικονομικές απαιτήσεις.

Όσον αφορά τα συστήματα με EDS (απωστική) ανάρτηση, το βασικό και θεμέλιο μέγεθος για τον υπολογισμό των επιμέρους μεταβλητών, είναι η δύναμη L . Τα συστήματα σχεδιάζονται ώστε η L να είναι πάντα ίση με το βάρος του οχήματος. Οι εξισώσεις που διέπουν ένα EDS, είτε αυτό αποτελείται από υπεραγωγούς ή από ηλεκτρομαγνήτες, είναι πολύπλοκες. Αναλυτική παρουσίαση ενδεικτικού παραδείγματος είναι αδόκιμη χωρίς τη χρήση υπολογιστικού συστήματος. Ανατρέχοντας παρόλα ταύτα, στα αντίστοιχα εδάφια και τις εξισώσεις, είναι φανερό ότι, από την εξίσωση της δύναμης ανάρτησης L , εξάγεται το ρεύμα των

υπεραγώγιμων ορθογώνιων πλαισίων ή των ηλεκτρομαγνητών και κατά συνέπεια όλων των υπόλοιπων μεγεθών του συστήματος. Με βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών, μπορούμε να δομήσουμε ένα EDS-κατά προτίμηση- με τη βέλτιστη οικονομοτεχνική κατασκευή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Maglev PROJECTS-

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΧΜΗΣ

5.1 Maglev PROJECTS ANA ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Linimo (Γραμμή Tobu Kyuryo)

Το πρώτο παγκόσμιο εμπορικό αυτοματοποιημένο “Urban Maglev” σύστημα, άρχισε να λειτουργεί τον Μάρτιο του 2005 στο Aichi της Ιαπωνίας. Αυτό είναι η εννέα σταθμών, 8,9km Tobu-Kyuryo γραμμή, γνωστή και ως Linimo. Η γραμμή διαθέτει μια ελάχιστη ακτίνα λειτουργίας 75m, μέγιστη κλίση 6% και μέγιστη ταχύτητα 100 km/h. Η γραμμή εξυπηρετεί την τοπική κοινότητα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Expro 2005. Τα τρένα σχεδιάστηκαν στον Chubu HSST Development Corporation, ο οποίος λειτουργεί ως πίστα δοκιμών στη Nagoya. Η κορεατική Maglev εμπορική εκδοχή Rotem(βασισμένη στο HSST) στην Daejeon έχει μόλις ξεκινήσει τη λειτουργία της (Απρίλιος 2007).

Shanghai Maglev (Κίνα)

Το πρώτο λειτουργικό υπερταχές συμβατικό Maglev σύστημα, κατασκευάστηκε από την Transrapid, και είναι το Shanghai Maglev τρένο, από το κέντρο της Σαγκάης έως το νέο αεροδρόμιο στο Pudong. Εγκαινιάστηκε το 2002. η υψηλότερη ταχύτητα που επιτυγχάνεται στη διαδρομή της Σαγκάης είναι 501 km/h, κατά μήκος διαδρομής 30km. Το τρένο είναι βασισμένο στην τεχνολογία EMS της Transrapid. Η διαδρομή αναμένεται να επεκταθεί στα 160km πριν από το 2010. η τεχνολογία, την οποία απέκτησε η Κίνα λόγω της χρήσης του Transrapid, οδήγησε στη δημιουργία δικών της ερευνητικών προγραμμάτων, φιλοδοξώντας να κατασκευάσει καλύτερα και φθηνότερα τρένα από τη Γερμανία ή την Ιαπωνία.

Πρόγραμμα UMTD FTA

Στις Η.Π.Α, το FTA Urban Maglev Demonstration πρόγραμμα, έχει χρηματοδοτήσει το σχεδιασμό αρκετών αστικών -χαμηλής ταχύτητας- Maglev

προγραμμάτων επίδειξης. Έχει αξιολογήσει το HSST για το Maryland Department of Transportation και το Maglev σύστημα για το Colorado Department of Transportation. Το FTA, έχει χρηματοδοτήσει επίσης, τις εργασίες του General Atomics του California University of Pennsylvania για την ανάδειξη νέων Maglev σχεδίων, το MagneMotion M και το EDS Maglev σύστημα του Maglev 2000 της Φλόριδας. Άλλα αστικά Maglev συστήματα, τα οποία έχουν παρουσιαστεί στις Η.Π.Α, είναι το LEVX στην Ουάσινγκτον και το Magplane στην Μασαχουσέτη.

Old Dominion University (υπό κατασκευή)

Μια διαδρομή, μικρότερη του ενός μιλίου, έχει κατασκευαστεί στο Old Dominion University του Norfolk της Βιρτζίνια. Το σύστημα δεν λειτουργεί, διεξάγεται όμως έρευνα για την επίλυση προβλημάτων σταθερότητας του συστήματος. Αυτό το σύστημα, χρησιμοποιεί ένα «έξυπνο» τρένο, «αθόρυβης» διαδρομής, το οποίο περιλαμβάνει τους περισσότερους αισθητήρες, μαγνήτες και υπολογιστικά συστήματα επί του οχήματος και όχι στο διάδρομο. Το κόστος αυτού είναι το ελάχιστο από αυτό των υπαρχόντων συστημάτων [15].

5.2 ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΣΧΕΔΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

Bechtel SCD

Το σχέδιο Bechtel είναι ένα καινοτόμο, αναστολής ροής ηλεκτροδυναμικής ανάρτησης (EDS), σύστημα. Το όχημα, περιλαμβάνει έξι σετ των οχτώ υπεραγωγίων μαγνητών σε κάθε πλευρά, τα οποία ενσωματώνονται σε ένα συγκεκριμένο box-beam διάδρομο. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μαγνητών του οχήματος και μιας, τοποθετημένης ανά-στρώματα, σκάλας αργιλίου, σε κάθε πλευρά του διαδρόμου, παράγει ανύψωση. Παρόμοια αλληλεπίδραση, με τα τυλίγματα μηδενικής ροής, προσαρτημένα στο διάδρομο, παρέχει δυνατότητα οδήγησης. Τα τυλίγματα της LSM προώθησης, ενσωματώνονται επίσης στις πλευρές του διαδρόμου, αλληλεπιδρώντας με τους, ιδίου τύπου, μαγνήτες του οχήματος για την παραγωγή ώθησης. Κεντρικά ελεγχόμενοι σταθμοί στο πλάι του διαδρόμου, παρέχουν το απαραίτητο εύρος συχνοτήτων και τάσης, για την

παραγωγή ισχύος στον LSM. Το όχημα, αποτελείται από ένα ενιαίο βαγόνι με ένα εσωτερικό στρεφόμενο μέλος. Χρησιμοποιεί αεροδυναμικό έλεγχο των επιφανειών για να αυξήσει τις μαγνητικές δυνάμεις οδήγησης. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, καταλήγει επάνω σε αερόσακους. Ο διάδρομος, αποτελείται από μια δοκό κιβωτίων (από σκυρόδεμα). Εξαιτίας των υψηλών μαγνητικών πεδίων, είναι απαραίτητη η χρήση μη-μαγνητικών, ενισχυμένων με ίνες πλαστικού (FRP), ράβδων στο εξωτερικό μέρος της δοκού κιβωτίων. Το σύστημα αλλαγής πορείας, αποτελείται από ευλύγιστα κιβώτια, κατασκευασμένα εξ'ολοκλήρου από FRP.

Foster - Miller SCD

Το Foster-Miller σχέδιο, είναι ένα EDS σύστημα, σε γενικές γραμμές παρόμοιο με το ιαπωνικό MLU002. Υπεραγώγιμοι μαγνήτες στο όχημα, παράγουν άνοση από την αλληλεπίδραση τυλιγμάτων ανάρτησης μηδενικής ροής (null-flux), τοποθετημένα στα τοιχώματα ενός U-σχήματος διαδρόμου. Παρόμοια αλληλεπίδραση, με σειρές ζευγών μαγνητών, χρησιμοποιείται για την οδήγηση του οχήματος. Διαθέτει καινοτόμο σύστημα ώθησης, το Local commutated LSM. Ξεχωριστοί αναστροφείς Hall-γέφυρας, ενεργοποιούν διαδοχικά τα σπειρώματα προώθησης, καθώς ευθυγραμμίζονται με τους μαγνήτες του οχήματος. Οι αναστροφείς συνθέτουν ένα κύμα, το οποίο κινείται κατά μήκος του διαδρόμου, σύγχρονα με το όχημα. Το όχημα, αποτελείται από ενότητες επιβατών, συνδεδεμένες με εξαρτήματα διασύνδεσης, ώστε να δημιουργήσουν μια ενιαία μονάδα. Αυτές οι ενότητες, διαθέτουν βαγονέτα μαγνητών, στις άκρες που μοιράζονται με τις παρακείμενες ενότητες. Κάθε βαγονέτο διαθέτει τέσσερις μαγνήτες ανά πλευρά. Ο U-σχήματος διάδρομος, αποτελείται από δυο παράλληλες διακριτές λωρίδες, οι οποίες ενώνονται εγκάρσια από προκατασκευασμένα διακριτά διαφράγματα. Λόγω των υψηλών μαγνητικών πεδίων, οι εξωτερικές ράβδοι είναι κατασκευασμένες από FRP. Ο διακόπτης, χρησιμοποιεί τυλίγματα μηδενικής ροής και δεν απαιτεί κινούμενα δομικά μέλη.

Grumman SCD

Το σχέδιο Grumman είναι ένα EMS σύστημα, το οποίο παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το Transrapid 07. Τα οχήματα του Grumman, όμως, εφαρμόζονται

γύρω από ένα T-σχήματος διάδρομο και χρησιμοποιούν μόνο ένα σετ μαγνητών οχήματος και διαδρόμου για την ανάρτηση, οδήγηση και πρόωση. Οι μαγνήτες του οχήματος είναι υπεραγώγιμα τυλίγματα γύρω από ένα σίδηρο πεταλοειδή πυρήνα. Τα «πόδια» του οχήματος έλκονται από σιδερένιες ράγες, οι οποίες βρίσκονται στο κάτω μέρος του διαδρόμου. Συνήθη τυλίγματα σε κάθε σκέλος σίδηρού-πυρήνα, παράγουν δυνάμεις ανάρτησης και οδήγησης, ούτως ώστε να διατηρήσουν ένα μεγάλο διάκενο αέρα (40mm). Δεν απαιτείται δευτερεύουσα ανάρτηση. Η πρόωση παρέχεται από συνήθη LSM, τοποθετημένο στο διάδρομο-ράγα. Τα οχήματα διαθέτουν ικανότητα κλίσης και μπορούν να είναι μόνο-βάγονα ή πολύ-βάγονα, με μαγνήτες τοποθετημένους σε όλο το μήκος του οχήματος. Η καινοτόμα δομή του διαδρόμου, αποτελείται από λεπτά Y-σχήματος τμήματα διαδρόμου (ένα για κάθε κατεύθυνση), αναρτημένα σε ζυγοστάτες κάθε 4,5m, σε μια ενιαία σπονδυλωτή δοκό 27m. Η αλλαγή πορείας επιτυγχάνεται με μια TR07-τύπου ευλύγιστη ακτίνα στο διάδρομο, η οποία περιορίζεται (κατά μήκος) με τη χρήση ενός τμήματος ολίσθησης ή περιστροφής.

Magneplane SCD

Το Magneplane σχέδιο, είναι ένα ενιαίο όχημα EDS, χρησιμοποιώντας έναν, τύπου αύλακα, διάδρομο, αποτελούμενο από φύλλα αλουμινίου για την ανάρτηση και την οδήγηση. Φυγοκεντρικές δυνάμεις διατηρούν το Magneplane στην τροχιά του στις στροφές. Υπεραγώγιμοι μαγνήτες ανάρτησης και οδήγησης, είναι τοποθετημένοι στο εμπρόσθιο και οπίσθιο μέρος του οχήματος. Οι κεντρικοί μαγνήτες, αλληλεπιδρούν με τα τυλίγματα ενός συμβατικού LSM για την παραγωγή πρόωσης και ορισμένων δυνάμεων οδήγησης. Οι μαγνήτες στις πλευρές του οχήματος, απωθούνται με τα φύλλα αλουμινίου του διαδρόμου, για να παρέχουν την αναγκαία άνωση. Το όχημα, χρησιμοποιεί αεροδυναμικές επιφάνειες ελέγχου και έλεγχο φάσης του LSM, ούτως ώστε να παράγεται ενεργός απόσβεση των κινήσεων του. Τα, υπεύθυνα για την ανάρτηση, φύλλα αλουμινίου του διαδρόμου, διαμορφώνουν τις κορυφές ενός αύλακα αλουμινίου. Αυτές οι κορυφές στηρίζονται άμεσα στις αποβάθρες. Ο διακόπτης υψηλών ταχυτήτων, χρησιμοποιεί τυλίγματα μηδενικής ροής, για την οδήγηση του οχήματος, μέσω ενός «δίκρανου» σημείου του διαδρόμου, και δεν απαιτεί κανένα κινούμενο δομικό μέλος.

Short-stator LIM

Το LIM σύστημα, διαθέτει το (ενεργό) πρωτεύον του κινητήρα στο όχημα(μικρού μήκους στάτης τυλιγμάτων) και το (παθητικό) δευτερεύον του στο διάδρομο-ράγα(τυπικά κατασκευασμένο από σίδηρο). Το όχημα, πρέπει να αντλήσει ισχύ πρόωσης από το διάδρομο και να την ρυθμίσει on-board. Κινητήρες τέτοιου τύπου, κρίνονται ικανοποιητικοί στις χαμηλές ταχύτητες.

Πλεονεκτήματα

- α) Μικρότερο κόστος επένδυσης διαδρόμων.
- β) Απλούστερη, φθηνότερη παροχή ισχύος στα τοιχώματα του συστήματος, διότι η όλη μετατροπή πραγματοποιείται στο όχημα.
- γ) Ικανότητα αύξησης της χωρητικότητας, προσθέτοντας επιπλέον βαγόνια στο συρμό, χωρίς την αλλαγή των προδιαγραφών του διαδρόμου (σε δοκιμαστικό ακόμα στάδιο).

Μειονεκτήματα

- α) Ακριβότερα και βαρύτερα οχήματα, εξαιτίας του on-board στάτη και του εξοπλισμού μετατροπής της ισχύος.
- β) Απαιτείται εκτεταμένη έρευνα και ανάπτυξη για τη δημιουργία, οικονομικά αποδοτικού πολύ-συστήματος παροχής MW ισχύος στα 134m/s. Είναι σχεδόν απίθανο, η αλυσωτή-παντογραφική μεταφορά ισχύος, να αποδώσει ικανοποιητικά σε αυτές τις υψηλές ταχύτητες.

Άλλοι LSM

Υπάρχουν διάφοροι πειραματικοί ευθύγραμμοι κινητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούν παθητικό δευτερεύον. Τα δευτερεύοντα είναι τυπικά, κατασκευασμένα από σίδηρο και ενσωματώνονται στο όχημα, ούτως ώστε να εξαλείψουν τους περιορισμούς της τεχνολογίας μεταφοράς μεγάλης ισχύος. Τέτοιοι κινητήρες είναι οι ομοπολικό LSMs και οι LSMs εγκάρσιας ροής («μαγνητικό ποτάμι» κατά την ευρωπαϊκή

βιβλιογραφία). Καθένα από αυτά τα σχέδια, έχει παρουσιάσει μετά από πειραματικές μελέτες, ιδιαίτερες δυνατότητες παραγωγής ώθησης, ανάρτησης και πλευρικής οδήγησης. Ελκυστικοί, εξαιτίας της απλότητας τους έναντι του συμβατικού air-core LSM, αυτοί οι κινητήρες προστάζουν την ανάγκη έρευνας και ανάπτυξης, για τον καθορισμό του κόστους και της απόδοσης τους, εν συγκρίσει με τους συμβατικούς LSMs [15].

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Τα σιδηροδρομικά συστήματα, τα οποία βασίζονται στην τεχνολογία της μαγνητικής πρόωσης και ανάρτησης (Maglev) βρίσκονται πια στον ορίζοντα. Έχουν αποδείξει ότι είναι γρηγορότερα από τα παραδοσιακά σιδηροδρομικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν μεταλλικούς τροχούς και ράγες. Η χαμηλή συντήρηση των Maglev συστημάτων, είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, το οποίο επίσης πρέπει να αξιολογηθεί θετικά. Εφόσον δεν έχει να αντιμετωπιστεί το θέμα της τριβής και φθοράς λόγω επαφής, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μακροζωία για το όχημα. Εξοικονομούμενη ενέργεια, λόγω της μη χρήσης μηχανών εσωτερικής καύσης, επιτρέπει μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα και φιλικότερη περιβαλλοντική συμπεριφορά. Η χρήση υπεραγωγικών μαγνητών αντί υγρών καυσίμων, δεν επιτρέπει την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Τα οχήματα Maglev, είναι μικρά, σε σχέση με αυτά των συμβατικών συστημάτων, και δεν συμβάλλουν στην αλλοίωση της τοπογραφίας.

Σε γενικές γραμμές, η δυνατότητα εφαρμογής και η γενική αποδοχή, των συστημάτων Maglev, κρίνεται πολύ θετική. Ακόμα και αν, τα σχετικά κόστη κατασκευής Maglev τρένων παραμένουν υψηλά, υπάρχουν τόσοι άλλοι θετικοί παράγοντες που ισοσκελίζουν αυτό το μειονέκτημα. Τα Maglev συστήματα, θα συνεισφέρουν περισσότερο σε κοινωνικό επίπεδο και θα βοηθήσουν τον πλανήτη μας, ο οποίος αργοπεθαίνει. Συλλογιζόμενοι όλα τα θετικά, τα οποία έχει τη δυνατότητα να προσφέρει αυτή η τεχνολογία, η μεταφορά του μέλλοντος και των παιδιών μας, βρίσκεται σε πολύ ικανή και ασφαλή «τροχιά».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μαρία Γ. Ιωαννίδου, ‘Συστήματα Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών’, ΕΜΠ, Αθήνα 2003.
- [2] Αθανάσιος Ν. Σαφάκας «Δυναμική Ηλεκτρομηχανικών Συστημάτων», Πανεπιστήμιο Πατρών, 1984.
- [3] Goodall, R. M., (1976) “Suspension and guidance control system for a DC attraction Maglev vehicle”, IEE Conf Publication No 142, pp 100-103, 1976.
- [4] Χρήστος Δ. Παπαγεωργίου, Ευθύγραμμοι Κινητήρες.
- [5] Γ.Δ. Λιάλιος, Ευθύγραμμοι Κινητήρες σε Ηλεκτρομαγνητικά Τρένα, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2011.
- [6] Ν.Γ. Παπαμακάριος, Transrapid Ηλεκτρομαγνητική Ανάρτηση και Ευθύγραμμοι Κινητήρες στην Υπηρεσία των Μεταφορών, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2011.
- [7] Α. Μανούδης, Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ψηφιακού Ελεγκτή για Σύγχρονο Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη Γραμμικής Κίνησης, Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη 2009.
- [8] Hyung-Woo Lee, Chan-Bae Park, Byung-Song Lee, Thrust Performance Improvement of a Linear Induction Motor, Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 6, 2011.
- [9] N. Ahmadinia, The Linear Induction Motor (LIM) & Single Linear Induction Motor (SLIM), American Journal of Electrical Power and Energy Systems. Vol. 3, 2014.
- [10] Liu, C. T., Chiang, T. S., & Horng, A. (2004b). Three-dimensional force analyses of an axial flow radial-flux permanent magnet motor with magnetic suspension. *IEEE/IAS 39th Annual Meeting*, Weatin Hotel, Seattle, Washington, USA.
- [11] B. V. Jayawant, Review Lecture, “Electromagnetic Suspension and Levitation Techniques”, Proc. R. Soc. Lond. A 416, 245-320, 1988.

- [12] Qinghua Han, "Analysis and Modeling the EDS Maglev system based on the halbach permanent magnet array", Dissertation, Univ. of Central Florida, summer 2004.
- [13] D. L. Atherton, A. R. Eastham, and K. Sturgess, "Passive secondary magnetic damping for superconducting Maglev vehicles", *Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 10, October 1976, pp. 4643-4648.
- [14] Liu, C. T., Chiang, T. S., & Horng, A. (2004a). Three-dimensional flux analysis and guidance path design of an axial-flow radial-flux permanent magnet motor. The Eleventh Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Sheraton Grande Walkerhill Hotel, Seoul, Korea.
- [15] Transrapid International's Maglev by Philip Ross. *IEEE Spectrum*, June 1, 2012. Exploring Transrapid's progress on the Shanghai Maglev (the world's only high-speed Maglev railway).
- [16] Yaghoubi, H. & Rezvani, M. A. (2011). Development of Maglev guideway loading model. *ASCE, Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137, No. 3, pp. 201-213.
- [17] Yaghoubi, H. & Ziari, H. (2010). Assessment of structural analysis and design principles for Maglev guideway: a case-study for implementing low speed Maglev systems in Iran. *The 1st International Conference on Railway Engineering, High-speed Railway, Heavy Haul Railway and Urban Rail Transit*, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, China Railway Publishing House, pp. 15-23, ISBN 978-7-113-11751-1.
- [18] U. Henning, R. Hellinger, J. Nothhaft, The TRANSRAPID Propulsion System – Results of operation, 16th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro 2000, pp. 269-274.
- [19] R. Hellinger, T. Mazur, J. Nothhaft, Stationary Componentes of the Long-Stator Propulsion System for High-Speed Maglev Systems, *Revue de l'électricité et de l'électron.* No. 9/98, pp. 57-66.

- [20] M. Engel, U. Henning, R. Hellinger, J. Nothhaft, Advanced Converter and Control Components for the High-Speed TRANSRAPID Drive System , 1st International Conference on Railway Traction Systems, 15.-17.05.2001, Capri 2000, proceedings Volume 2, pp. 107-122.
- [21] Cremer R., 1988, "Current-Status of Rare Earth Permanent Magnets". Tenth International Conference on Magnetically Levitated Systems (Maglev) 391-399.
- [22] Hull, J. R., Fiske, J., Ricci, K. & Ricci, M. (2006). Analysis of levitational systems for a superconducting launch ring. *Applied Superconductivity Conference*, Seattle, WA.
- [23] Paschall II, S. C. (2002). Design, fabrication, and control of a single actuator magnetic levitation system. *Senior Honors Thesis, Dept. Mech. Eng., Texas A&M Univ.*