

2

Σιδηροδρομικά Συστήματα Έλξης

2.1. Εισαγωγή

Κινητήρια μονάδα (*locomotive*) ονομάζεται κάθε είδους αυτοκινούμενο (*self-propelled*) όχημα, που χρησιμοποιείται για να κινεί σιδηροδρομικά βαγόνια πάνω στις γραμμές.

Παρότι η κινητήρια δύναμη μπορεί να ενσωματωθεί σε οχήματα, στα οποία υπάρχει επίσης χώρος για επιβάτες, αποσκευές ή εμπορεύματα, συνήθως αυτή παρέχεται από την ξεχωριστή κινητήρια μονάδα (*locomotive*), η οποία περιλαμβάνει τους μηχανισμούς για τη δημιουργία ισχύος (ή, στην περίπτωση της ηλεκτράμαξας, για τη μετατροπή της) και τη μετάδοση της ισχύος στους κινητήριους τροχούς.

Στις μέρες μας υπάρχουν δύο κύριες πηγές ισχύος μιας κινητήριας μονάδας:

- (α) το πετρέλαιο (με τη μορφή του καυσίμου ντήζελ) και
- (β) ο ηλεκτρισμός.

Ο ατμός, η παλαιότερη μορφή προώθησης, βρισκόταν σε παγκόσμια χρήση μέχρι περίπου τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο.

Έκτοτε έχει υποκατασταθεί από τις αποδοτικότερες μορφές της ντηζελοκίνητης και ηλεκτροκίνητης έλξης.

- Η **ατμάμαξα** (*steam locomotive*) αποτελεί αυτάρκη μονάδα, που φέρει το φορτίο νερού για την παραγωγή του ατμού, καθώς και κάρβουνο, πετρέλαιο ή ξυλεία, για τη θέρμανση του βραστήρα.
- Η **ντηζελάμαξα** (*diesel locomotive*) φέρει επίσης το φορτίο καυσίμου, αλλά το προϊόν του ντηζελοκινητήρα δεν μπορεί να μεταβιβαστεί απευθείας στους τροχούς.

Αντιθέτως, πρέπει να χρησιμοποιηθεί σύστημα μηχανικής, ηλεκτρικής ή υδραυλικής μετάδοσης.

- Η **ηλεκτράμαξα** (*electric locomotive*) δεν είναι αυτάρκης.

Παίρνει ρεύμα από εναέριο καλώδιο ή τρίτη σιδηροτροχιά, που τρέχει παράλληλα με τις δύο κατευθυντήριες.

Η τροφοδοσία με τρίτη σιδηροτροχιά (*third-rail supply*) χρησιμοποιείται μόνο σε αστικά σιδηροδρομικά συστήματα, που λειτουργούν με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης.

2.2. Ατμοκίνητη Έλξη

Ο πολυσωλήνιος βραστήρας και το σύστημα απαγωγής του ατμού, τα βασικά χαρακτηριστικά που κατέστησαν πετυχημένη την ατμομηχανή *Rocket* των *George* και *Robert Stephenson* το 1829, συνέχισαν να χρησιμοποιούνται στην ατμάμαξα (*steam locomotive*) μέχρι το τέλος της σταδιοδρομίας της.

Η *Rocket* είχε μόνο δύο κινητήριους τροχούς. Σύντομα ο αριθμός των κινητηρίων τροχών άρχισε να αυξάνει. Τέσσερις αποτελούσαν συνήθη εφαρμογή, ενώ μερικές ατμάμαξες κατασκευάστηκαν με δεκατέσσερις κινητήριους τροχούς.

Οι κινητήριοι τροχοί των ατμαμαξών είχαν διάφορα μεγέθη, συνήθως μεγαλύτερα στις γρήγορες ατμάμαξες επιβατικών υπηρεσιών.

Κατά μέσο όρο, η διάμετρος των κινητηρίων τροχών των ατμαμαξών επιβατικών υπηρεσιών ήταν της τάξης των 1,8 – 2,0 μέτρων, ενώ των ατμαμαξών εμπορευματικής ή μικτής υπηρεσίας της τάξης των 1,35-1,65 μέτρων.

Το καύσιμο (συνήθως κάρβουνο, αλλά μερικές φορές και πετρέλαιο) και το νερό μπορούσαν να μεταφέρονται είτε στο ίδιο το πλαίσιο της ατμομηχανής ή και σε χωριστό όχημα, το εφοδιοφόρο (*tender*), συζευγμένο με την ατμομηχανή.

Το εφοδιοφόρο μιας τυπικής Ευρωπαϊκής ατμάμαξας είχε χωρητικότητα 10 τόνων (9.000 κιλών) κάρβουνου και 8.000 γαλονιών (30.000 λίτρων) νερού.

Στη Σοβιετική Ένωση, τη Βόρεια Αμερική και μερικά συστήματα στην Αφρική, την Ασία και την Αυστραλία, μεγαλύτερες χωρητικότητες ήσαν συνήθεις.

Σε ορισμένες χώρες, ιδιαίτερα τις ΗΠΑ, για να αντιμετωπιστούν ειδικές ανάγκες μεγάλων φορτίων εμπορευματικών μεταφορών, χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη ελκτική ισχύς, με τη χρήση δύο ξεχωριστών ατμαμαξών με κοινό καυστήρα.

Η μπροστινή μηχανή ήταν συνδεδεμένη αρθρωτά με το πλαίσιο της οπίσθιας, έτσι ώστε η μεγάλη αυτή κινητήρια μονάδα να μπορεί να εγγράφεται στις καμπύλες της γραμμής.

Η **αρθρωτή** (*articulated*) ατμάμαξα απετέλεσε αρχικώς Ελβετική ανακάλυψη. Η πρώτη του είδους κατασκευάστηκε το 1888.

Η μεγαλύτερη αρθρωτή ατμάμαξα που κατασκευάστηκε ποτέ ήταν η *Big Boy* των σιδηροδρόμων *Union Pacific*, που χρησιμοποιήθηκε σε ορεινές εμπορευματικές μεταφορές στις δυτικές ΗΠΑ.

Η *Big Boy* ζύγιζε περισσότερους από 600 τόνους, περιλαμβανομένου και του εφοδιοφόρου. Ανέπτυξε ισχύ μεγαλύτερη των 6.000 ίππων σε ταχύτητα 110 χλμ/ώρα.

Μια από τις γνωστότερες αρθρωτές ατμάμαξες ήταν η *Beyer-Garratt*. Είχε δύο πλαίσια, καθένα με τους δικούς του κινητήριους τροχούς και κυλίνδρους, φέροντα τις υδατοδεξαμενές. Μεταξύ των παραπάνω δύο πλαισίων υπήρχε ένα τρίτο, φέρον τον βραστήρα, τον θάλαμο μηχανοδότησης και τα καύσιμα. Αυτός ο τύπος ατμάμαξας ήταν πολύτιμος σε γραμμές με φτωχά χαρακτηριστικά χάραξης, επειδή μπορούσε να εγγράφεται σε μικρές ακτίνες καμπυλότητας. Για τον λόγο αυτόν, χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην Αφρική.

Διάφορες τεχνολογικές εξελίξεις βελτίωναν βαθμιαίως την ατμάμαξα. Στις εξελίξεις αυτές περιλαμβάνονταν:

- Μεγαλύτερες πιέσεις στον βραστήρα,
- Υπερθέρμανση,
- Προθέρμανση ύδατος τροφοδοσίας,
- Χρήση κατακόρυφων βαλβίδων.

Παρ' όλ' αυτά, η θερμική αποδοτικότητα ακόμη και των τελευταίων ατμάμαξών σπανίως ξεπερνούσε το 6 %.

Η ατελής καύση, καθώς και οι απώλειες θερμότητας από τον καυστήρα, τον λέβητα, τους κυλίνδρους και αλλού, σπαταλούσαν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του καυσίμου.

Για τον λόγο αυτόν, η ατμάμαξα εγκαταλείφθηκε, σταδιακά όμως, επειδή παρουσίαζε επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η τεχνική της απλότητα και η ικανότητα να αντιστέκεται στην κακομεταχείριση.

2.3. Ντηζελοκίνητη Έλξη

2.3.1. Εισαγωγή

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 η ντηζελοκίνηση είχε υποκαταστήσει **σχεδόν εντελώς** την ατμοκίνηση στις μη ηλεκτροκινούμενες γραμμές, στα περισσότερα δίκτυα παγκοσμίως.

Η αρχή έγινε στις ΗΠΑ, όπου στη διάρκεια της 25ετίας 1935-60 (και ιδιαίτερα της δεκαετίας 1951-60), οι σιδηρόδρομοι αντικατέστησαν **το σύνολο** των ατμάμαξών τους με ντηζελάμαξες.

Αιτίες της ραγδαίας αντικατάστασης του ατμού από το ντήζελ ήταν:

- η πίεση του ανταγωνισμού από τα άλλα μέσα μεταφορών και
- η συνεχιζόμενη αύξηση των δαπανών μισθοδοσίας προσωπικού.

Οι σιδηρόδρομοι αναγκάστηκαν να βελτιώσουν τις υπηρεσίες τους και να υιοθετήσουν κάθε διαθέσιμο μέτρο για την αύξηση της λειτουργικής τους αποδοτικότητας.

Σε σύγκριση με τις ατμάμαξες, οι ντηζελάμαξες παρουσίαζαν τα παρακάτω μεγάλα πλεονεκτήματα:

- Μπορούσαν να λειτουργούν για μεγάλες περιόδους χωρίς νεκρούς χρόνους για συντήρηση.

Έτσι, στη Βόρεια Αμερική μια ντηζελάμαξα μπορούσε να διανύσει διαδρομή 3.000 χιλιομέτρων ή μεγαλύτερη και εν συνεχεία, μετά τη συντήρηση, να ξεκινήσει το ταξίδι της επιστροφής.

Αντίθετα, οι ατμάμαξες απαιτούσαν εκτεταμένη συντήρηση ύστερα από λειτουργία μερικών ωρών.

- Χρησιμοποιούσαν λιγότερη ενέργεια καυσίμων από την ατμάμαξα, δεδομένου ότι η θερμική τους αποδοτικότητα ήταν τέσσερις φορές μεγαλύτερη.
- Μπορούσαν να επιταχύνουν ένα συρμό πολύ γρηγορότερα και να λειτουργούν σε μεγαλύτερες ταχύτητες, προκαλώντας μικρότερες φθορές στη σιδηροδρομική γραμμή.

Η **ντηζελο-ηλεκτρική** κινητήρια μονάδα (*diesel-electric locomotive*) είναι στην πραγματικότητα μια ηλεκτράμαξα, που φέρει τη δική της γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνεπώς, η χρήση της παρέχει στους σιδηροδρόμους κάποια από τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροκίνησης, χωρίς το κόστος για την κατασκευή των υποσταθμών διανομής και του συστήματος εναέριας τροφοδοσίας.

Όμως, σε σύγκριση με την ηλεκτράμαξα, η ντηζελο-ηλεκτρική κινητήρια μονάδα παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα: Καθώς η απόδοσή της περιορίζεται εν γένει στην αντίστοιχη του ντηζελοκινητήρα της, μπορεί να αναπτύξει λιγότερη ισχύ ανά κινητήρια μονάδα.

Δεδομένου ότι η μεγάλη ιπποδύναμη είναι απαραίτητη για σιδηροδρόμους υψηλών ταχυτήτων, η ντηζελο-ηλεκτρική μονάδα υστερεί έναντι της ηλεκτράμαξας στις επιβατικές υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων και στις ταχείες εμπορευματικές μεταφορές.

2.3.2. Η Ανάπτυξη της Ντηζελοκίνησης

Τα πειράματα με ντηζελάμαξες (*diesel-engine locomotives*) και ντηζελοκίνητες αυτοκινητάμαξες (*railcars*) άρχισαν αμέσως μετά την ανακάλυψη του ντηζελοκινητήρα από τον Γερμανο μηχανικό *Rudolf Diesel* το 1892.

Οι προσπάθειες για την κατασκευή ντηζελαμαξών και αυτοκινηταμαξών συνεχίστηκαν στη διάρκεια της δεκαετίας του 1920.

Η πρώτη πετυχημένη ντηζελάμαξα χρησιμοποιήθηκε το 1925 στους σιδηροδρόμους *Canadian National* και το 1928 στους σιδηροδρόμους *New York Central*.

Τα πρώτα πραγματικά εντυπωσιακά αποτελέσματα της υιοθέτησης της ντηζελοκίνησης φάνηκαν στη Γερμανία. Το 1933 η *Fliegende Hamburger*, μια δίδυμη (δύο οχημάτων) ντηζελοκίνητη αυτοκινητάμαξα, με δύο ντηζελοκινήτριες, έκαστος ισχύος 400 ίππων, τέθηκε σε κυκλοφορία στη διαδρομή Βερολίνο-Αμβούργο, με μέση εμπορική ταχύτητα 120 χλμ/ώρα.



Δίδυμη (δύο οχημάτων)
Ντηζελοκίνητη Αυτοκινητάμαξα
Fliegende Hamburger (1933)

Μέχρι το 1939, οι περισσότερες από τις μεγάλες Γερμανικές πόλεις διασυνδέθηκαν με τρένα αυτού του τύπου, που κυκλοφορούσαν με μέση ταχύτητα 130 χλμ/ώρα μεταξύ στάσεων.

Το επόμενο βήμα θα ήταν η κατασκευή της ξεχωριστής ντηζελο-ηλεκτρικής κινητήριας μονάδας, που μπορούσε να έλξει οποιονδήποτε συρμό βαγονιών.

Στις ΗΠΑ, μια τέτοια μονάδα χρησιμοποιήθηκε το 1935 από τους σιδηροδρόμους Βαλτιμόρης και Οχάϊο και δύο αντίστοιχες από τους σιδηροδρόμους της Σάντα Φε. Αυτές ήταν μηχανές για επιβατικά τρένα. Η πρώτη ντηζελοκίνητη μονάδα για εμπορευματικά τρένα ήταν η ισχύος 5.400 ίππων της *General Motors*, που κατασκευάστηκε το 1939.

Με το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η ντηζελάμαξα είχε καθιερωθεί ως τύπος κινητήριας μονάδας και άρχισε γρήγορα να υποκαθιστά την ατμάμαξα, ιδιαίτερα στις ΗΠΑ. Εκεί, στόλος 27.000 ντηζελαμαξών αποδείχθηκε ικανός να παράγει μεγαλύτερο μεταφορικό έργο, απ' ό,τι οι 40.000 ατμάμαξες, τις οποίες αντικατέστησε.

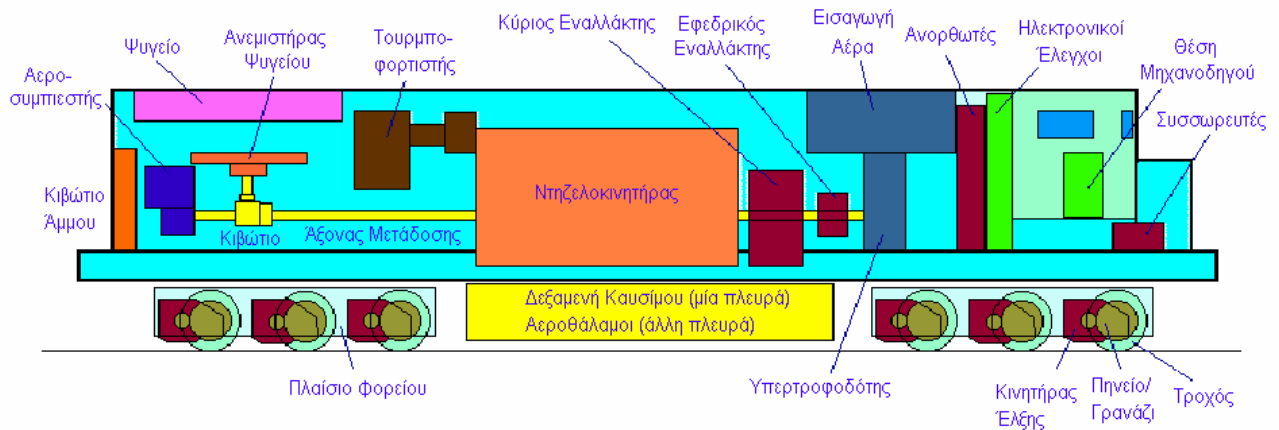
Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο η χρήση της ντηζελοκίνησης διεθνώς αυξήθηκε πολύ, παρά το γεγονός ότι η ταχύτητα μετάβασης στον νέο αυτόν τύπο σιδηροδρομικής έλξης ήταν εν γένει χαμηλότερη απ' ό,τι στις ΗΠΑ.

2.3.3. Στοιχεία της Ντηζελάμαξας

Παρά το γεγονός ότι η ισχύς και απόδοση του ντηζελοκινήτρου έχουν βελτιωθεί σημαντικά με το πέρασμα του χρόνου, οι βασικές αρχές παραμένουν ίδιες:

- Αέρας οδηγείται στον κύλινδρο, όπου συμπιέζεται ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του.
- Μικρή ποσότητα πετρελαίου εγχύεται στη συνέχεια εντός του κυλίνδρου.
- Το πετρέλαιο αναφλέγεται χωρίς σπινθήρα, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας.

Ο νηζελοκινητήρας μπορεί να είναι δίχρονος ή τετράχρονος. Η ταχύτητα λειτουργίας κυμαίνεται από 350 έως 2.000 στροφές ανά λεπτό. Η αποδιδόμενη ισχύς κυμαίνεται από 10 έως 4.000 ίππους. Στις ΗΠΑ, οι σιδηροδρομικές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν κινητήρες 1.000 στροφών ανά λεπτό. Στην Ευρώπη και αλλού προτιμώνται πολλές φορές κινητήρες 1.500-2.000 στροφών ανά λεπτό. Οι περισσότερες νηζελάμαξες ελιγμών ή μικρής διαδρομής είναι εφοδιασμένες με νηζελοκινητήρες ισχύος 600 έως 1.800 ίππων. Οι νηζελάμαξες πορείας έχουν συνήθως κινητήρες ισχύος 2.000 έως 4.000 ίππων.



Θέσεις κυρίων τμημάτων νηζελο-ηλεκτράμαξας

Οι περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν κινητήρες διάταξης V. Άλλοι τύποι κινητήρων χρησιμοποιούνται σε μικρότερες νηζελάμαξες ή σε υποδαπέδια τοποθέτηση σε αυτοκινητάμαξες.

Η συνηθέστερη μέθοδος μετάδοσης ισχύος είναι η **ηλεκτρική**, όπου η μηχανική ενέργεια, που παράγεται από τον νηζελοκινητήρα, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα για τους ηλεκτροκινητήρες έλξης.

Μέχρι το τελευταίο τέταρτο του 20ού αιώνα, η χρησιμοποιούμενη μέθοδος ήταν να συνδέεται ο νηζελοκινητήρας με **γεννήτρια συνεχούς ρεύματος**, από την οποία, μέσω των καταλλήλων ελέγχων, το ηλεκτρικό ρεύμα τροφοδοτούσε τους ηλεκτροκινητήρες.

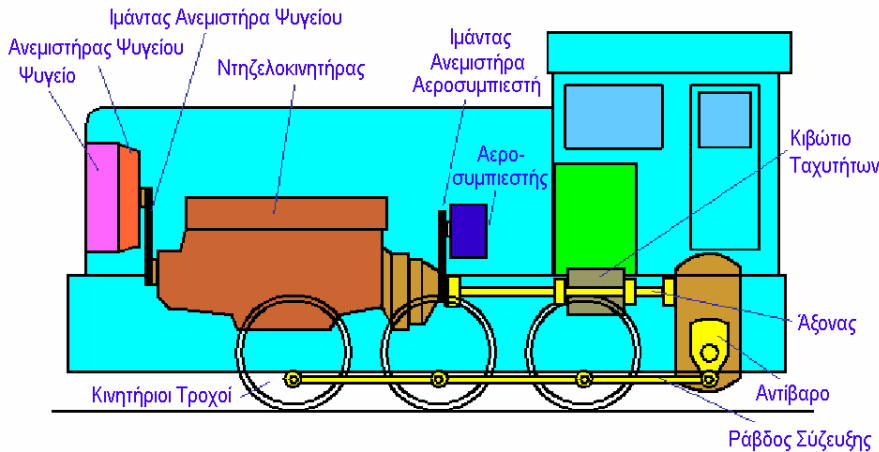
Η διαθεσιμότητα ανορθωτών (*rectifiers*) από συμπαγείς ημιαγωγούς επέτρεψε την αντικατάσταση της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος από εναλλακτήρα (*alternator*), δηλαδή από **γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος**, η οποία έχει τη δυνατότητα να παράγει περισσότερη ισχύ και έχει μικρότερες δαπάνες συντήρησης από την αντίστοιχη συνεχούς ρεύματος.

Στις νηζελάμαξες χρησιμοποιούνται και άλλοι τύποι μετάδοσης της ισχύος.

Η **υδραυλική μετάδοση** αναπτύχθηκε κυρίως στη Γερμανία και χρησιμοποιείται συχνά στις νηζελοκίνητες αυτοκινητάμαξες. Χρησιμοποιεί φυγοκεντρική αντλία, που καθοδηγεί στρόβιλο σε θάλαμο πλήρη πετρελαίου ή παρόμοιου υγρού. Η αντλία, καθοδηγούμενη από τον νηζελοκινητήρα, μετατρέπει την ισχύ της μηχανής σε

κινητική ενέργεια, μέσω της πρόσκρουσης του πετρελαίου στις λεπίδες του στροβίλου. Όσο ταχύτερα κινούνται οι λεπίδες, τόσο μικρότερη είναι η σχετική ταχύτητα πρόσκρουσης του πετρελαίου και μεγαλύτερη η ταχύτητα κίνησης της μονάδας.

Η **μηχανική μετάδοση** είναι ο απλούστερος τύπος μετάδοσης ισχύος. Χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρής ισχύος ντηζελάμαξες ελιγμών και μικρές αυτοκινητάμαξες. Στην πραγματικότητα πρόκειται για συμπλέκτη και κιβώτιο ταχυτήτων, παρόμοια με τα χρησιμοποιούμενα στα αυτοκίνητα.



Ντηζελάμαξα με μηχανική μετάδοση ισχύος

2.3.4. Τύποι Ντηζελοκίνησης

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες σιδηροδρομικού τροχαίου υλικού που χρησιμοποιούν ντηζελοκίνηση:

- α. Οι **ελαφρές επιβατικές αυτοκινητάμαξες** (ή *rail bus*), με ισχύ κινητήρα μέχρι 200 HP, οι οποίες συνήθως έχουν τέσσερις τροχούς και μηχανική μετάδοση ισχύος.
- β. Η **τετραξονική επιβατική αυτοκινητάμαξα** (ισχύς κινητήρα μέχρι 750 HP), η οποία μπορεί να λειτουργεί είτε ως ανεξάρτητη, είτε ως έλκουσα όχημα χωρίς κινητήρα, ή να συντεθεί ημιμόνιμα σε πολλαπλή μονάδα (*multiple-unit*), που αξιοποιεί το σύνολο ή μέρος της συνολικής ισχύος των διαθέσιμων κινητήρων.



Ελαφρά Επιβατική Αυτοκινητάμαξα (Railbus)



Τετραξονική Επιβατική Αυτοκινητάμαξα

Στα σύγχρονα κινητήρια οχήματα, ο νηζελοκινητήρας καθώς και όλος ο απαιτούμενος εξοπλισμός έλξης, περιλαμβανομένων και των δεξαμενών καυσίμων, τοποθετείται πλέον κάτω από το δάπεδο, απελευθερώνοντας χώρο για θέσεις επιβατών. Η μετάδοση της ισχύος είναι είτε ηλεκτρική είτε υδραυλική. Οι μονάδες αυτές ορισμένες φορές έλκουν δεύτερο ελαφρό επιβατικό όχημα.

γ. Οι **νηζελάμαξες** (ισχύς κινητήρα 10 έως 4.000 HP), οι οποίες μπορεί να έχουν είτε μηχανική μετάδοση, σε περιπτώσεις μικρής ισχύος, είτε υδραυλική μετάδοση, για ισχύ μέχρι 2.000 ίππους, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτρική μετάδοση.

Στο τελευταίο τέταρτο του 20ού αιώνα, η σημαντική αύξηση της σχέσης ισχύος προς βάρος στους νηζελοκινητήρες, καθώς και η εφαρμογή της Ηλεκτρονικής στον έλεγχο των τμημάτων της μηχανής και στα συστήματα διάγνωσης, είχαν ως αποτέλεσμα μεγάλες βελτιώσεις στην αποδοτικότητα των νηζελαμαξών.



Νηζελάμαξα Alco

Το 1990, μια νηζελάμαξα ισχύος 3.500 ίππων διετίθετο με βάρος το μισό του αντίστοιχου μοντέλου του 1970. Ταυτοχρόνως, βελτιώθηκε πολύ η οικονομική χρήση καυσίμου από τους νηζελοκινητήρες.

Η Ηλεκτρονική έχει συνεισφέρει πολύ στη βελτίωση των δυνατοτήτων των νηζελοηλεκτραμαξών, βελτιώνοντας την πρόσφυση κατά την εκκίνηση ή την πορεία σε έντονες κατά μήκος κλίσεις.

Μια νηζελάμαξα, επιταχύνοντας από στάση, μπορεί να αναπτύξει 33-50 % περισσότερη ελκτική δύναμη αν επιτρέπεται στους κινητήριους τροχούς της να “έρπουν” (*creep*) σε ελαφρά, σταθερή και πλήρως ελεγχόμενη ολίσθηση. Σε ένα τυπικό σύστημα “ελέγχου ερπυσμού” (*creep control*), ραντάρ προσαρμοσμένο στο κάτω μέρος της νηζελάμαξας μετρά με ακρίβεια την πραγματική ταχύτητα εδάφους, με βάση την οποία μικροεπεξεργαστές υπολογίζουν το ιδανικό όριο ταχύτητας ερπυσμού στις επικρατούσες συνθήκες γραμμής και ρυθμίζουν αυτομάτως την παροχή ρεύματος στους κινητήρες έλξης. Η διαδικασία είναι συνεχής, έτσι ώστε η παροχή ρεύματος να αναπροσαρμόζεται αμέσως, ώστε να αντιστοιχεί σε μεταβολή των παραμέτρων γραμμής.

Στη δεκαετία του 1960, στις ΗΠΑ θεωρούσαν ότι μια νηζελοηλεκτράμαξα ισχύος 3.000-3.600 ίππων ή περισσότερων, για αποτελεσματική πρόσφυση πρέπει να έχει έξι κινητήριους άξονες. Δύο σιδηροδρομικές επιχειρήσεις στις ΗΠΑ έχουν μικρό στόλο νηζελοηλεκτραμαξών με οκτώ κινητήριους άξονες, καθένας των οποίων παραλαμβάνει ισχύ από δύο νηζελοκινητήρες, με συνολική απόδοση 5.000-6.600 ίππων. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 και εξής, κατασκευάζονται νηζελοηλεκτράμαξες ισχύος 4.000 ίππων με τέσσερις κινητήριους άξονες και χρησιμοποιούνται ευρέως σε ταχείες εμπορευματικές υπηρεσίες. Για βαριές

εμπορευματικές μεταφορές προτιμώνται ακόμη ντηζελοηλεκτράμαξες με έξι κινητήριους άξονες. Σήμερα όμως, ισχύς 4.000 ίππων διατίθεται από 16-κύλινδρο ντηζελοκινητήρα, ενώ στη δεκαετία του 1960 απόδοση 3.600 ίππων απαιτούσε 20-κύλινδρο κινητήρα.

Το γεγονός αυτό, μαζί με τη μείωση του αριθμού των ντηζελαμαξών που απαιτούνται για την έλξη ενός φορτίου, λόγω βελτιωμένης πρόσφυσης, απετέλεσε βασικό παράγοντα μείωσης των δαπανών συντήρησης των κινητηρίων μονάδων.

Στη δεκαετία του 1990, ισχύς 3.500 έως 4.000 ίππων θεωρείτο διεθνώς ως η μέγιστη απόδοση που πρέπει να επιδιώκεται από μεμονωμένη ντηζελάμαξα. Ορισμένοι τύποι που χρησιμοποιούντο στην πρώην Σοβιετική Ένωση είχαν μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ, επειδή κάθε κινητήρια μονάδα αποτελείτο από δύο, ή σε ορισμένες περιπτώσεις τέσσερις, μονάδες ίδιας ισχύος και διάταξης αξόνων, μονίμως συνεζευγμένες. Στην πρώην Σοβιετική Ένωση, η πιο ισχυρή ντηζελάμαξα είχε ισχύ 12.000 ίππων και αποτελείτο από τέσσερις μονάδες των 3.000 ίππων, προσαρμοσμένη εκάστη σε έξι κινητήριους άξονες. Στις υπόλοιπες περιοχές του κόσμου, εκτός της Βόρειας Αμερικής, η διάδοση της ηλεκτροκίνησης περιόρισε από τη δεκαετία του 1960 και μετά την παραγωγή ντηζελαμαξών για επιβατικά τρένα.

Η τελευταία εξέλιξη στις υψηλές ταχύτητες ήταν στη Βρετανία, όπου οι Βρετανικοί Σιδηρόδρομοι (*British Rail*), για τις ανάγκες των μη-ηλεκτροκινούμενων βασικών τους αξόνων, παρήγαγαν μαζικά μια ημιμόνιμη σύνθεση, αποτελούμενη από δύο ντηζελάμαξες ισχύος 2.250 ίππων με επτά ή οκτώ ενδιάμεσες επιβατάμαξες.



*Η Βρετανική ντηζελοκίνητη
πολλαπλή μονάδα Intercity Sparrow
(ρεκόρ ταχύτητας ντηζελοκίνητης
έλξης 235 χλμ/ώρα)*

Το 1987 μια τέτοια σύνθεση δημιούργησε νέο παγκόσμιο ρεκόρ ταχύτητας με ντηζελοκίνητη έλξη 235 χλμ/ώρα (148 μίλια/ώρα). Μια παραλλαγή αυτής της σύνθεσης λειτουργεί στους σιδηροδρόμους Νέας Νότιας Ουαλλίας στην Αυστραλία.

Στη Βόρεια Αμερική, οι εταιρείες ιντερσίτυ επιβατικών μεταφορών Amtrak στις ΗΠΑ και VIA στον Καναδά, καθώς και μερικά συστήματα αστικών μεταφορών χρησιμοποιούν ακόμη ντηζελάμαξες σε επιβατικά τρένα. Στις άλλες χώρες, οι ντηζελάμαξες πορείας σχεδιάζονται είτε για αποκλειστική εμπορευματική χρήση, είτε για μικτή επιβατική και εμπορευματική υπηρεσία.

2.4. Ηλεκτροκίνητη Έλξη

2.4.1. Εισαγωγή

Προσπάθειες για την προώθηση σιδηροδρομικών οχημάτων με τη χρήση μπαταριών (συσσωρευτών) ξεκίνησαν από το 1835. Η πρώτη πετυχημένη εφαρμογή της ηλεκτροκίνητης έλξης ήταν το 1879, όταν μια ηλεκτράμαξα κινήθηκε κατά τη διάρκεια μιας έκθεσης στο Βερολίνο. Οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές της ηλεκτροκίνησης έγιναν στους προαστιακούς και αστικούς σιδηροδρόμους. Μια από τις παλαιότερες ήταν αυτή του 1895, όταν οι σιδηρόδρομοι Βαλτιμόρης και Οχάιο ηλεκτροκίνησαν ένα τμήμα γραμμής στη Βαλτιμόρη, για να ξεπεράσουν προβλήματα καπνού και θορύβου σε σήραγγες. Από τις πρώτες χώρες που χρησιμοποίησαν ηλεκτροκίνηση σε βασικές (*main-line*) σιδηροδρομικές γραμμές ήταν η Ιταλία, όπου ένα τέτοιο σύστημα εγκαινιάστηκε το 1902.

Πριν τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο, ένας αριθμός ηλεκτροκίνητων γραμμών λειτουργούσε τόσο στην Ευρώπη, όσο και στις ΗΠΑ. Μεγάλα προγράμματα ηλεκτροκίνησης ξεκίνησαν μετά τον πόλεμο αυτόν σε χώρες όπως η Σουηδία, η Ελβετία, η Νορβηγία, η Γερμανία και η Αυστρία.

Περί το τέλος της δεκαετίας του 1920 σχεδόν κάθε Ευρωπαϊκή χώρα είχε τουλάχιστον ένα μικρό ποσοστό ηλεκτροκίνητου σιδηροδρομικού δικτύου.

Η ηλεκτροκίνηση εφαρμόστηκε επίσης

στην Αυστραλία (1921),
τη Νέα Ζηλανδία (1923),
την Ινδία (1925),
την Ινδονησία (1925) και
τη Νότια Αφρική (1926).

Στις ΗΠΑ, μεταξύ των ετών 1900 και 1938 ηλεκτροκινήθηκε ένας αριθμός μητροπολιτικών επιβατικών σταθμών και προαστιακών υπηρεσιών, καθώς και μερικές βασικές (*main-line*) γραμμές.

Στις ΗΠΑ, μετά το 1938, η ανάπτυξη της νηζελοκίνητης έλξης αποθάρρυνε την περαιτέρω ηλεκτροκίνηση βασικών σιδηροδρομικών αξόνων.

Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, η ηλεκτροκίνηση βασικών αξόνων προχώρησε ραγδαία σε άλλες χώρες. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 οι ηλεκτροκινούμενες γραμμές αποτελούσαν σημαντικό ποσοστό του συνολικού μήκους του εθνικού σιδηροδρομικού δικτύου, σε χώρες όπως:

η Ελβετία (99,6 %),
η Ολλανδία (69 %),
το Βέλγιο (62 %),
η Σουηδία (62 %),

η Νορβηγία (60 %),
η Ιταλία (59 %),
η Αυστρία (57 %),
η Ιαπωνία (56 %),
η Γαλλία (37 %) και
η Βρετανία (30 %).

Αντίθετα, στις ΗΠΑ την ίδια περίοδο οι ηλεκτροκίνητες γραμμές αποτελούσαν λιγότερο από το 1% του συνολικού εθνικού σιδηροδρομικού δικτύου.

Το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα χαρακτηρίστηκε επίσης διεθνώς από την κατασκευή νέων (ή επέκταση υφισταμένων) ηλεκτροκίνητων αστικών σιδηροδρομικών συστημάτων.

2.4.2. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η ηλεκτροκίνηση θεωρείται γενικώς ως ο οικονομικότερος και αποτελεσματικότερος τρόπος λειτουργίας ενός σιδηροδρομικού δικτύου, υπό τον όρο ότι:

- Υπάρχει διαθέσιμη φτηνή ηλεκτρική ενέργεια και
- Η πυκνότητα της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας δικαιολογεί την απαιτούμενη επένδυση.

Σε αντίθεση με τις ατμάμαξες και τις ντηζελάμαξες, οι ηλεκτράμαξες, όντας απλώς μηχανές **μετατροπής** και **όχι παραγωγής** ενέργειας, έχουν πλεονεκτήματα:

- Προκειμένου να εκκινήσουν την έλξη ενός βαρέως συρμού ή να ανέβουν μια έντονη κλίση με μεγάλη ταχύτητα, μπορούν να καταφύγουν στους πόρους του δικτύου ηλεκτροκίνησης, ώστε να αναπτύξουν ισχύ πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική τους. Μια τυπική σύγχρονη ηλεκτράμαξα ονομαστικής ισχύος 6.000 HP έχει παρατηρηθεί να αναπτύσσει για μικρή περίοδο ισχύ μέχρι 10.000 HP, κάτω από συνθήκες αντίστοιχες με τις προαναφερθείσες.
- Επιπλέον, οι ηλεκτράμαξες είναι πιο αθόρυβες κατά τη λειτουργία τους από άλλους τύπους κινητηρίων μονάδων και δεν παράγουν καπνό ή καυσαέρια.
- Οι ηλεκτράμαξες χρειάζονται λιγότερο χρόνο στο μηχανοστάσιο για συντήρηση, το κόστος συντήρησής τους είναι χαμηλό και έχουν μεγαλύτερη ωφέλιμη ζωή από τις ντηζελάμαξες.



Ηλεκτράμαξα Hellasprinter του ΟΣΕ

Τα μεγαλύτερα προβλήματα της ηλεκτροκίνητης σιδηροδρομικής λειτουργίας συνδέονται με:

- (α) τις μεγάλες δαπάνες κατασκευής και συντήρησης των μόνιμων εγκαταστάσεων της ηλεκτροκίνησης, όπως η εναέρια γραμμή επαφής, οι κατασκευές ανάρτησης της καλωδίωσης και οι υποσταθμοί έλξης και
- (β) τις δαπανηρές αλλαγές που απαιτούνται συνήθως στα συστήματα σηματοδότησης, ώστε να μονωθούν τα κυκλώματά τους έναντι παρεμβολών από τα καλώδια υψηλής τάσης και να προσαρμοστεί η απόδοσή τους στις μεγαλύτερες επιταχύνσεις και ταχύτητες κυκλοφορίας, που επιτυγχάνονται με την υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης.

2.4.3. Συστήματα Ηλεκτροκίνητης Έλξης

2.4.3.1. Εισαγωγή

Όλα τα ηλεκτρικά κυκλώματα, ανεξάρτητα από τη συνθετότητά τους, μπορούν να θεωρηθούν ως μια πηγή ενέργειας και μία αντίσταση. Το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κύκλωμα εξαρτάται από το δυναμικό (ή τάση) της πηγής και το μέγεθος της αντίστασης, ενώ η καταναλισκόμενη ισχύς ισούται με την τάση επί το ηλεκτρικό ρεύμα. Στην απλούστερη περίπτωση, η ενέργεια θα αποδίδεται ως θέρμανση της αντίστασης. Η αντίσταση θα μπορούσε επίσης να είναι εξαιρετικά σύνθετο σύστημα. Στην ηλεκτροκίνηση, η ενέργεια χρησιμοποιείται για την κίνηση της μάζας και του φορτίου του τρένου.

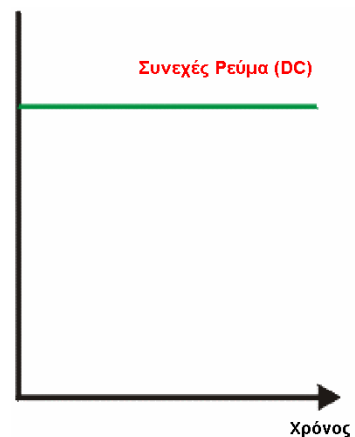
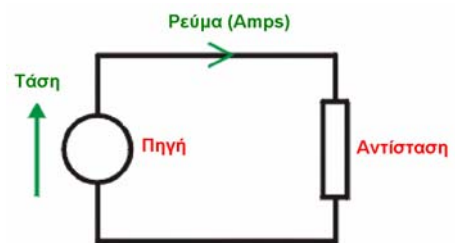
Επιπλέον, η ηλεκτρική πηγή μπορεί να ανήκει σε δύο εν γένει τύπους:

- συνεχούς ρεύματος (*direct current-DC*) ή
- εναλλασσόμενου ρεύματος (*alternating current-AC*).

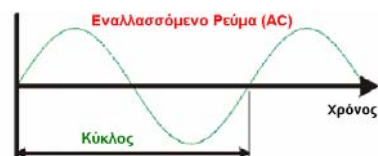
Ηλεκτρική τάση **συνεχούς (DC)** ρεύματος είναι εκείνη που διατηρεί την πολικότητά της (όπως αυτή μιας μπαταρίας).

Η αντίστοιχη **εναλλασσόμενου** ρεύματος εναλλάσσει πολικότητα (όπως αυτή της οικιακής παροχής των 220 V).

Το παριστώμενο στο σχήμα κύμα εναλλασσόμενου ρεύματος είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο, **ημιτονοειδούς** μορφής.

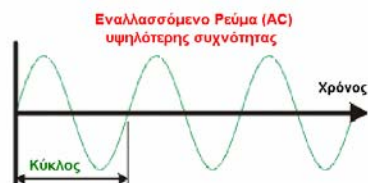


Το εναλλασσόμενο ρεύμα εισάγει επίσης μια νέα παράμετρο, αυτή της **συχνότητας**, που αποτελεί μέτρο του αριθμού των κύκλων ανά δευτερόλεπτο και μετράται σε *Hertz (Hz)*.



Στην εικόνα δείχνονται δύο τυπικά κύματα εναλλασσομένου ρεύματος, εκ των οποίων το ένα έχει διπλάσια συχνότητα από το άλλο.

Τα συστήματα ηλεκτροκίνησης μπορούν εν γένει να διακριθούν σε εκείνα που χρησιμοποιούν **εναλλασσόμενο** ρεύμα και εκείνα που χρησιμοποιούν **συνεχές** ρεύμα.



2.4.3.2. Συστήματα Συνεχούς Ρεύματος

Στα συστήματα **συνεχούς** ρεύματος, οι συνηθέστερες ηλεκτρικές τάσεις για συστήματα τροφοδοσίας με εναέριο καλώδιο (*overhead wire supply*) είναι τα 1.500 και τα 3.000 Volt.

Τα συστήματα τροφοδοσίας με τρίτη σιδηροτροχιά (*third-rail*) χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα, τάσης της τάξης των 600-750 volt.

Μειονεκτήματα της ηλεκτροκίνησης με **συνεχές** ρεύμα είναι ότι:

- (α) απαιτείται η κατασκευή δαπανηρών υποσταθμών σε συχνά διαστήματα και
- (β) το εναέριο καλώδιο (ή η τρίτη σιδηροτροχιά) πρέπει να είναι σχετικά μεγάλο και βαρύ.

Ο ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης αποδείχτηκε κατάλληλος για τη σιδηροδρομική έλξη, επειδή παρείχε απλότητα κατασκευής και ευκολία ελέγχου. Μέχρι τα τέλη του 20ού αιώνα χρησιμοποιούνταν παγκοσμίως σε ηλεκτροκίνητες ή ντιζελο-ηλεκτρικές κινητήριες μονάδες. Τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης **εναλλασσόμενου** ρεύματος, αντί για συνεχές, παρακίνησαν νωρίς πειράματα και εφαρμογές αυτού του συστήματος.

2.4.3.3. Συστήματα Εναλλασσομένου Ρεύματος

Με το **εναλλασσόμενο** ρεύμα, ειδικότερα με σχετικά υψηλές τάσεις εναερίων καλωδίων τροφοδοσίας (10.000 volts ή μεγαλύτερες), απαιτούνται λιγότεροι υποσταθμοί.

Επίσης, η δυνατότητα χρήσης ελαφρότερου εναερίου καλωδίου τροφοδοσίας μειώνει το κόστος των κατασκευών που απαιτούνται για την υποστήριξή του, με αποτέλεσμα περαιτέρω ωφέλειες όσον αφορά το κόστος κεφαλαίου για την εγκατάσταση συστημάτων ηλεκτροκίνησης.

Τις πρώτες δεκαετίες της ηλεκτροκίνησης με εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης, οι διαθέσιμοι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος δεν ήσαν κατάλληλοι για λειτουργία με το εναλλασσόμενο ρεύμα της εμπορικής ή βιομηχανικής συχνότητας (50 *hertz* [κύκλοι ανά δευτερόλεπτο] στην Ευρώπη, 60 *hertz* στις ΗΠΑ και τμήματα της Ιαπωνίας). Οι κινητήρες αυτοί έπρεπε να χρησιμοποιούν ρεύμα χαμηλότερης συχνότητας (16 $\frac{2}{3}$ *hertz* στην Ευρώπη, 25 *hertz* στις ΗΠΑ). Αυτό με τη σειρά του απαιτούσε είτε ειδικά σιδηροδρομικά συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας ικανά να παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα στην απαιτούμενη συχνότητα, ή εξοπλισμό μετατροπής της συχνότητας, από την διαθέσιμη βιομηχανική στην απαιτούμενη σιδηροδρομική συχνότητα. Σε κάθε περίπτωση, συστήματα ηλεκτροκίνησης τροφοδοτούμενα με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 16 $\frac{2}{3}$ *hertz* κατέστησαν τα κυρίαρχα σε μερικά Ευρωπαϊκά δίκτυα όπως στην Αυστρία, τη Γερμανία και τη Σουηδία, σε δίκτυα δηλαδή που ηλεκτροκινήθηκαν πριν τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.

Στις ανατολικές ΗΠΑ κατασκευάστηκαν μερικά συστήματα ηλεκτροκίνησης τροφοδοτούμενα με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 25 *hertz*, κυριότερο από τα οποία είναι αυτό που λειτουργεί ακόμη στον Βορειοανατολικό διάδρομο Νέας Υόρκης – Ουάσιγκτον, τον οποίον εκμεταλλεύεται η κρατική σιδηροδρομική εταιρεία *Amtrak*.

Παρ' όλ' αυτά, το ενδιαφέρον για ηλεκτροκίνηση σιδηροδρόμων μέσω εναέριου καλωδίου, με εναλλασσόμενο ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας παρέμενε ζωηρό. Σχετικά πειράματα διεξάγονταν το 1933 στη Γερμανία και την Ουγγαρία. Πριν τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, οι Γερμανικοί Κρατικοί Σιδηρόδρομοι ηλεκτροκίνησαν την τοπική γραμμή *Höllenthal* με εναλλασσόμενο ρεύμα 20.000 volts, 50 *hertz*. Το 1945 ο **Louis Armand**, πρώην Πρόεδρος των Γαλλικών Σιδηροδρόμων, συνέχισε την περαιτέρω ανάπτυξη αυτού του συστήματος και έκανε τις απαραίτητες μετατροπές της γραμμής μεταξύ *Aix-Les-Bains* και *La Roche-sur-Foron* για τους πρώτους πρακτικούς πειραματισμούς. Οι πειραματισμοί αυτοί απέβησαν τόσο επιτυχείς, ώστε το σύστημα ηλεκτροκίνησης 25.000 Volt και 50 ή 60 *Hertz* να καταστεί πρότυπο για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης σε βασικούς (*main-line*) σιδηροδρομικούς άξονες.

2.4.3.4. Τεχνολογικές Βελτιώσεις Συστημάτων Ηλεκτροκίνησης με Εναλλασσόμενο Ρεύμα Βιομηχανικής Συχνότητας

Στα συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας υπάρχουν δύο πρακτικώς τρόποι μεταβίβασης της ισχύος στους κινητήριους τροχούς της ηλεκτράμαξας:

- (1) Μέσω περιστροφικού μεταλλάκτη (*rotary converter*) ή στατικού ανορθωτή (*rectifier*) επί της ηλεκτράμαξας, ο οποίος μετατρέπει την παροχή εναλλασσομένου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης, που τροφοδοτεί ηλεκτροκινήτες συνεχούς ρεύματος.
- (2) Μέσω συστήματος μεταλλακτών που παράγουν ρεύμα μεταβλητής συχνότητας, που τροφοδοτεί ηλεκτροκινήτες εναλλασσομένου ρεύματος.

Η πρώτη μέθοδος, που χρησιμοποιεί μη-μηχανικούς ανορθωτές, αποτελούσε κοινή πρακτική μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1970.

Στην εποχή μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο έχει σημαντικά βελτιωθεί η σχέση **ισχύος προς βάρος** των ηλεκτραμαξών. Η μείωση του μεγάλου μέρους των ηλεκτρικών συσκευών και κινητήρων επί της μονάδας, μαζί με την ταυτόχρονη αύξηση της απόδοσης σε ισχύ, επέτρεψε το 1944 στην Ελβετία την κατασκευή για τους σιδηροδρόμους *Bern-Lötschberg-Simplon* ηλεκτράμαξας ισχύος 4.000 ίππων και βάρους μόνο 72 τόνων. Οι τέσσερις άξονες της ηλεκτράμαξας ήσαν όλοι κινητήριοι. Δεν υπήρχε πλέον ανάγκη για μη-κινητήριους άξονες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να διατηρούν το βάρος κάθε ζεύγους τροχών εντός των επιτρεπομένων από άποψη γραμμής ορίων.

Περί το 1960, η ηλεκτρική βιομηχανία παρήγαγε σύνολα μετασχηματιστών και ανορθωτών τόσο λεπτά σε πάχος, που μπορούσαν να προσαρμοστούν κάτω από το πλαίσιο του κινητηρίου οχήματος ενός συρμού αστικών επιβατικών μεταφορών, αφήνοντας ολόκληρο τον χώρο του αμαξώματος διαθέσιμο για την τοποθέτηση καθισμάτων επιβατών.

Με τον τρόπο αυτόν επιταχύνθηκε και επεκτάθηκε η ηλεκτροκίνηση των μητροπολιτικών σιδηροδρομικών δικτύων των βιομηχανικά ανεπτυγμένων χωρών, με τη λειτουργία αυτοκινούμενων συρμών, στους οποίους όλα ή μερικά από τα οχήματα είναι κινητήρια.

Με τον τρόπο αυτόν, οι συνθέσεις προσαρμόζονται καλύτερα στις ανάγκες της ώρας αιχμής. Με τη σύζευξη δύο ή περισσότερων συνθέσεων, η απαιτούμενη επιπλέον ισχύς παρέχεται από τις προστιθέμενες συνθέσεις.

Τόσο με την ντιζελοκίνητη έλξη όσο και με την ηλεκτροκίνηση, είναι εύκολο να διασυνδεθούν ηλεκτρικά οι έλεγχοι ισχύος και πέδησης όλων των συνθέσεων, έτσι ώστε ο συρμός τον οποίο συγκροτούν να μπορεί να οδηγηθεί από ένα θάλαμο μηχανοδότησης.

Λόγω της ευκολίας αυτής, τέτοιες συνθέσεις είναι γνωστές ως **πολλαπλές μονάδες** (*multiple-units*). Οι σύγχρονες πολλαπλές μονάδες είναι εφοδιασμένες με **αυτόματους συζευκτήρες** (*couplers*), που εξασφαλίζουν τη σύνδεση όλων των κυκλωμάτων ελέγχου έλξης, πέδησης κλπ. μεταξύ των δύο συνθέσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με την αυτόματη σύνδεση, όταν οι συζευκτήρες ενώνονται, των ηλεκτρικών επαφών που βρίσκονται στην κεφαλή κάθε συζευκτήρα.

2.4.3.5. Ο Ημιαγωγός Thyristor

Περίπου από το 1960, η μεγάλη πρόοδος στην τεχνολογία της ηλεκτροκίνητης έλξης προήλθε από τις εφαρμογές της Ηλεκτρονικής.

Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η τελειοποίηση του ημιαγωγού **thyristor**, ή **chopper**, για τον έλεγχο της τροφοδοσίας των κινητήρων με ηλεκτρικό ρεύμα.

Ο *thyristor*, ένας διακόπτης ταχύτατης λειτουργίας και μεγάλης ισχύος, με τον οποίο οι περίοδοι "on" και "off" κάθε κύκλου μπορούν να μεταβάλλονται κλασματικά, εξυπηρέτησε την ομαλά διαβαθμισμένη εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στους κινητήρες έλξης.

Πέραν της εξαφάνισης των επικινδύνων για φθορές τμημάτων ενός ηλεκτροκινητήρα και της μεγάλης βελτίωσης της συμπαγούς απόδοσης της κινητήριας μονάδας, ο έλεγχος μέσω *thyristor* μείωσε επίσης και την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος.

2.4.3.6. Ηλεκτροκίνηση με Τριφασικούς Κινητήρες Εναλλασσομένου Ρεύματος

Η ηλεκτροκίνηση με **τριφασικούς κινητήρες** εναλλασσομένου ρεύματος κατέστη πρακτική τη δεκαετία του 1980.

Με τη βοήθεια της Ηλεκτρονικής κατέστη δυνατό να συμπίεστεί σε διαχειρίσιμο βάρος και μέγεθος ο σύνθετος εξοπλισμός που απαιτείτο για να μετασχηματιστεί το εναέριο καλώδιο τροφοδοσίας ή η τρίτη σιδηροτροχιά σε παροχή μεταβλητής τάσης και συχνότητας, κατάλληλη να τροφοδοτήσει τους τριφασικούς κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος.



2.4.3.7. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ηλεκτροκινητήρων Τριφασικού Εναλλασσομένου Ρεύματος

Για τη σιδηροδρομική έλξη, ο κινητήρας εναλλασσομένου ρεύματος είναι από πολλές απόψεις προτιμότερος από τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

- Ο κινητήρας εναλλασσομένου ρεύματος είναι επαγωγικός κινητήρας, δεν έχει διακόπτες αναστροφής (*commutators*) ή ψήκτρες, ούτε μηχανικά τμήματα επαφής εκτός από ένσφαιρους τριβείς (ρουλεμάν). Η συντήρησή του είναι λοιπόν πολύ απλούστερη και είναι περισσότερο αξιόπιστος.
- Είναι επίσης περισσότερο συμπαγής από τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος, με αποτέλεσμα να διατίθεται περισσότερη ισχύς από ένα συγκεκριμένο βάρος και μέγεθος κινητήρα.
- Η ροπή στρέψεως (*torque*) ενός κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος μεγαλώνει με την ταχύτητα, ενώ αντιθέτως, ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, είναι αρχικά υψηλή και πέφτει όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Συνεπώς, ο κινητήρας εναλλασσομένου ρεύματος προσφέρει καλύτερη πρόσφυση για την επιτάχυνση βαρέων σιδηροδρομικών φορτίων.
- Τέλος, ο κινητήρας εναλλασσομένου ρεύματος μεταπίπτει ευκολότερα σε λειτουργία γεννήτριας, δρώντας δυναμικά (ρεοστατικά) ή σαν γεννήτρια πέδησης.

Στη **δυναμική** πέδη το ρεύμα που δημιουργείται για να αντισταθεί στην ορμή του συρμού σπαταλάται (διαχέεται) μέσω αντιστάσεων επί του τρένου.

Στην **αναγεννητική** (*regenerative*) πέδη, που υιοθετείται σε ορεινές γραμμές ή αστικές γραμμές μεγάλης πυκνότητας κυκλοφορίας, όπου το πλεονάζον ρεύμα μπορεί αμέσως να παραληφθεί από άλλα τρένα, το ρεύμα επανατροφοδοτείται στην εναέρια γραμμή επαφής ή την τρίτη σιδηροτροχιά.

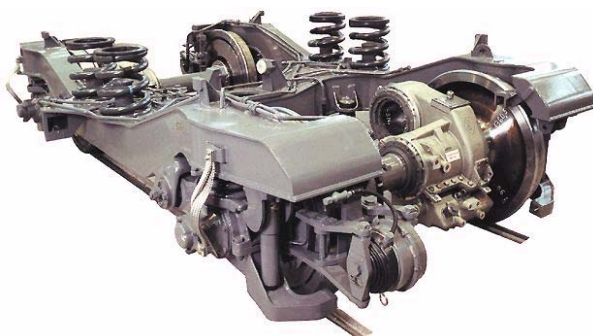
Τα **μειονεκτήματα** της έλξης με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα είναι:

- Η περιπλοκότητα του ηλεκτρικού εξοπλισμού επί του τρένου, που απαιτείται για τη μετατροπή της τροφοδοσίας ρεύματος, πριν αυτό φτάσει στους κινητήρες και
- Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, το μεγαλύτερο κόστος κεφαλαίου σε σύγκριση με συστήματα κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

2.4.3.8. Διάταξη Ηλεκτροκινητήρων

Ένας ξεχωριστός κινητήρας έλξης εξυπηρετεί συνήθως κάθε άξονα, μέσω κατάλληλης διάταξης μετάδοσης. Για απλοποίηση της διάταξης ήταν για πολλά χρόνια συνήθης πρακτική η προσαρμογή των κινητήρων έλξης στους άξονες της ηλεκτράμαξας.

Με την αύξηση των ταχυτήτων των τρένων, η ανάγκη να περιοριστεί η επίδραση στη γραμμή των μη-ανηρτημένων μαζών κατέστη σημαντική. Τώρα πλέον, οι κινητήρες έλξης είτε αναρτώνται στο εσωτερικό των φορέων της ηλεκτράμαξας, είτε, στην περίπτωση ορισμένων συρμών υψηλών ταχυτήτων, αναρτώνται από το αμάξωμα της ηλεκτράμαξας και συνδέονται με τα κιβώτια των αξόνων μέσω εύκαμπτων αξόνων μετάδοσης.



*Φορείο τρένου DUPLEX TGV,
κατασκευής ALSTOM.*

Τεχνολογία κινητήρων **συνεχούς ρεύματος** χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα τρένα υψηλών ταχυτήτων, τόσο στην Ιαπωνία (*Shinkansen*), όσο και στη Γαλλία (*TGV* γραμμές Παρίσι-Λυών). Όμως, από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η ηλεκτροκίνηση με **τριφασικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος** είχε υιοθετηθεί στα νέα Ιαπωνικά και Γαλλικά τρένα υψηλών ταχυτήτων.

2.4.3.9. Πολυρρευματικοί Συρμοί

Στην Ευρώπη, η κυκλοφορία διεθνών τρένων χωρίς αλλαγή κινητήριας μονάδας στα σύνορα αποτελεί σύνθετο πρόβλημα, επειδή τα διάφορα εθνικά σιδηροδρομικά δίκτυα έχουν ιστορικά υιοθετήσει διαφορετικά συστήματα ηλεκτροκίνησης, όπως:

- Συνεχές ρεύμα 1.500 V.
- Συνεχές ρεύμα 3.000 V.
- Εναλλασσόμενο ρεύμα 25.000 V, 50 Hz
- Εναλλασσόμενο ρεύμα 15.000 V, 16 ²/₃ Hz.

Οι Γαλλικής τεχνολογίας συρμοί υψηλών ταχυτήτων *Eurostar*, που κυκλοφορούν μεταξύ Λονδίνου - Παρισιού και Λονδίνου - Βρυξελλών μέσω της σήραγγας της Μάγχης, έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν:

- στη Γαλλία με ενάερια τροφοδοσία εναλλασσομένου ρεύματος 25.000 Volt,
- στο Βέλγιο με ενάερια τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος 3.000 Volt και
- στη Βρετανία με τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος 750 Volt μέσω τρίτης σιδηροτροχιάς.

Αμέσως μετά τη **στρατηγική** επιλογή τους να υιοθετήσουν την ηλεκτροκίνηση με εναλλασσόμενο ρεύμα τάσης 25.000 Volt σε νέες γραμμές ή σε γραμμές που δεν είχαν ηλεκτροκινηθεί προηγουμένως με ενάερια τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος 1.500 Volt, οι Γάλλοι τελειοποίησαν την τεχνολογία των **πολυρρευματικών** ηλεκτρικών κινητηρίων μονάδων.

2.4.3.10. Τεχνολογικές Εξελίξεις Εφαρμογής της Ηλεκτρονικής

Μετά το 1980, οι επιδόσεις και η οικονομικότητα τόσο των ντηζελαμαξών όσο και των ηλεκτραμαξών έχει βελτιωθεί σημαντικά, με την παρεμβολή **μικροϋπολογιστών** μεταξύ των χειριστηρίων μηχανοδότησης και των ζωτικών τμημάτων των κινητήρων. Οι μικροϋπολογιστές αυτοί εξασφαλίζουν ότι οι επιμέρους συνιστώσες αντιδρούν με τη μέγιστη αποδοτικότητα και ότι δεν επιβαρύνονται απερίσκεπτα.

Ένα άλλο προϊόν της εφαρμογής της Ηλεκτρονικής στα συστήματα ελέγχου είναι ότι, στη σύγχρονη ηλεκτράμαξα, ο μηχανοδηγός μπορεί να προσδιορίσει την ταχύτητα του τρένου, που θέλει να πετύχει ή να διατηρήσει, και ο εξοπλισμός έλξης θα εφαρμόσει ή τροποποιήσει αυτόματα την απαιτούμενη από τους ηλεκτροκινητήρες ισχύ, παίρνοντας υπόψη το βάρος του τρένου και την κατά μήκος κλίση της γραμμής.

Οι μικροεπεξεργαστές παρέχουν επίσης και διαγνωστικές υπηρεσίες, εποπτεύοντας συνεχώς την κατάσταση των υπό έλεγχο συστημάτων για ενδείξεις αρχόμενου ή επισυμβάντος σφάλματος. Οι μικροεπεξεργαστές είναι συνδεδεμένοι με τον κύριο υπολογιστή επί του τρένου, ο οποίος αναφέρει αμέσως τη φύση και τη θέση οποιασδήποτε δυσλειτουργίας σε οπτική ένδειξη στο θάλαμο μηχανοδότησης, εν γένει με συμβουλές προς το πλήρωμα της αμαξοστοιχίας, για τον τρόπο διόρθωσης ή προσωρινής άρσης των επιπτώσεων. Οι ίδιες ενδείξεις αναφέρουν επίσης τα

αποτελέσματα των διορθωτικών δράσεων που αναλήφθηκαν. Ο υπολογιστής αποθηκεύει αυτομάτως τις πληροφορίες αυτές, είτε για χρήση από το προσωπικό συντήρησης μετά το τέλος του ταξιδιού, ή, σε σιδηροδρόμους εφοδιασμένους με συστήματα επικοινωνίας με την επισκευαστική βάση, για άμεση μετάδοση στο μηχανοστάσιο, ώστε οι προετοιμασίες για την αποκατάσταση της βλάβης να έχουν ολοκληρωθεί με την άφιξη της μονάδας.

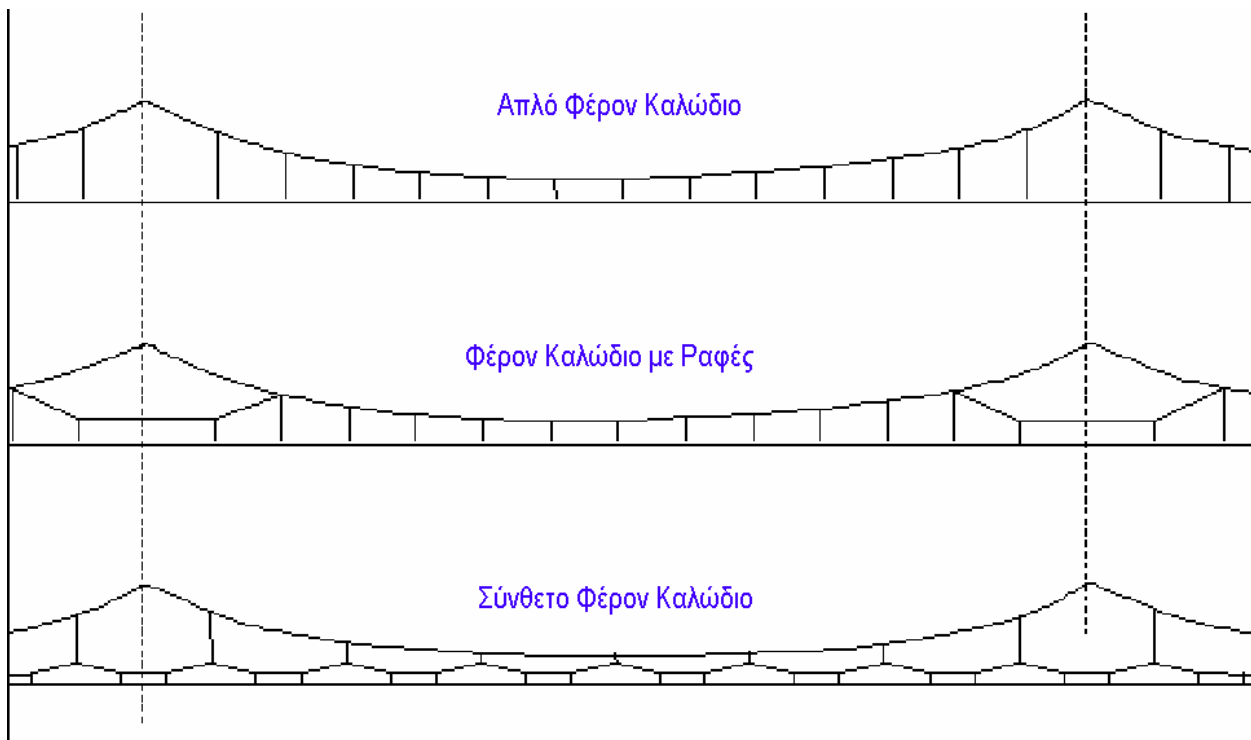
2.5. Στοιχεία συστήματος ηλεκτροκίνησης (εναέρια γραμμή)



Υποσταθμός Έλξης



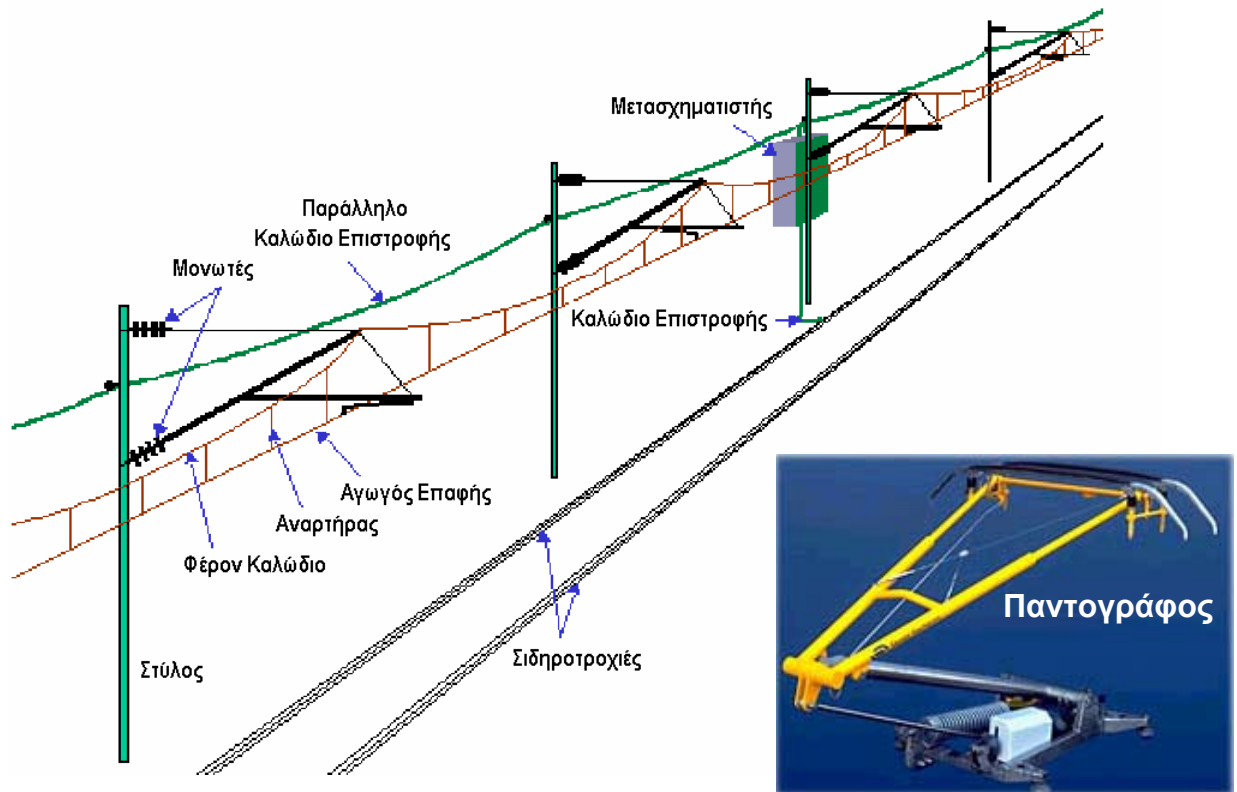
Υποσταθμός τροφοδοσίας έλξης 25kV 50Hz της γραμμής υψηλών ταχυτήτων Μαδρίτης - Σεβίλλης



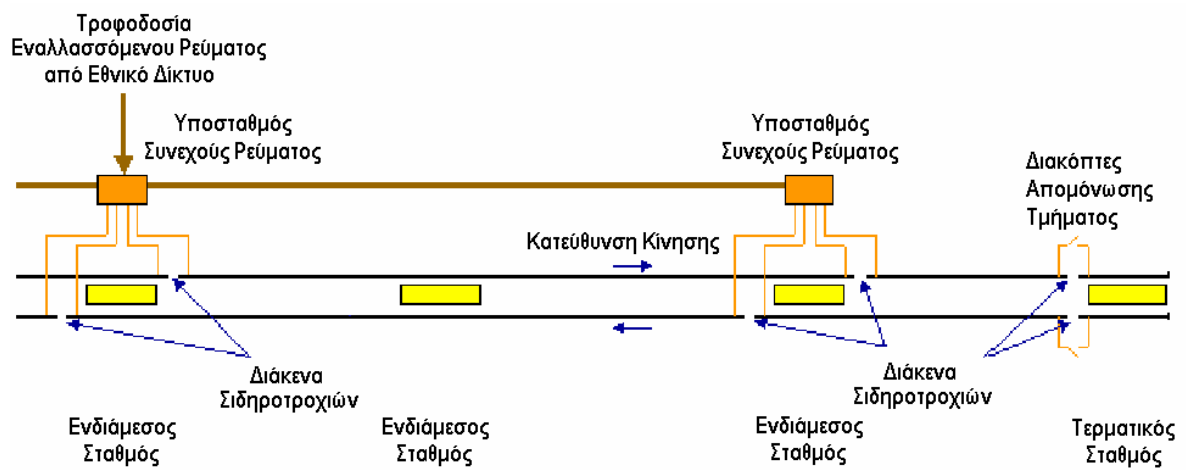
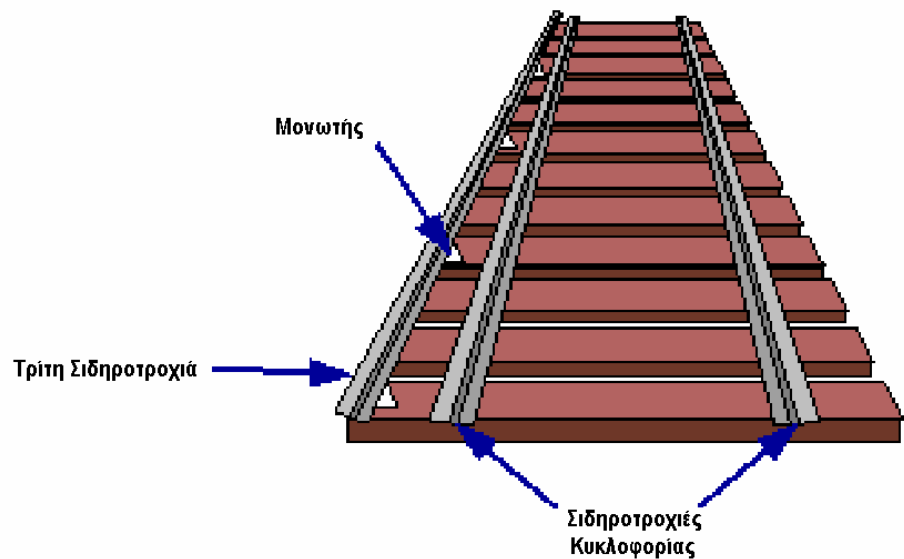
Στην εποχή μας χρησιμοποιούνται αγωγοί AWAC, οι οποίοι κατασκευάζονται από κεντρικό ανοξειδωτό χαλύβδινο πυρήνα, περιβαλλόμενο από στρώσεις αλουμινίου.

Το φέρον καλώδιο είναι λοιπόν τώρα ελαφρύτερο και οικονομικότερο.

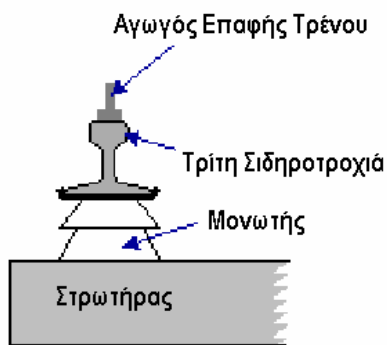
Το φέρον καλώδιο εγκαθίσταται με ονομαστική τάση 12 KN.



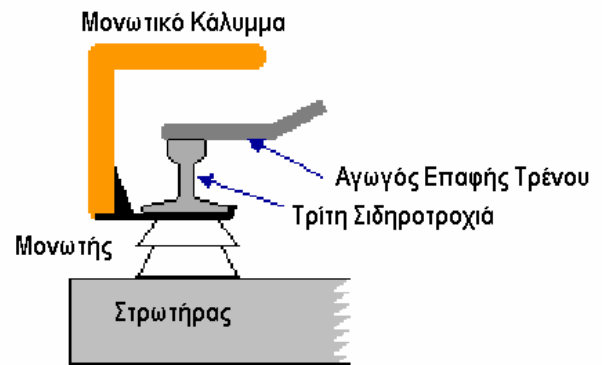
4.6. Στοιχεία Συστήματος Ηλεκτροκίνησης (Τρίτη Σιδηροτροχιά)



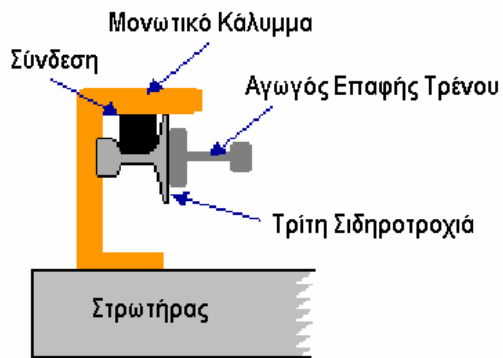
Απλοποιημένο Διάγραμμα Υποσταθμού Συνεχούς (DC) Τάσης για Τροφοδοσία Συστήματος Ηλεκτροκίνησης με Τρίτη Σιδηροτροχιά



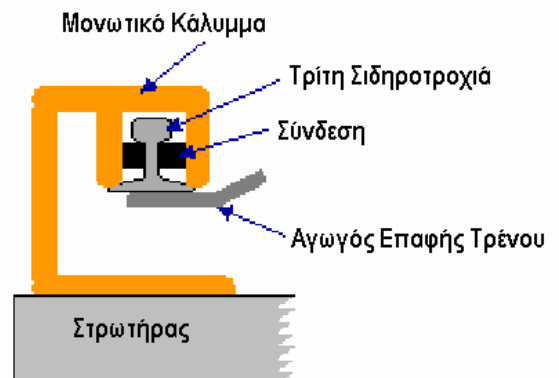
ΠΑΝΩ ΕΠΑΦΗ



ΠΑΝΩ ΕΠΑΦΗ ΜΕ ΚΑΛΥΜΜΑ



ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΕΠΑΦΗ



ΚΑΤΩ ΕΠΑΦΗ

