



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΠΡΩΣΗΣ ΜΕ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ
DIESEL**



ΑΝΔΡΕΑΣ ΑΓΓΕΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: **Ε.Γ. ΓΙΑΚΟΥΜΗΣ,**

ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

Πρόλογος

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ευάγγελο Γιακουμή για την ανάθεση του θέματος και για την συνεχή και πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης αυτής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Κ. Ρακόπουλο και τον καθηγητή κύριο Δ. Χουντάλα, οι οποίοι συνδιδάσκουν τα μαθήματα που αφορούν τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης. Η διδασκαλία τους μου κίνησε το ενδιαφέρον για την περαιτέρω ενασχόλησή μου με τη μελέτη των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξή τους σε κάθε μου βήμα και την όλη βοήθεια που μου έδωσαν σε όλη την μέχρι στιγμής εκπαίδευσή μου ως μαθητής και ως φοιτητής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ..... | 5 |
| Περίληψη..... | 9 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 10 |
| 1.1 Ιστορική Αναδρομή..... | 10 |
| 1.2 Κατηγοριοποίηση Σιδηροδρομικών Μηχανών Προωθητικής Ισχύος..... | 15 |
| 1.2.1 Ατμομηχανή..... | 15 |
| 1.2.2 Βενζίνης..... | 16 |
| 1.2.3 Diesel..... | 17 |
| 1.2.4 Ηλεκτρική..... | 18 |
| 1.2.5 Diesel-Electric..... | 19 |
| 1.2.6 Υβριδική..... | 25 |
| 1.2.7 Ατμο-Diesel Υβριδική..... | 26 |
| 1.2.8 Αεριοστρόβιλο-Ηλεκτρική (GTEL)..... | 27 |
| 1.2.9 Κυψελών Καυσίμου-Ηλεκτρική..... | 28 |
| 1.2.10 Πυρηνική-Ηλεκτρική..... | 29 |
| 1.3 Χρήση Σιδηροδρομικών Μηχανών..... | 30 |
| 1.4 Αμαξοστοιχίες Πολλαπλών Μονάδων MU (Multiple Units)..... | 32 |
| 1.4.1 Γενικά για τις Αμαξοστοιχίες Πολλαπλών Μονάδων (MU)..... | 32 |
| 1.4.2 Σύγκριση Αμαξοστοιχιών Συρόμενων από Σιδηροδρομική Μηχανή με Αμαξοστοιχιών MU..... | 33 |
| 2. ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ ΤΡΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL..... | 38 |

| | |
|---|-----|
| 2.1 Μηχανολογικό Μέρος Σιδηροδρομικών Συστημάτων..... | 38 |
| 2.1.1 Χαρακτηριστικά Κινητήρων Έλξης Diesel..... | 38 |
| 2.1.2 Ροπή και Ισχύς σε Σχέση με την Ταχύτητα Περιστροφής του Κινητήρα Diesel..... | 41 |
| 2.1.3 Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου σε Σχέση με την Ισχύ..... | 42 |
| 2.1.4 Μετάδοση Ισχύος..... | 43 |
| 2.1.5 Υδραυλική Μετάδοση Ισχύος..... | 46 |
| 2.1.6 Υδραυλική Ζεύξη..... | 47 |
| 2.1.7 Μετατροπείας Ροπής..... | 50 |
| 2.2 Ηλεκτρολογικό Μέρος Σιδηροδρομικών Συστημάτων..... | 59 |
| 2.2.1 Συσχέτιση Χαρακτηριστικών Κινητήρα Diesel και Γεννήτριας για την Επιλογή Κατάλληλης Ταχύτητας Περιστροφής..... | 59 |
| 2.2.2 Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος και οι Χαρακτηριστικές της.. | 61 |
| 2.2.3 Χαρακτηριστικές Λειτουργίας Κινητήρα Diesel Συνδεδεμένου με Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος..... | 67 |
| 2.2.4 Έλεγχος Lemp Σιδηροδρομικής Μηχανής..... | 77 |
| 2.2.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μεταγωγέα Γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος..... | 81 |
| 2.2.6 Powerline – Συστήματα Αυτοματισμού Σιδηροδρομικής Μηχανής της Εταιρείας MTU..... | 85 |
| 3. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΡΥΠΩΝ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΙ ΔΟΚΙΜΗΣ..... | 92 |
| 3.1 Προδιαγραφές Ρύπων Σιδηροδρομικών Κινητήρων..... | 92 |
| 3.2 Κύκλος Δοκιμής Σιδηροδρομικών Κινητήρων..... | 96 |
| 4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ..... | 98 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Δυνάμεις Αντίστασης Τρένου..... | 109 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Λειτουργία Μανέτας και Συστήματος Πρόωσης..... | 120 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 128 |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Λατινικοί χαρακτήρες

| | |
|-----------|--|
| a_g | βήμα μεταγωγέα, m |
| d_g | διάμετρος μεταγωγέα, m |
| d_h | διάμετρος πτερωτής της αντλίας, m |
| E_g | ηλεκτρεγερτική δύναμη, V |
| F_T | ελκτική δύναμη, N |
| I | ρεύμα, A |
| I_f | ρεύμα διέγερσης, A |
| I_g | ρεύμα γεννήτριας, A |
| I_{gc} | μέγιστο ρεύμα περιελίξεων μεταγωγέα = k_{g2} , A |
| I_{sh} | ρεύμα παράλληλων περιελίξεων, A |
| I_{sep} | ρεύμα ξένης διέγερσης περιελίξεων, A |

| | |
|-----------|---|
| I_{ser} | ρεύμα σειριακών περιελίξεων, A |
| I'_g | άνω όριο ρεύματος μεταγωγέα, A |
| l_g | μήκος τόξου μεταγωγέα, m |
| m_0 | μάζα αερίου στην είσοδο του κινητήρα, m |
| M | Μοριακή μάζα αερίου, kg/kmole |
| n | ταχύτητα περιστροφής κινητήρα, rpm |
| n_d | ταχύτητα περιστροφής των ζεύξεων των ατράκτων εξόδου, rpm |
| n_g | ταχύτητα περιστροφής για μέγιστη ισχύ εξόδου μηχανής, rpm |
| N'_g | άνω όριο αριθμού ελιγμάτων μεταγωγέα |
| P_h | μέγιστη ισχύς που απορροφά η αντλία, W |
| p_0 | πίεση στην είσοδο του κινητήρα, Pa |
| r | αντίσταση, Ω |
| r_g | πραγματική αντίσταση, Ω |
| R_m | γενική σταθερά των αερίων=8314,3 J/kmoleK |
| r_{sh} | συνολική αντίσταση παράλληλης περιέλιξης, Ω |
| T_0 | θερμοκρασία εισόδου του κινητήρα, K |
| T_{sh} | αριθμός ελιγμάτων παράλληλης περιέλιξης |
| T_{sep} | αριθμός ελιγμάτων ξένης διέγερσης περιέλιξης |
| T_{ser} | αριθμός ελιγμάτων σειριακής περιέλιξης |
| v | ταχύτητα αμαξοστοιχίας, m/s |
| V | τάση, V |
| V_b | τάση, V |
| v_b | ταχύτητα πτερυγίων αντλίας υδραυλικής μετάδοσης, m/s |
| v_f | ακτινική ή περιστροφική ταχύτητα στην υδραυλική μετάδοση, m/s |

| | |
|--------|---|
| v_g | περιφερειακή ταχύτητα μεταγωγέα, V |
| V_h | όγκος κυλίνδρου, m^3 |
| v_r | ταχύτητα ρευστού σχετική ως προς τα πτερύγια στην υδραυλική μετάδοση, m/s |
| v_w | εφαπτομενική ή περιστροφική ταχύτητα στην υδραυλική μετάδοση, m/s |
| v'_g | άνω όριο περιφερειακής ταχύτητας μεταγωγέα, V |
| w | βάρος του αέρα, N |

Ελληνικοί χαρακτήρες

| | |
|-------------|--|
| δ_t | αναλογία της μέγιστης ισχύς εξόδου που μπορεί να μεταδοθεί στους τροχούς |
| η | βαθμός απόδοσης του κινητήρα |
| η_t | βαθμός απόδοσης μετάδοσης |
| M_σ | ροπή του κινητήρα, Nm |
| φ_t | συντελεστής αξιοποίησης |

Συντομογραφίες

| | |
|-------|---|
| CAN | ελεγκτής δικτύου πολυπλεξίας (controller area network) |
| CI | ανάφλεξη με συμπίεση (compression ignition) |
| CAPOS | σύστημα χωρητικότητας ισχύος (capacity power system) |
| DEMU | πολλαπλή μονάδα diesel-electric (diesel-electric multiple unit) |
| DHMU | υδραυλική-diesel πολλαπλή μονάδα (diesel-hydraulic multiple unit) |
| DMMU | μηχανική-diesel πολλαπλή μονάδα (diesel-mechanical multiple unit) |

| | |
|------|--|
| DMU | πολλαπλή μονάδα diesel (diesel multiple unit) |
| ECU | μονάδα ελέγχου κινητήρα (engine control unit) |
| EGR | σύστημα επανακυκλοφορίας καυσαερίων (exhaust gas recirculation) |
| EFI | ηλεκτρονική έγχυση καυσίμου (electronic fuel injection) |
| EMF | ηλεκτρεγερτική δύναμη (electromotive force) |
| EMU | ηλεκτρική πολλαπλή μονάδα (electric multiple unit) |
| GER | αναλογία ενέργειας αερίου (gas energy ratio) |
| GSM | παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών (Global System for Mobile Communications, αρχικά Groupe Spécial Mobile) |
| GTEL | αεριοστρόβιλο-ηλεκτρική σιδηροδρομική μηχανή (gas turbine-electric locomotive) |
| IGBT | μονωμένη πύλη διπολικών τρανζίστορ (insulated-gate bipolar transistor) |
| MU | αμαξοστοιχία πολλαπλών μονάδων (multiple unit) |
| PAU | μονάδα αυτοματισμού ισχύος (Power automation unit) |
| PAU | μονάδα αυτοματισμού Powerline (Powerline automation unit) |
| PN | αριθμός σωματιδίων (particle number) |
| POM | στοιχείο ισχύος εξόδου (power output module) |
| RLL | κατηγορία κινητήρων σιδηροδρομικών μηχανών (rail locomotive) |
| RLR | κατηγορία κινητήρων αυτοκινητάμαξων (railcar) |
| SI | ανάφλεξη με σπινθήρα (spark ignition) |
| TGV | τρένο υψηλής ταχύτητας (Train à Grande Vitesse) |
| VVVF | μεταβαλλόμενη τάση, μεταβαλλόμενη συχνότητα (variable voltage, variable frequency) |

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται αρχικά μια ιστορική αναδρομή του σιδηρόδρομου, με αναφορά σε κάποια παραδείγματα σιδηροδρομικών μηχανών, οι οποίες είναι και από τις πρώτες που κατασκευάστηκαν ποτέ.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι σιδηροδρομικών μηχανών, ανάλογα με την μορφή της πηγής ενέργειας που χρησιμοποιούν και οι διάφορες κατηγορίες αμαξοστοιχιών, ανάλογα με τον σκοπό χρήσης τους.

Στο κυρίως μέρος της εργασίας αναλύονται το μηχανολογικό και το ηλεκτρολογικό μέρος μιας σιδηροδρομικής μηχανής με κινητήρα diesel και ηλεκτροκινητήρα. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το μηχανολογικό μέρος, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά κινητήρων έλξης, στην ροπή και την ισχύ, στην ειδική κατανάλωση καυσίμου, στους διάφορους τύπους μετάδοσης ισχύος, στην υδραυλική ζεύξη και στην μετατροπή ροπής. Για το ηλεκτρολογικό μέρος γίνεται αναφορά στην συσχέτιση χαρακτηριστικών του κινητήρα με την γεννήτρια, στα χαρακτηριστικά της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος, στη λειτουργία του κινητήρα συνδεδεμένου με την γεννήτρια, στον έλεγχο της σιδηροδρομικής μηχανής, στον μεταγωγέα της γεννήτριας και στο σύστημα Powerline της εταιρείας MTU.

Έπειτα γίνεται αναφορά στις προδιαγραφές και στους κύκλους δοκιμής των σιδηροδρομικών κινητήρων diesel σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα. Τέλος, δίνονται παραδείγματα σιδηροδρομικών κινητήρων diesel μαζί με ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, από διάφορες εταιρείες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

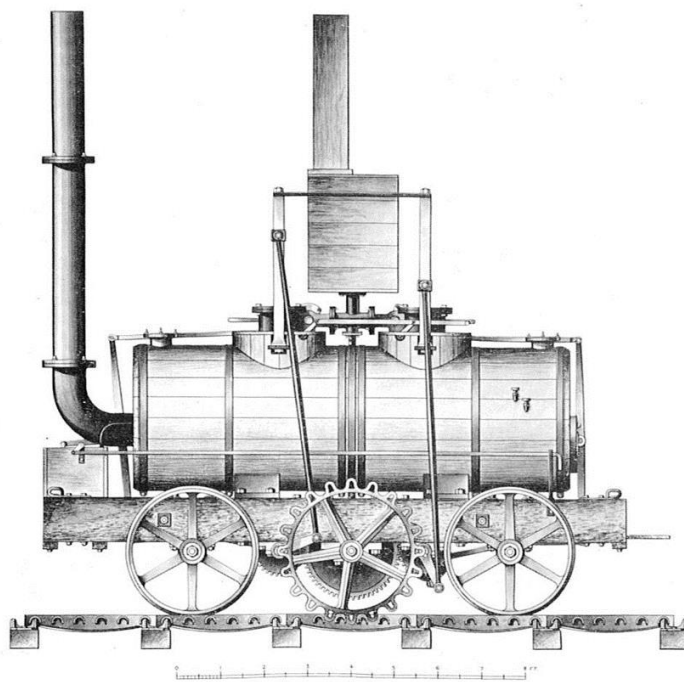
Ταξιδεύοντας σε οποιαδήποτε χώρα, μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι υπάρχει ένα δίκτυο σιδηρόδρομου το οποίο αντιπροσωπεύει ένα σύστημα χύδην μεταφοράς επιβατών και αγαθών. Μέχρι και το 1920, από τους σιδηροδρομικούς σταθμούς η ωφέλιμη ακτίνα συλλογής και διανομής ήταν περίπου 10 χιλιόμετρα, απόσταση η οποία φυσιολογικά καλυπτόταν από ένα άλογο και μία άμαξα, ενώ στις μέρες μας, με μηχανοκίνητα οχήματα, 50 χιλιόμετρα ή και παραπάνω είναι ένας λογικός αριθμός. Ωστόσο, ο σιδηρόδρομος είναι ακόμα, και πιθανόν πάντα να είναι σε κάποια μορφή, ο πιο αποτελεσματικός τρόπος χύδην μεταφοράς κατά μήκος των κύριων αρτηριών επικοινωνίας μεταξύ ή γύρω από τα κύρια κέντρα πληθυσμών, αν και η πιο «ρομαντική» αρχική εικόνα, στην οποία κάθε μεγάλο ταξίδι θεωρείτο ως μία περιπέτεια, έχει τώρα αντικατασταθεί από μία ωφελιμιστική ιδέα της «οριζόντιας μεταφοράς».

Οι λόγοι για τις παρούσες διαμορφώσεις των συστημάτων αυτών είναι, φυσικά, κυρίως ιστορικές, και επομένως αναφορά πρέπει να γίνει στην ιστορία για δικαιολόγηση των κύριων αποφάσεων πάνω στον σχεδιασμό.

Μια σιδηροδρομική μηχανή είναι ένα όχημα σιδηροδρομικών μεταφορών που παρέχει την κινητήρια ισχύ για ένα τρένο. Δεν έχει δικιά της χωρητικότητα

ωφέλιμου φορτίου, και μοναδικός της σκοπός είναι να μετακινεί το τρένο κατά το μήκος των γραμμών. Αντιθέτως, κάποια τρένα έχουν αυτοκινούμενα οχήματα τα οποία μεταφέρουν ωφέλιμο φορτίο και τα οποία δεν θεωρούνται ως σιδηροδρομικές μηχανές, αλλά μπορεί να αναφέρονται ως πολλαπλών μονάδων (multiple units) ή MU εν συντομία, αυτοκινητάμαξες. Η χρήση αυτών των αυτοκινούμενων οχημάτων είναι όλο και περισσότερο κοινή για επιβατικές αμαξοστοιχίες, ενώ χρησιμοποιούνται σπάνια για την μεταφορά εμπορευμάτων. Οχήματα τα οποία παρέχουν κινητήρια δύναμη για την μεταφορά ενός τρένου χωρίς δικιά τους ισχύ, και τα οποία έχουν χώρο ωφέλιμου φορτίου ή αποσυνδέονται σπάνια από την αμαξοστοιχία τους, δεν θεωρούνται γενικά μηχανές τρένου, αλλά βαγόνια ισχύος.

Οι πρώτες επιτυχημένες μηχανές τρένων κατασκευάστηκαν από τον Άγγλο εφευρέτη Richard Trevithick. Το 1804 η ατμομηχανή του μετέφερε ένα τρένο κατά μήκος των γραμμών τραμ από τα σιδηρουργεία Pendydarren, κοντά στο Merthyr Tydfil της Ουαλίας. Η πρώτη εμπορικά επιτυχημένη ατμομηχανή ήταν η οδοντωτή σιδηροδρομική μηχανή του Matthew Murray, Salamanca, που κατασκευάστηκε για την στενού εύρους σιδηροτροχιά της Middleton Railway το 1812 και η οποία φαίνεται στο Σχήμα 1.1.1. Στον Πίνακα 1.1 αναφέρονται κάποιες προδιαγραφές της σιδηροδρομικής μηχανής Salamanca.

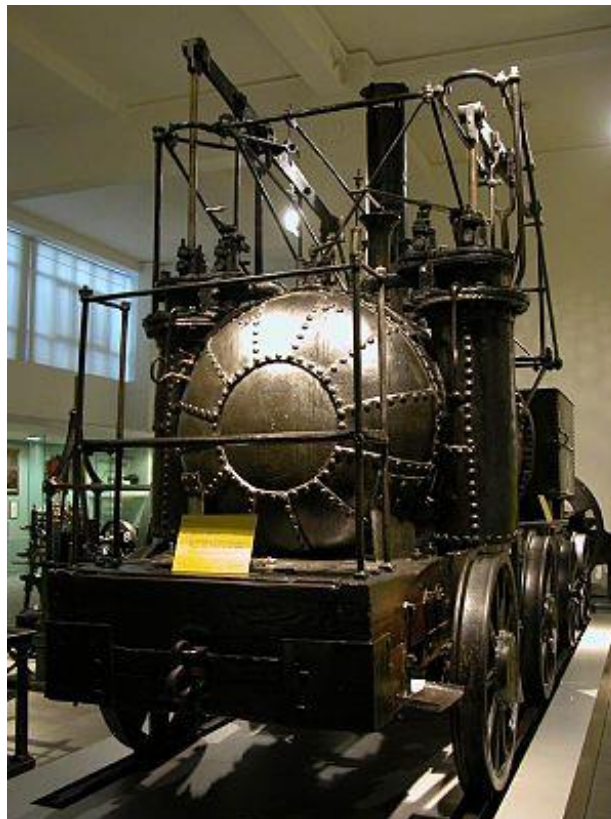


Σχήμα 1.1.1 Salamanca, 1812 [7]

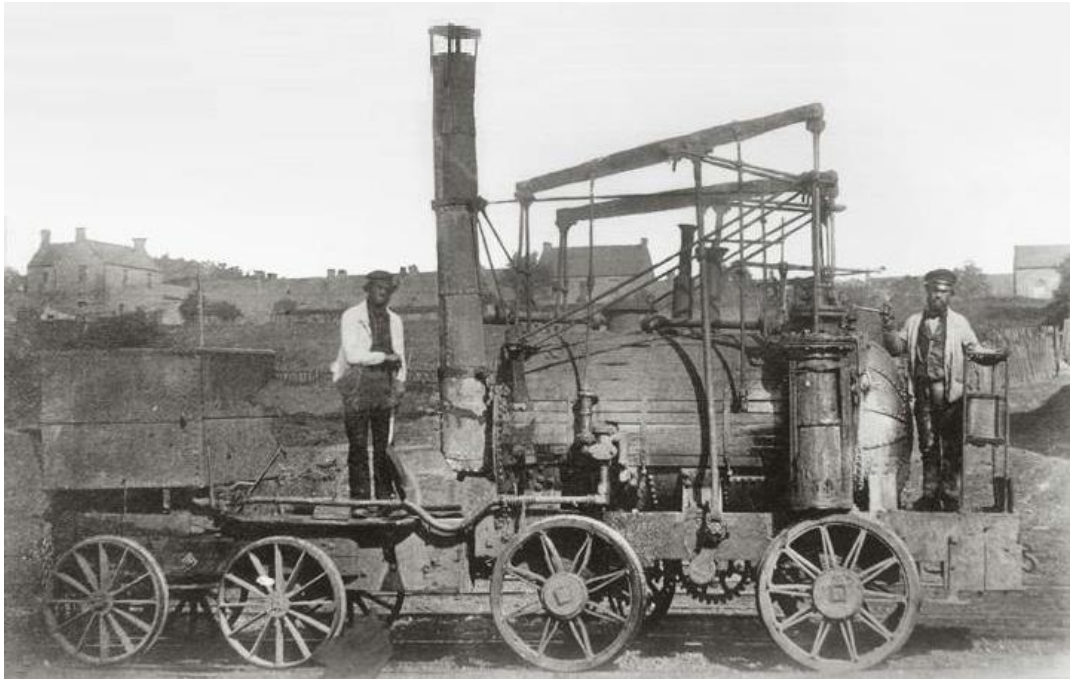
Πίνακας 1.1 Προδιαγραφές της σιδηροδρομικής μηχανής Salamanca [7]

| Προδιαγραφές | |
|------------------------------|---------|
| Πλάτος ραγών | 1.245 m |
| Βάρος σιδηροδρομικής μηχανής | 5 t |

Ακολούθησε η κατασκευή του Puffing Billy από τον μηχανικό William Hedley, τον τεχνίτη Jonathan Forster και τον σιδηρουργό Timothy Hackworth για τον Christopher Blackett, ιδιοκτήτη του ανθρακωρυχείου στο Wylam κοντά στο Newcastle της Αγγλίας. Αυτή είναι η πρώτη επιτυχής ατμομηχανή που κινείται μόνο μέσω πρόσφυσης και η οποία φαίνεται στο Σχήμα 1.1.2 και 1.1.3. Η Puffing Billy βρίσκεται τώρα στο Μουσείο Επιστήμης του Λονδίνου και είναι η παλαιότερη σωζόμενη ατμομηχανή τρένου. Στον Πίνακα 1.2 αναφέρονται κάποιες προδιαγραφές της σιδηροδρομικής μηχανής Puffing Billy [6].



Σχήμα 1.1.2 Puffing Billy, μπροστινή όψη [8]

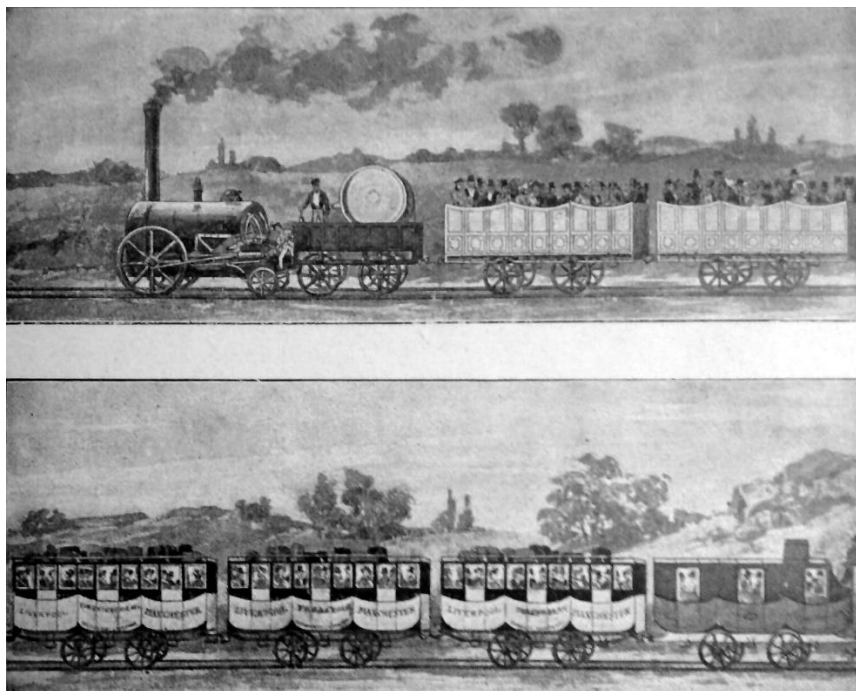


Σχήμα 1.1.3 Puffing Billy, 1862 [8]

Πίνακας 1.2 Προδιαγραφές της σιδηροδρομικής μηχανής Puffing Billy [8]

| Προδιαγραφές | |
|---------------------|----------------------|
| Εύρος σιδηροτροχιών | 1.524 m |
| Διάμετρος οδηγού | 0.991 m |
| Βάρος μηχανής | $8.38 \cdot 10^3$ kg |
| Τύπος καυσίμου | Γαϊάνθρακας |
| Πίεση λέβητα | 0.34 MPa |
| Κύλινδροι | 2 |
| Μέγεθος κυλίνδρου | 0.229 mm × 0.914 mm |
| Στοιχεία επιδόσεων | |
| Μέγιστη Ταχύτητα | 2.2m/s |

Το 1814 ο George Stephenson, εμπνευσμένος από τις πρώτες σιδηροδρομικές μηχανές των Trevithick και Hedley έπεισε τον διευθυντή του ανθρακωρυχείου στο Killinworth, όπου εργαζόταν, να του επιτρέψει να κατασκευάσει μια μηχανή κινούμενη με ατμό. Έτσι κατασκεύασε την Blücher, μια από τις πρώτες σιδηροδρομικές μηχανές με φλαντζωτούς τροχούς πρόσφυσης. Ο Stephenson έπαιξε βασικό ρόλο στην ανάπτυξη και την ευρεία υιοθέτηση σιδηροδρομικών ατμομηχανών. Το 1825 κατασκεύασε την Locomotion για τον σιδηρόδρομο μεταξύ του Stockton και Darlington, βορειοανατολικά της Αγγλίας, ο οποίος έγινε ο πρώτος δημόσιος σιδηρόδρομος. Το 1829 κατασκεύασε την The Rocket η οποία εισήχθη και νίκησε στο Rainhill Trials. Αυτή η επιτυχία οδήγησε τον Stephenson στο να ιδρύσει την εταιρεία του ως την κατ' εξοχήν κατασκευαστική σιδηροδρομικών ατμομηχανών που χρησιμοποιήθηκαν στους σιδηρόδρομους του Ηνωμένου Βασιλείου, των Ηνωμένων Πολιτειών και σε μεγάλο μέρος της Ευρώπης. Ο πρώτος υπεραστικός επιβατικός σιδηρόδρομος μεταξύ της Liverpool και της Manchester, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.4, άνοιξε το 1830, κάνοντας αποκλειστική χρήση ισχύος ατμού και για επιβατική και για εμπορική αμαξοστοιχία [6].



Σχήμα 1.1.4 Πρώτος ατμοκίνητος επιβατικός σιδηρόδρομος [6]

1.2 Κατηγοριοποίηση Σιδηροδρομικών Μηχανών

Πρωθητικής Ισχύος

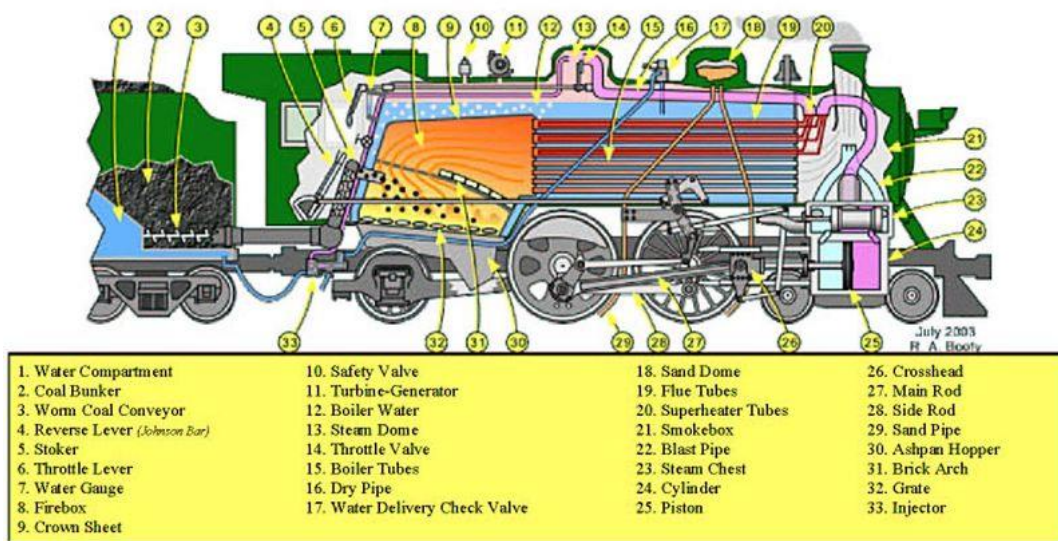
Οι σιδηροδρομικές μηχανές μπορεί να παράγουν την ισχύ τους από κάποιο καύσιμο (ξύλο, άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κ.α.) ή μπορεί να πάρουν ισχύ από μια εξωτερική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι σύνηθες να ταξινομούνται οι σιδηροδρομικές μηχανές σύμφωνα με την πηγή ενέργειάς τους. Οι συνηθέστεροι τύποι σιδηροδρομικών μηχανών είναι [6]:

1.2.1 Ατμομηχανή

Τον 19^ο αιώνα οι πρώτες σιδηροδρομικές μηχανές τροφοδοτούνταν με ατμό, ο οποίος συνήθως παραγόταν από την καύση ξύλου, άνθρακα ή πετρελαίου. Αυτές οι μηχανές αναφέρονται συχνά ως «ατμομηχανές». Η μηχανή αυτή παρέμεινε με διαφορά η πιο διαδεδομένη μέχρι και μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο.

Πριν από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, οι σιδηροδρομικές ατμομηχανές άρχισαν να αντικαθίσταντο από ηλεκτρικές ή diesel-electric σιδηροδρομικές μηχανές. Οι σιδηροδρομικές ατμομηχανές είναι λιγότερο αποδοτικές σε σχέση με τις αντίστοιχες πιο σύγχρονες ηλεκτρικές ή τις diesel-electric και απαιτούν πολύ μεγαλύτερο ανθρώπινο δυναμικό για την λειτουργία και την συντήρησή τους. Σύμφωνα με Βρετανικά στοιχεία, το κόστος της στελέχωσης και της τροφοδότησης σιδηροδρομικών ατμομηχανών ήταν περίπου δυόμισι φορές μεγαλύτερο από αυτό της diesel αλλά και η ημερήσια απόσταση που μπορούσε να διανύσει ήταν πολύ μικρότερη. Μέχρι και τα τέλη του 1960 και του 1970, οι περισσότερες δυτικές χώρες είχαν αντικαταστήσει εντελώς της σιδηροδρομικές ατμομηχανές για την μεταφορά επιβατών, ενώ στην μεταφορά εμπορευμάτων αντικαταστάθηκαν αργότερα. Επίσης έχουν δοκιμαστεί και άλλοι τύποι μηχανών, όπως αεριοστρόβιλοι, αλλά δεν χρησιμοποιήθηκαν ευρέως, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους καυσίμου. Στο Σχήμα 1.2.1 φαίνεται ένα γενικό διάγραμμα μιας σιδηροδρομικής ατμομηχανής, στο οποίο διακρίνονται ο χώρος αποθήκευσης καυσίμου, ο θάλαμος καύσης, οι σωληνώσεις στις οποίες κυκλοφορεί το καυσαέριο, το κύκλωμα νερού-ατμού, η καμινάδα και το έμβολο που με την πίεση του ατμού κινεί παλινδρομικά τους τροχούς της αμαξοστοιχίας.

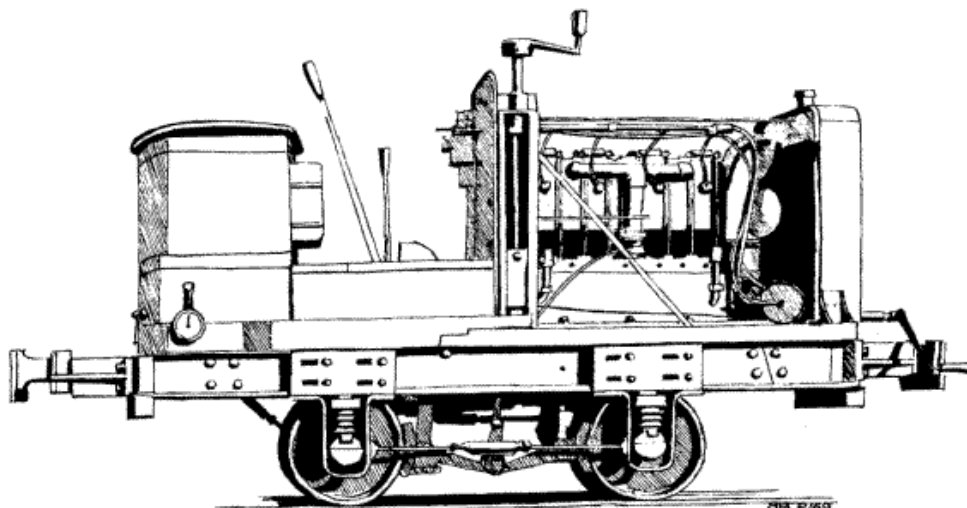
Steam Locomotive Workings Illustration



Σχήμα 1.2.1 Διάγραμμα Σιδηροδρομικής Ατμομηχανής [9]

1.2.2 Βενζίνης

Βενζινοκίνητες σιδηροδρομικές μηχανές ξεκίνησαν να παράγονται από τις αρχές του 1900. Εν γένει, πάντως, λόγω του μικρού βαθμού απόδοσης των κινητήρων, δεν γνώρισαν ιδιαίτερη άνθηση. Στο Σχήμα 1.2.2 απεικονίζεται μια τέτοια σιδηροδρομική μηχανή που χρησιμοποιούσε βενζίνη ως καύσιμο.



Σχήμα 1.2.2 Σιδηροδρομική Μηχανή Βενζίνης με 4-Χ, τετρακύλινδρο υδρόψυκτο κινητήρα, 1910 [10]

1.2.3 Diesel

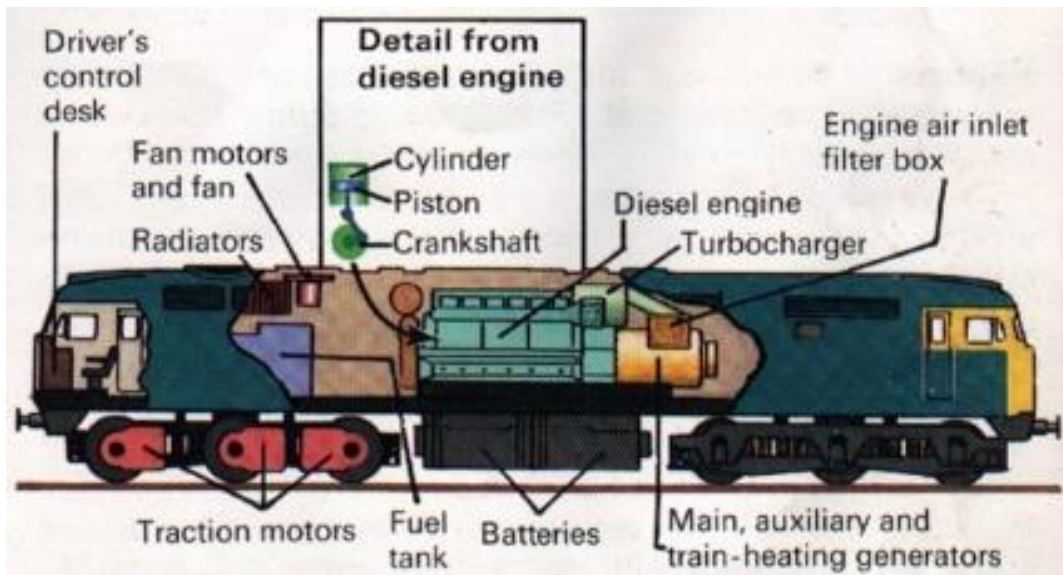
Πειραματικές σιδηροδρομικές μηχανές diesel κατασκευάστηκαν πρώτη φορά αμέσως μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο. Στην δεκαετία του 1940, άρχισαν να παίρνουν την θέση των σιδηροδρομικών ατμομηχανών. Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, η πρόωση από κινητήρες diesel έκανε την εμφάνισή της σε σιδηρόδρομους σε πολλές χώρες. Η σημαντικά οικονομικότερη λειτουργία των κινητήρων diesel έδωσε το έναυσμα για την καθιέρωσή τους στα τρένα, μια διαδικασία γνωστή και ως *Dieselization*.

Όπως συμβαίνει και με κάθε όχημα που τροφοδοτείται από ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης, οι σιδηροδρομικές μηχανές diesel απαιτούν ένα σύστημα μετάδοσης ισχύος για να συνδέσουν την "έξοδο" του κινητήρα με τους κινητήριους τροχούς. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν το ηλεκτρικό, το υδραυλικό και το μηχανικό σύστημα μετάδοσης ισχύος με διάφορους βαθμούς επιτυχίας. Τελικά, από τα τρία επικράτησε η ηλεκτρική μετάδοση ισχύος και παρόλο που οι σιδηροδρομικές μηχανές diesel με υδραυλική μετάδοση ισχύος παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα και χρησιμοποιούνται σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες, οι πιο μοντέρνες σιδηροδρομικές μηχανές diesel έχουν ηλεκτρικό σύστημα μετάδοσης ισχύος.

Οι σιδηροδρομικές μηχανές diesel απαιτούν σημαντικά λιγότερη συντήρηση από τις σιδηροδρομικές ατμομηχανές, επομένως χρειάζονται και λιγότερο προσωπικό. Οι πιο καλές σιδηροδρομικές ατμομηχανές απαιτούσαν κατά μέσο όρο τρεις με πέντε μέρες το μήνα στο συνεργείο για συντήρηση ρουτίνας. Επίσης, συχνές ήταν οι βαριές γενικές επισκευές, όπου συνήθως συμπεριλάμβαναν την απομάκρυνση του λέβητα για μεγάλες επισκευές. Αντιθέτως, μια τυπική σιδηροδρομική μηχανή diesel δεν απαιτεί περισσότερο από οκτώ έως δέκα ώρες το μήνα για συντήρηση ρουτίνας ενώ μπορεί να λειτουργεί για πολλά χρόνια μέχρι να χρειαστεί κάποια γενική επισκευή [6].

Οι μοντέρνες μονάδες diesel δεν ρυπαίνουν τόσο όσο οι αντίστοιχες μονάδες ατμού και παράγουν χαμηλά επίπεδα εκπομπών καυσαερίων (βλ. Κεφάλαιο 3).

Στο Σχήμα 1.2.3 απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα μιας σιδηροδρομικής μηχανής diesel.



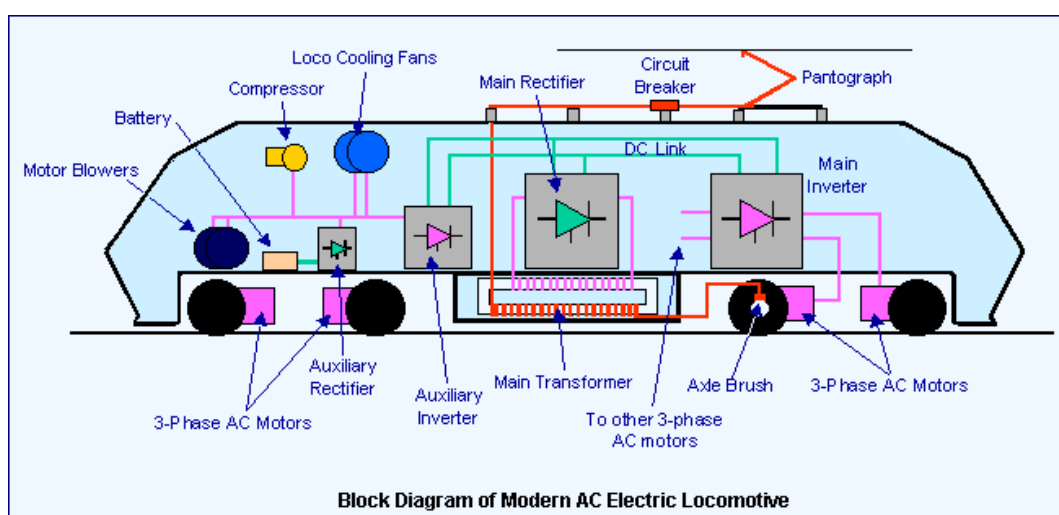
Σχήμα 1.2.3 Σιδηροδρομική Μηχανή Diesel [11]

1.2.4 Ηλεκτρική

Η ηλεκτρική σιδηροδρομική μηχανή τροφοδοτείται εξωτερικά με ηλεκτρική ενέργεια. Ενώ το κόστος κεφαλαίου ηλεκτροδότησης των γραμμών είναι υψηλό, τα ηλεκτρικά τρένα και οι ηλεκτρικές σιδηροδρομικές μηχανές είναι ικανές να πετύχουν υψηλότερες αποδόσεις και να έχουν χαμηλότερο κόστος λειτουργίας από ότι οι σιδηροδρομικές ατμομηχανές και οι σιδηροδρομικές μηχανές diesel. Οι ηλεκτρικές σιδηροδρομικές μηχανές, επειδή τείνουν να είναι λιγότερο σύνθετες τεχνολογικά από ότι οι αντίστοιχες diesel-electric (επόμενη παράγραφος), είναι και ευκολότερο και φθηνότερο να συντηρηθούν και έχουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, συνήθως μέχρι και 40 και 50 χρόνια. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα ηλεκτρικών σιδηροδρομικών μηχανών που λειτουργούν για πάνω από μισό αιώνα με ελάχιστες γενικές επισκευές και δεν είναι ασυνήθιστο για τέτοιες ηλεκτρικές μηχανές να λειτουργούν κοντά στην εκατονταετηρίδα τους. Η τελευταία μονάδα του ιταλικού E626, παρουσιάστηκε το 1928 και αποσύρθηκε 71 χρόνια μετά, το 1999. Από την άλλη πλευρά, ένα γαλλικό TGV κατέχει το παγκόσμιο ρεκόρ για το ταχύτερο τροχοφόρο τρένο, φτάνοντας τα 574.8 km/h στις 3 Απριλίου 2007.

Μερικές ηλεκτρικές σιδηροδρομικές μηχανές μπορούν επίσης να λειτουργήσουν με μπαταρίες κυρίως για κοντινές αποστάσεις ή για την

μετακίνησή τους σε μη ηλεκτροδοτούμενες γραμμές ή αποθήκες. Επίσης χρησιμοποιούνται σε ορυχεία ή σε άλλες υπόγειες τοποθεσίες όπου τα καυσαέρια από κινητήρες diesel θα καθιστούσαν επικίνδυνες τις συνθήκες δουλειάς στο προσωπικό και όπου εξωτερικές παροχές ηλεκτρικής ενέργειας θα δημιουργούσαν κίνδυνο σπινθηρισμού αναφλέγοντας εύφλεκτα αέρια. Ακόμα, χρησιμοποιούνται σε γραμμές μετρό για εργασίες συντήρησης και σε περιοχές όπου η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος έχει προσωρινά αποσυνδεθεί [6]. Στο Σχήμα 1.2.4 φαίνεται ένα σχεδιάγραμμα μιας τυπικής ηλεκτρικής σιδηροδρομικής μηχανής.



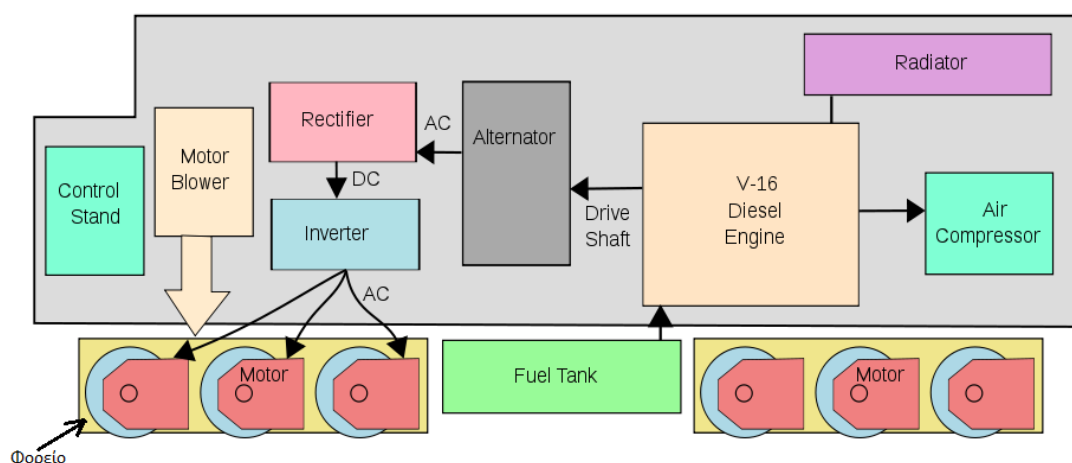
Σχήμα 1.2.4 Σχεδιάγραμμα ηλεκτρικής σιδηροδρομικής μηχανής [14]

1.2.5 Diesel-Electric

1.2.5.1 Σιδηροδρομική Μηχανή Diesel-Electric

Σε μια σιδηροδρομική μηχανή diesel-electric, ο κινητήρας diesel κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ή ένα ηλεκτρικό εναλλακτήρα-ανορθωτή εναλλασσόμενου ρεύματος του οποίου η έξοδος παρέχει ισχύ στους κινητήρες έλξης. Δεν υπάρχει καμία μηχανική σύνδεση μεταξύ του κινητήρα diesel και των τροχών. Τα κύρια στοιχεία της πρόωσης diesel-electric είναι ο κινητήρας diesel, η κύρια γεννήτρια ή εναλλακτήρας-ανορθωτής, γενικά τέσσερις (τετραξονικό) ή έξι (εξαξονικό) κινητήρες έλξης, και ένα σύστημα ελέγχου το οποίο αποτελείται από τον ρυθμιστή στροφών του

κινητήρα καθώς και από ηλεκτρικά και/ή ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ή τη ρύθμιση της ηλεκτρικής τροφοδοσίας στους κινητήρες έλξης, συμπεριλαμβανομένων των διακοπών, των ανορθωτών και άλλων στοιχείων. Στην απλούστερη περίπτωση, η γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τους κινητήρες με έναν απλό διακόπτη. Στο Σχήμα 1.2.5α απεικονίζεται ένα διάγραμμα με την διάταξη μιας σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric.



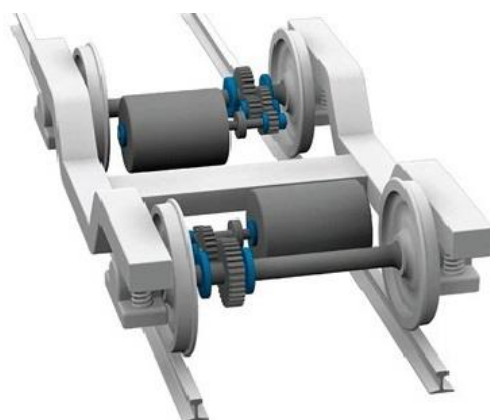
- 1) Ο κινητήρας μπορεί να είναι V-12, V-16 ή V-20
- 2) Ο κινητήρας κινεί είτε ένα εναλλακτήρα (AC) είτε μια γεννήτρια (DC)
- 3) Η ισχύς εξόδου του εναλλακτήρα ή της γεννήτριας τροφοδοτούν τους κινητήρες έλξης
- 4) Οι κινητήρες έλξης είναι είτε DC είτε AC και δίνουν την κίνηση στην αμαξοστοιχία
- 5) Ο ανεμιστήρας ψύχει τους κινητήρες έλξης

Σχήμα 1.2.5α Σχηματικό διάγραμμα σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric

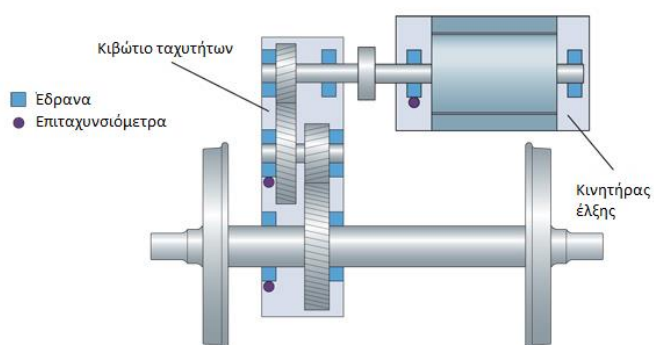
[15]

Ο κινητήρας έλξης είναι ένας ηλεκτρικός κινητήρας ο οποίος χρησιμοποιείται για την προώθηση της ηλεκτρικής σιδηροδρομικής μηχανής. Γενικά, χρησιμοποιείται και σε άλλες εφαρμογές όπως ανελκυστήρες, λεωφορεία τρόλεϊ, κ.α. Στον σιδηρόδρομο χρησιμοποιούνται παραδοσιακά κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψύκτρεις με σειριακή περιέλιξη, λειτουργώντας συνήθως στα 600 V. Η διαθεσιμότητα των υψηλής ισχύος ημιαγωγών (όπως θυρίστορ και IGBT), έχουν κάνει πλέον πρακτική την χρήση απλούστερων, πιο αξιόπιστων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος γνωστοί και ως ασύγχρονοι κινητήρες έλξης. Περιστασιακά χρησιμοποιούνται σύγχρονοι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως για παράδειγμα στο

γαλλικό TGV [12]. Στο Σχήματα 1.2.5β και 1.2.5γ φαίνεται η σύνδεση του κινητήρα έλξης με τον άξονα των τροχών της αμαξοστοιχίας.



Σχήμα 1.2.5β Εφαρμογή κινητήρων έλξης σε σιδηρόδρομο [13]



Σχήμα 1.2.5γ Σύνδεση κινητήρα έλξης, κιβωτίου ταχυτήτων και άξονα τροχών [13]

Αρχικά, οι κινητήρες έλξης και η γεννήτρια ήταν μηχανές συνεχούς ρεύματος. Μετά την ανάπτυξη των ανορθωτών πυριτίου υψηλής χωρητικότητας την δεκαετία του 1960, η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος αντικαταστάθηκε από έναν εναλλακτήρα συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιώντας μια γέφυρα διόδου για την μετατροπή της εξόδου του σε συνεχές ρεύμα. Αυτή η πρόοδος βελτίωσε σημαντικά την αξιοπιστία των σιδηροδρομικών μηχανών και μείωσε τα κόστη συντήρησης των γεννητριών εξαλείφοντας την χρήση μεταγωγέα και των ψυκτρών της γεννήτριας. Αυτό με την σειρά του εκμηδένιζε την πιθανότητα ανάφλεξης η οποία θα κατέστρεφε την γεννήτρια και το μηχανοστάσιο.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, η ανάπτυξη μετάδοσης κίνησης της υψηλής ισχύος μεταβλητής συχνότητας/μεταβλητής συχνότητας (VVVF), ή αλλιώς «αναστροφείς έλξης», επέτρεψαν την χρήση πολυφασικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, εξαλείφοντας έτσι την χρήση μεταγωγέα και ψυκτρών του κινητήρα. Το αποτέλεσμα ήταν πιο αποδοτική και αξιόπιστη μετάδοση κίνησης που απαιτούσε σχετικά μικρή συντήρηση και ήταν πιο ικανή να ανταπεξέλθει σε συνθήκες υπερφόρτωσης που συχνά ήταν καταστροφικές για παλαιότερους τύπους κινητήρων [15].

Οι σιδηροδρομικές μηχανές diesel-electric είναι συνήθως εξοπλισμένες με «δυναμικά φρένα» που χρησιμοποιούν τους κινητήρες έλξης ως ηλεκτρικές γεννήτριες κατά την διάρκεια της πέδησης ώστε να βοηθήσουν στον έλεγχο της ταχύτητας της αμαξοστοιχίας σε φθίνουσα κλίση. Αυτή η τεχνολογία είναι παρόμοια με αυτή της αναγεννητικής πέδησης στα υβριδικά αυτοκίνητα, με βασική διαφορά ότι η δυναμική πέδηση δεν αποθηκεύει την παραγόμενη ενέργεια, αλλά την καθοδηγεί στους αντιστάτες και στην συνέχεια μετατρέπεται σε απορριπτόμενη θερμότητα (βλ. παράγραφο 1.2.6.4) [6].

1.2.5.2 Μετάδοση Ισχύος Diesel-Electric

Η μετάδοση ισχύος diesel-electric χρησιμοποιείται από ορισμένους τύπους οχημάτων και πλοίων για παροχή κίνησης. Ένα σύστημα μετάδοσης diesel-electric περιλαμβάνει ένα κινητήρα diesel που συνδέονται με μια ηλεκτρική γεννήτρια, δημιουργώντας ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί ηλεκτρικούς κινητήρες έλξης χωρίς να απαιτείται η χρήση συμπλέκτη.

Αυτό το είδος μετάδοσης ισχύος χρησιμοποιείται από diesel-electric σιδηροδρομικές μηχανές και diesel-electric MU, καθώς οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν την ικανότητα να δίνουν την μέγιστη ροπή τους σε μηδενικές στροφές του κινητήρα. Συστήματα diesel-electric χρησιμοποιούνται επίσης σε υποβρύχια, πλοία και χερσαία οχήματα.

Επίσης, σε μερικές εφαρμογές υψηλής απόδοσης, ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Σε μια τέτοια περίπτωση, το συγκεκριμένο όχημα μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στην κατηγορία των hybrid-electric [16].

1.2.5.3 Έλεγχος Diesel-Electric

Η ισχύς εξόδου μιας σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας με την οποία κινείται η αμαξοστοιχία, εφόσον και το ρεύμα και η τάση της γεννήτριας της μονάδας δεν ξεπερνούν κάποια όρια. Επομένως, η ικανότητα της μονάδας να αναπτύξει ελκτική δύναμη (η οποία είναι αυτή που δίνει ώθηση στο τρένο), θα τείνει να είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας μεταξύ αυτών των ορίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα Β.2 του Παραρτήματος Β. Η διατήρηση αποδεκτών παραμέτρων λειτουργίας ήταν ένας από τους κύριους παράγοντες σχεδίασης που έπρεπε να καθοριστούν στην αρχή της ανάπτυξης των σιδηροδρομικών μηχανών diesel-electric και που τελικά οδήγησε σε πολύπλοκα συστήματα ελέγχου στις σύγχρονες μονάδες (βλ. Παράγραφο 2.2.6) [15].

1.2.5.4 Δυναμική Πέδηση

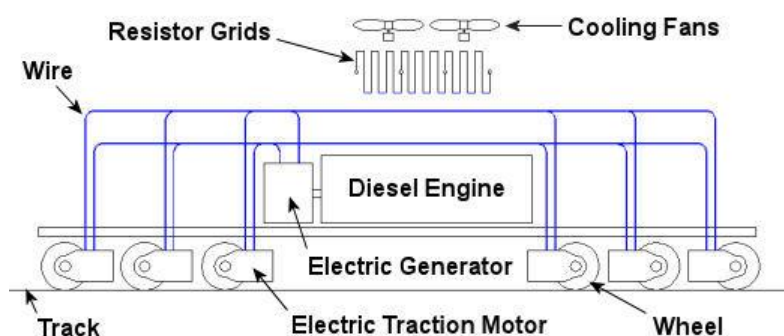
Στις σιδηροδρομικές μηχανές diesel-electric είναι συνήθης η εφαρμογή της δυναμικής (ρεοστατικής) πέδησης. Η δυναμική πέδηση εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι οι οπλισμοί των κινητήρων έλξης περιστρέφονται πάντα όταν η σιδηροδρομική μηχανή είναι σε κίνηση και ότι ο κινητήρας μπορεί να ενεργήσει ως γεννήτρια διεγείροντας ξεχωριστά τις περιελίξεις πεδίου. Όταν χρησιμοποιείται η δυναμική πέδηση, τότε τα κυκλώματα ελέγχου έλξης διαμορφώνονται έτσι ώστε: 1) οι περιελίξεις πεδίου κάθε κινητήρα έλξης να συνδέονται κατά μήκος της κύριας γεννήτριας, 2) ο οπλισμός κάθε κινητήρα έλξης να είναι συνδεδεμένος κατά μήκος ενός πλέγματος αντίστασης (του πλέγματος δυναμικής πέδησης) εξαναγκασμένης αερόψυξης που βρίσκεται στην οροφή της σιδηροδρομικής μηχανής και 3) οι στρόφες του κινητήρα diesel της σιδηροδρομικής μηχανής να αυξάνονται και το πεδίο της κύριας γεννήτριας να διεγείρεται, προκαλώντας μια αντίστοιχη διέγερση των πεδίων των κινητήρων έλξης.

Το συνολικό αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να αναγκαστεί κάθε κινητήρας έλξης να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και να την διαχέει ως θερμότητα στο πλέγμα δυναμικής πέδησης. Ένας ανεμιστήρας που συνδέεται κατά μήκος του πλέγματος παρέχει εξαναγκασμένη αερόψυξη. Συνεπώς, ο ανεμιστήρας τροφοδοτείται από τους κινητήρες έλξης και θα τείνει να κινείται

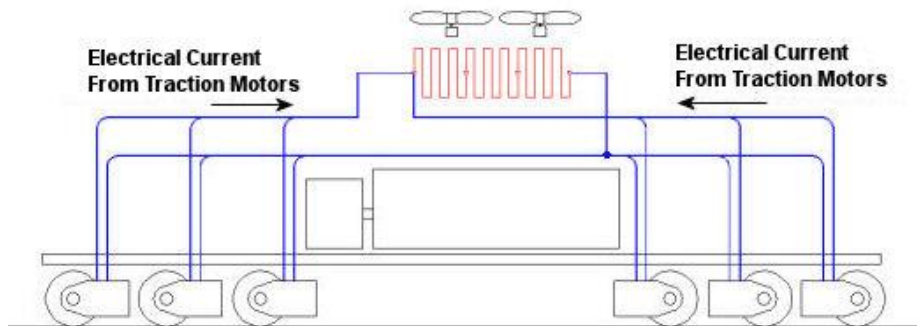
πιο γρήγορα και να παράγει μεγαλύτερη ροή αέρα όσο θα αυξάνεται η ενέργεια που εφαρμόζεται στο πλέγμα.

Τελικά, η πηγή της ενέργειας που διαχέεται στο δυναμικό πλέγμα πέδησης είναι η κίνηση της σιδηροδρομικής μηχανής, όπως προσδίδεται στους οπλισμούς του κινητήρα έλξης. Ως εκ τούτου, οι κινητήρες έλξης επιβάλλουν έλξη και η ατμομηχανή δρα ως φρένο. Όσο μειώνεται η ταχύτητα, η αποτελεσματικότητα της πέδησης μειώνεται, και συνήθως καθίσταται αναποτελεσματική κάτω από περίπου 16 χλμ/ώρα (10 mph), ανάλογα με τη σχέση μετάδοσης μεταξύ των κινητήρων έλξης και των αξόνων.

Η δυναμική πέδηση είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη σε αμαξοστοιχίες που κινούνται σε ορεινές περιοχές, όπου και υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να σταματήσει η λειτουργία της πέδησης λόγω της υπερθέρμανσης των φρένων κατά την κάθοδο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η δυναμική πέδηση συνήθως συνδυάζεται με αερόφρενα, ενώ το συνδυασμένο αποτέλεσμα αναφέρεται και ως μικτή πέδηση. Η χρήση μικτής πέδησης μπορεί επίσης να βοηθήσει στην χαλαρότητα μιας μεγάλης αμαξοστοιχίας η οποία τεντώνεται όταν ανεβαίνει σε ανηφορικό έδαφος, συμβάλλοντας στην πρόληψη ενός απότομου μαζέματος της χαλαρότητας της αμαξοστοιχίας ικανό να προκαλέσει εκτροχιασμό. Η μικτή πέδηση χρησιμοποιείται συχνά και στους προαστιακούς σιδηρόδρομους με σκοπό την μείωση της φθοράς και το σκίσιμο των μηχανικών φρένων το οποίο είναι ένα φυσικό αποτέλεσμα λόγω των πολλών συχνών στάσεων που κάνουν καθημερινά αυτά τα τρένα [15]. Στα παρακάτω σχήματα, απεικονίζεται η διάταξη κανονικής πρόσφυσης (Σχήμα 1.2.6α) και η διάταξη δυναμικής πέδησης (Σχήμα 1.2.6β).



Σχήμα 1.2.6α Περίπτωση κανονικής πρόσφυσης, όπου οι κινητήρες έλξης τροφοδοτούνται με ενέργεια από την κύρια γεννήτρια [18]



Σχήμα 1.2.6β Περίπτωση δυναμικής πέδησης, όπου οι κινητήρες έλξης μετατρέπονται σε γεννήτριες και οι αντιστάτες χρησιμοποιούνται για την φόρτωση της ενέργειας από τους κινητήρες έλξης [18]

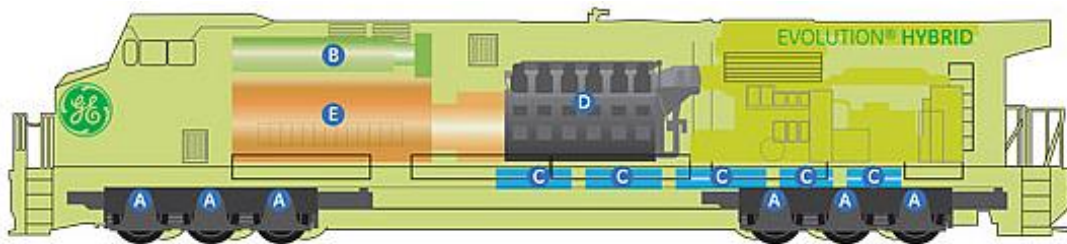
1.2.6 Υβριδική

Εκτός από τις σιδηροδρομικές μηχανές που χρησιμοποιούν και καύσιμα ως πηγή ενέργειας (π.χ. σε μηχανή εσωτερικής καύσης) αλλά και έναν ηλεκτρικό κινητήρα, υπάρχουν και οι υβριδικές μηχανές που χρησιμοποιούν επιπλέον και μια μπαταρία. Η μπαταρία γενικά λειτουργεί ως προσωρινή αποθήκη ενέργειας, επιτρέποντας για παράδειγμα την εφαρμογή της αναγεννητικής πέδησης και το σβήσιμο του κινητήρα όταν είναι στην άφορτη λειτουργία ή όταν είναι στάσιμος, όπως δηλαδή χρησιμοποιείται και στα αυτοκίνητα [6].

Στο Σχήμα 1.2.7 φαίνεται η αρχή λειτουργίας μιας υβριδικής σιδηροδρομικής μηχανής. Πιο αναλυτικά, κατά την διάρκεια της πέδησης παράγεται ενέργεια από τους κινητήρες έλξης η οποία στις συμβατικές σιδηροδρομικές μηχανές χάνεται στην ατμόσφαιρα μέσω των δικτύων αντίστασης, ενώ από μια υβριδική μηχανή συλλέγεται ένα μέρος της το οποίο αποθηκεύεται σε μια σειρά από επαναφορτιζόμενων, χωρίς μόλυβδο, μπαταριών. Η ενέργεια αυτή μπορεί στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ενέργεια κατά ένα από τους παρακάτω τρεις τρόπους.

- Σε συνδυασμό με την ενέργεια της σιδηροδρομικής μηχανής diesel- electric και του ηλεκτρικού συστήματος να παραδίδουν συνεχώς την απαιτούμενη ισχύ.

- Ως επιπρόσθετη της πλήρους ισχύος από την μηχανή diesel-electric με σκοπό γρήγορη εκκίνηση της αμαξοστοιχίας από μηδενική ταχύτητα.
- Ως η κύρια πηγή ενέργειας.

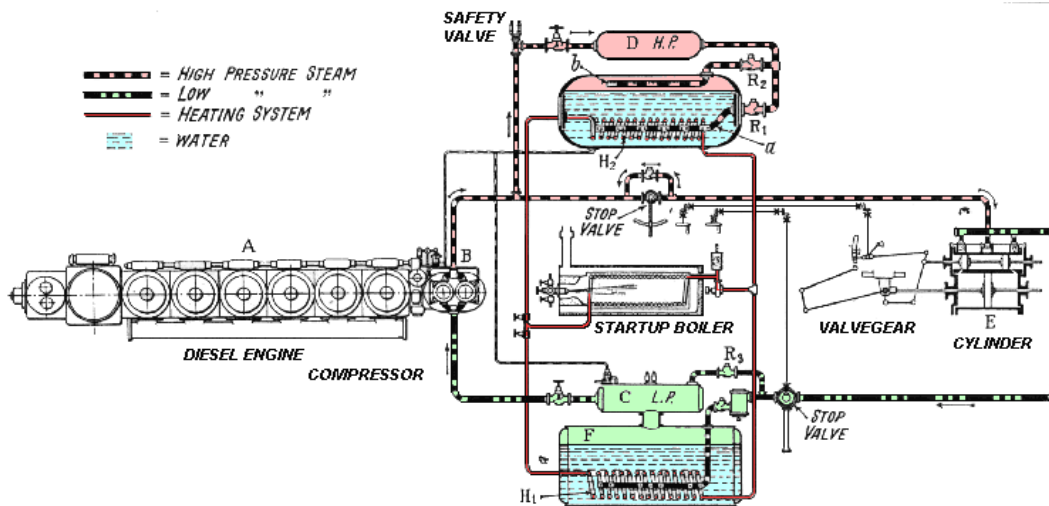


- A) Κινητήρες Έλξης
- B) Αντιστάτες
- C) Μπαταρίες
- D) Κινητήρας
- E) Ηλεκτρικό Σύστημα Σιδηροδρομικής Μηχανής

Σχήμα 1.2.7 Υβριδική σιδηροδρομική μηχανή, General Electric [19]

1.2.7 Ατμο-Diesel Υβριδική

Μια ατμο-diesel υβριδική σιδηροδρομική μηχανή χρησιμοποιεί έναν εμβολοφόρο κινητήρα ο οποίος μπορεί να παίρνει κίνηση είτε από τον ατμό που παράγεται σε ένα λέβητα είτε από καύσιμο diesel [16]. Στη Μεγάλη Βρετανία, τη Ρωσία και την Ιταλία έχουν δοκιμαστεί τέτοιου τύπου κινητήρες, αλλά με μικρή επιτυχία [6]. Στο Σχήμα 1.2.8 φαίνεται το πως συνδυάζεται η λειτουργία του κινητήρα diesel με τον λέβητα.



Σχήμα 1.2.8 Λειτουργία κινητήρα diesel σε συνδυασμό με λέβητα για εφαρμογή σε υβριδικό τρένο [20]

1.2.8 Αεριοστρόβιλο-Ηλεκτρικές (GTEL)

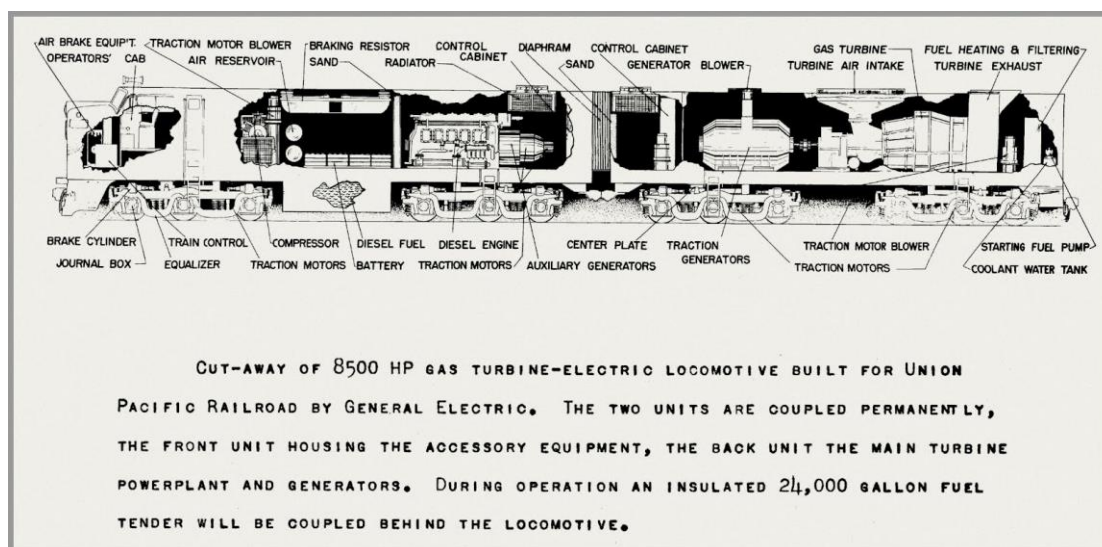
Μια αεριοστρόβιλο-ηλεκτρική σιδηροδρομική μηχανή (gas turbine-electric locomotive), (GTEL) είναι μια σιδηροδρομική μηχανή που χρησιμοποιεί έναν αεριοστρόβιλο ο οποίος δίνει κίνηση σε μια γεννήτρια ή έναν εναλλακτήρα, βλέπε Σχήμα 1.2.9. Ο στρόβιλος κινεί τον άξονα εξόδου ο οποίος με την σειρά του κινεί τον εναλλακτήρα μέσω ενός κιβώτιου ταχυτήτων. Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα δίνει ισχύ στους κινητήρες έλξης. Αυτός ο τύπος σιδηροδρομικής μηχανής δοκιμάστηκε αρχικά γύρω στο 1920, φτάνοντας στο αποκορύφωμά του το 1950 ως το 1960. Μια σχετική εξέλιξη πάνω σε αυτό είναι η σιδηροδρομική μηχανή με αεριοστρόβιλο ο οποίος κινεί τους τροχούς χωρίς να παρεμβάλλεται κάποια ηλεκτρική συσκευή, έχοντας όμως το μειονέκτημα της μηχανολογικής πολυπλοκότητας.

Σε σύγκριση με μια παλινδρομική μηχανή, ο αεριοστρόβιλος είναι μια μηχανή μηχανικά απλούστερη και ελαφρύτερη, αλλά είναι αποτελεσματική μόνο σε ένα αρκετά πιο περιορισμένο φάσμα στροφών από ότι μια παλινδρομική μηχανή.

Οι σιδηροδρομικές μηχανές με αεριοστρόβιλο είναι πολύ υψηλής ισχύος αλλά και πολύ θορυβώδεις (λόγω λειτουργίας σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής). Η Union Pacific Railroad λειτούργησε τον μεγαλύτερο στόλο από τρένα με GTEL στον κόσμο και ήταν ο μόνος σιδηρόδρομος που τις

χρησιμοποιήσε για την μεταφορά εμπορευμάτων σε κανονική λειτουργία. Οι πιο πολλές GTEL βρήκαν εφαρμογή σε μικρά επιβατικά τρένα χωρίς μεγάλη επιτυχία.

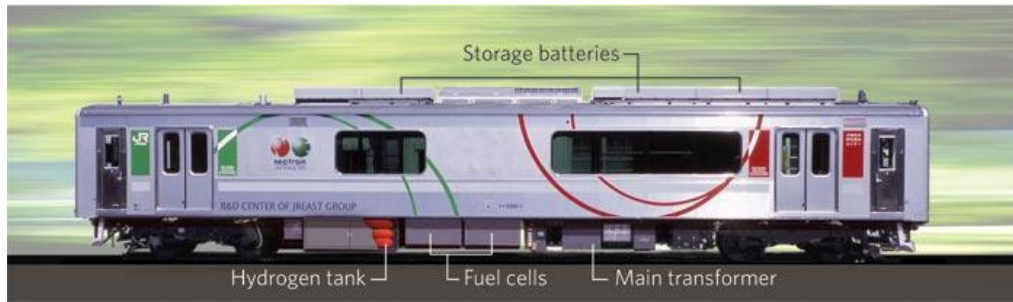
Ειδικά μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, όπου υπήρξε αύξηση της τιμής καυσίμου, δεν συνέφερε η χρήση σιδηροδρομικών μηχανών με αεριοστρόβιλο οπότε και αυτός ο τύπος μηχανών σχεδόν εγκαταλείφθηκε [6].



Σχήμα 1.2.9 Σχεδιάγραμμα σιδηροδρομικής μηχανής GTEL της Union Pacific Railways [21]

1.2.9 Κυψελών Καυσίμου-Ηλεκτρική

Το 2002, η πρώτη σιδηροδρομική μηχανή εξόρυξης κυψελών καυσίμου υδρογόνου βάρους 3.6 t και ισχύος 17 kW παρουσιάστηκε στο Val-d'Or στο Κεμπέκ του Καναδά. Το 2007 λειτούργησε το εκπαιδευτικό μίνι-hydrail στο Kaohsiung στο Taiwan. Η Railpower GG20B είναι τελικά ένα άλλο παράδειγμα κυψελών καυσίμου-ηλεκτρικής σιδηροδρομικής μηχανής. Στο Σχήμα 1.2.10 φαίνεται η διάταξη μιας τέτοιου τύπου σιδηροδρομικής μηχανής της East Japan Railways [6].

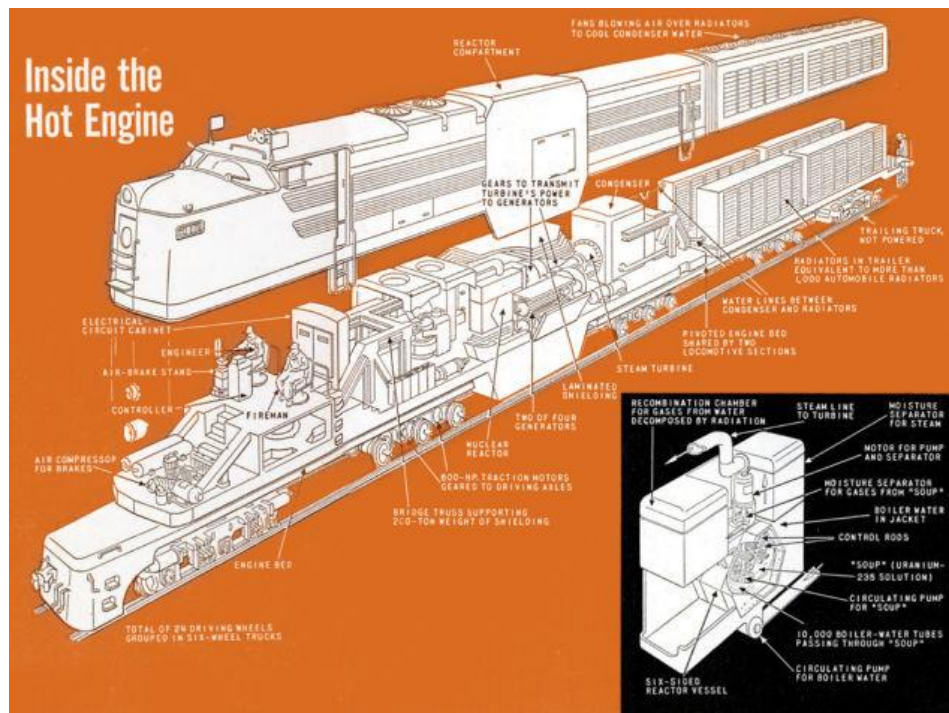


Σχήμα 1.2.10 Διάγραμμα ηλεκτρικής σιδηροδρομικής μηχανής κυψελών καυσίμου της East Japan Railways [22]

1.2.10 Πυρηνική-Ηλεκτρική

Στις αρχές του 1950, δόθηκε χρηματοδότηση στον Dr. Lyle Borst του Πανεπιστημίου της Utah, από διάφορους σιδηρόδρομους των Ηνωμένων Πολιτειών και από κατασκευαστές, ώστε να μελετήσει το πόσο εφικτό είναι μια ηλεκτρική σιδηροδρομική μηχανή να χρησιμοποιεί έναν πυρηνικό αντιδραστήρα για την παραγωγή ατμού ο οποίος θα παράγει ηλεκτρισμό. Εκείνη την εποχή, δεν είχε γίνει πλήρως κατανοητό το πόσο επικίνδυνη μπορεί να καταστεί υπό συνθήκες η χρήση πυρηνικής ενέργειας. Ο Borst πίστευε ότι το μεγαλύτερο εμπόδιο ήταν η τιμή του ουρανίου. Αυτή η ατομική-ηλεκτρική σιδηροδρομική μηχανή ονομάστηκε X-12 και θα ζύγιζε συνολικά 360 t με μήκος 49 m. Η πυρηνική πηγή ενέργειας θα ήταν σχάσιμο ουράνιο U-235 που θα περιεχόταν σε μια δεξαμενή μήκους σχεδόν 1 m και διαμέτρου περίπου 30 cm. Αυτή με την σειρά της θα περικλειόταν μέσα σε ένα προστατευτικό τοίχωμα από χάλυβα πάχους 152.4 m και βάρους 200 t για την αποτροπή διαρροής ραδιενέργειας σε περίπτωση ατυχήματος. Ο ατμός που θα παραγόταν από τον αντιδραστήρα θα τροφοδοτούσε τους στροβίλους που θα κινούσαν τέσσερις γεννήτριες. Αυτό θα δημιουργούσε ισχύ 5222 kW ηλεκτρικής ενέργειας που θα κινούσε τους κινητήρες έλξης στους τροχούς. Το X-12 θα ήταν τόσο ισχυρό που θα μπορούσε να επιταχύνει μια αμαξοστοιχία βάρους 5000 t από μηδενική ταχύτητα σε περίπου 100 km/h σε 3 min και 32 sec. Υπολογίστηκε ότι το κόστος κατασκευής θα ανερχόταν περίπου σε 1,200,000 \$, περίπου το διπλάσιο από μια αντίστοιχη σιδηροδρομική μηχανή diesel. Κατά συνέπεια, αμαξοστοιχίες που θα έφεραν ατομικές σιδηροδρομικές μηχανές θεωρήθηκαν ανέφικτες μόνο και μόνο λόγω του απαγορευτικού κόστους κατασκευής [6].

Στο Σχήμα 1.2.11 φαίνεται ένα σχεδιάγραμμα μιας πυρηνικής-ηλεκτρικής σιδηροδρομικής μηχανής.



Σχήμα 1.2.11 Σχεδιάγραμμα πυρηνικής-ηλεκτρικής σιδηροδρομικής μηχανής [23]

1.3 Χρήση Σιδηροδρομικών Μηχανών

Οι τρεις κύριες κατηγορίες σιδηροδρομικών μηχανών συχνά υποδιαιρούνται ανάλογα την χρήση και την λειτουργία τους στις σιδηροδρομικές μεταφορές. Υπάρχουν σιδηροδρομικές μηχανές επιβατικές, για φορτηγά τρένα και υπάρχουν και οι σιδηροδρομικές μηχανές ελιγμών, όπως αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 1.3.1.



Σχήμα 1.3.1 Σιδηροδρομική μηχανή ελιγμών Diesel ChME-3ME 6750 στον σταθμό Vilnius, Λιθουανία [24]

Αυτές οι κατηγορίες καθορίζουν τον συνδυασμό των κινητήριων μηχανών του φυσικού μεγέθους, της ελκτικής δύναμης στο ξεκίνημα και της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας. Οι σιδηροδρομικές μηχανές για μεταφορά εμπορευμάτων κανονικά σχεδιάζονται ώστε να παρέχουν υψηλή ελκτική δύναμη στην εκκίνηση, η οποία απαιτείται για την εκκίνηση αμαξοστοιχιών οι οποίες μπορεί να ζυγίζουν και 15,000 t και να εξασφαλίζουν μεγάλη ισχύ, θυσιάζοντας όμως την δυνατότητα επίτευξης μεγάλων ταχυτήτων.

Στις περισσότερες σιδηροδρομικές ατμομηχανές, τα έμβολα συνδέονται με τους κινητήριους τροχούς μέσω συνδετήριων ράβδων και δεν έχουν κάποιο ενδιάμεσο κιβώτιο ταχυτήτων. Ως εκ τούτου, ο συνδυασμός ελκτικής δύναμης κατά την εκκίνηση και η μέγιστη ταχύτητα επηρεάζεται πολύ από την διάμετρο των κινητήριων τροχών. Οι σιδηροδρομικές ατμομηχανές που χρησιμοποιούνται για μεταφορά εμπορευμάτων γενικά έχουν μικρές διαμέτρους στους τροχούς, ενώ αυτές που χρησιμοποιούνται για μεταφορά επιβατών έχουν μεγάλες διαμέτρους στους τροχούς.

Στις diesel-electric και στις ηλεκτρικές σιδηροδρομικές μηχανές, ο λόγος μετάδοσης ισχύος μεταξύ των κινητήρων έλξης και των αξόνων είναι αυτός που καθορίζει και το αν η μονάδα θα χρησιμοποιηθεί για μεταφορά εμπορευμάτων ή επιβατών, αν και μια επιβατική μονάδα μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα χαρακτηριστικά, όπως μια γεννήτρια παροχής ρεύματος φωτισμού ή μια γεννήτρια ατμού.

Μερικές σιδηροδρομικές μηχανές έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να λειτουργούν σε απότομες κλίσεις του εδάφους και διαθέτουν εκτεταμένους μηχανισμούς πέδησης, καμιά φορά και οδοντωτούς ή γραναζωτούς. Σιδηροδρομικές ατμομηχανές που κατασκευάζονται για απότομους οδοντωτούς και γραναζωτούς σιδηρόδρομους συχνά γέρνουν τον λέβητα σε σχέση με τους τροχούς, έτσι ώστε ο λέβητας να παραμένει χονδρικά επίπεδος σε απότομες κλίσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.2 [6].



Σχήμα 1.3.2 Σιδηροδρομική ατμομηχανή με επικλινή λέβητα στον οδοντωτό σιδηρόδρομο του Schneeberg, Αυστρία [25]

1.4 Αμαξοστοιχίες Πολλαπλών Μονάδων MU (Multiple Units)

1.4.1 Γενικά για τις Αμαξοστοιχίες Πολλαπλών Μονάδων (MU)

Οι αμαξοστοιχίες πολλαπλών μονάδων (MU) είναι αυτοκινούμενα βαγόνια τρένων ικανά να συνδέονται με άλλες μονάδες ίδιου ή παρόμοιου τύπου και να εξακολουθούν να ελέγχεται από ένα οδηγητικό όχημα, βλέπε Σχήμα 1.4.1. Συχνά αυτά είναι επιβατικοί συρμοί οι οποίοι αποτελούνται από περισσότερα από ένα βαγόνι μεταφοράς. Μεμονωμένα αυτο-προωθούμενα βαγόνια μεταφοράς, που ονομάζονται αλλιώς και αυτοκινητάμαξες, θεωρούνται ως MU αν είναι ικανά να λειτουργούν μαζί με άλλες μονάδες.



Σχήμα 1.4.1 Ηλεκτρική αμαξοστοιχία πολλαπλών μονάδων (EMU) στην Εσθονία [27]

Οι MU ταξινομούνται με βάση την πηγή τροφοδοσίας τους, και είναι δύο οι βασικοί τύποι: η ηλεκτρική πολλαπλή μονάδα (electric multiple unit) (EMU) και η πολλαπλή μονάδα diesel (diesel multiple unit) (DMU). Οι μονάδες που τροφοδοτούνται με diesel μπορεί να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω αναλόγως του τύπου μετάδοσης ισχύος τους ως: diesel-electric (DEMU), diesel-mechanical (DMMU) ή diesel-hydraulic (DHMU).

Οι σιδηροδρομικές μηχανές που αξιοποιούν τον έλεγχο τρένου πολλαπλών μονάδων (MU) δεν είναι πολλαπλές μονάδες (MU). Έλεγχος τρένου πολλαπλών μονάδων (MU) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά την δεκαετία του 1890 σε EMU. Αυτό επέτρεψε τα ηλεκτροκίνητα τρένα ταχείας διέλευσης να λειτουργούν από μια μεμονωμένη θέση οδήγησης. Οι πρώτες εφαρμογές τέτοιων MU έγιναν στον σιδηρόδρομο του Liverpool Overhead Railway και στον σιδηρόδρομο Chicago's South Side Elevated Railroad [26].

1.4.2 Σύγκριση Αμαξοστοιχιών Συρόμενων από Σιδηροδρομική Μηχανή με Αμαξοστοιχιών MU

Πλεονεκτήματα των MU έναντι σιδηροδρομικών μηχανών

- ✓ **Ενεργειακή απόδοση** – Οι αμαξοστοιχίες MU είναι πιο ενεργειακά αποδοτικές. Είναι πιο ευκίνητες, ιδιαίτερα σε κλίσεις εδάφους, καθώς το περισσότερο βάρος της αμαξοστοιχίας φέρεται στους κινητήριους

τροχούς, από το να χρειάζεται το τρένο να σύρει το βάρος των βαγονιών που δεν αποδίδουν από μόνα τους ισχύ. Επιπρόσθετα, έχουν χαμηλότερη τιμή βάρους ανά θέση από ότι μια αμαξοστοιχία συρόμενη από σιδηροδρομική μηχανή καθώς δεν έχουν κάποια ογκώδη σιδηροδρομική μηχανή η οποία δεν μεταφέρει επιβάτες αλλά συνεισφέρει στο συνολικό βάρος της αμαξοστοιχίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις σιδηροδρομικές υπηρεσίες που κάνουν πολλές στάσεις, γιατί η ενέργεια που καταναλώνεται στην εκκίνηση του τρένου αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται και το βάρος.

- ✓ **Υψηλότερος ρυθμός επιτάχυνσης** – Λόγω της ενεργειακής απόδοσης, υψηλότερες τιμές αναλογίας ισχύος-βάρους και βάρους πρόσφυσης-συνολικού βάρους, οι αμαξοστοιχίες MU έχουν γενικά μεγαλύτερη ικανότητα επιτάχυνσης από ότι οι αμαξοστοιχίες συρόμενες από σιδηροδρομικές μηχανές και έτσι προτιμώνται για αστική χρήση.
- ✓ **Δεν υπάρχει ανάγκη στροφής του κινητήρα** – Οι περισσότερες αμαξοστοιχίες MU έχουν καμπίνες και στο μπροστά και στο πίσω μέρος, με αποτέλεσμα ταχύτερους χρόνους αλλαγής κατεύθυνσης της αμαξοστοιχίας, μειώνοντας έτσι τα κόστη προσωπικού και βελτιώνοντας την ασφάλεια. Αυτό σε συνδυασμό με το ότι οι αμαξοστοιχίες MU είναι μικρότερου μεγέθους σε σχέση με αντίστοιχες αμαξοστοιχίες συρόμενες από σιδηροδρομικές μηχανές, τις έχει καθιερώσει στην χρήση προαστιακών σιδηροδρομικών γραμμών μεταφοράς επιβατών στις περισσότερες χώρες. Προτιμώνται επίσης στα περισσότερα συστήματα ταχείας διέλευσης.
- ✓ **Μπορεί να γίνει αλλαγή στην σύνθεση του τρένου κατά την διάρκεια ταξιδιού** – Οι αμαξοστοιχίες MU μπορούν σε μικρό χρόνο να συνδεθούν ή να αποσυνδεθούν με άλλες μονάδες και να διαμορφώσουν ομάδες μονάδων διαφορετικών μηκών. Αρκετές αμαξοστοιχίες MU μπορεί να λειτουργούν ως ενιαία αμαξοστοιχία και στην συνέχεια να σπάσουν σε ένα σημείο σύνδεσης σε μικρότερες αμαξοστοιχίες για διαφορετικούς προορισμούς το καθένα.
- ✓ **Αξιοπιστία** - Επειδή υπάρχουν πολλαπλές μηχανές, ή κινητήρες, η αστοχία ενός κινητήρα δεν εμποδίζει το τρένο από το να συνεχίσει το

ταξίδι του. Αντιθέτως, μια αμαξοστοιχία συρόμενη από σιδηροδρομική μηχανή, έχει συνήθως μόνο μία μονάδα ισχύος, οπότε και η αστοχία της θα απενεργοποιούσε όλη την αμαξοστοιχία. Ωστόσο, ορισμένες αμαξοστοιχίες συρόμενες από σιδηροδρομικές μηχανές, μπορεί να περιέχουν περισσότερες από μία μονάδα ισχύος και έτσι να είναι σε θέση να συνεχίσουν με μειωμένη ταχύτητα μετά την αποτυχία της μίας μονάδας.

- ✓ **Φορτίο στον άξονα** – Οι αμαξοστοιχίες MU έχουν μικρότερα φορτία στους άξονες, που επιτρέπουν την λειτουργία σε ελαφρύτερες γραμμές, όπου σιδηροδρομικές μηχανές μπορεί να απαγορεύονται. Επίσης, οι γραμμές φθείρονται λιγότερο, καθώς οι δυνάμεις παρέχονται μέσω πολλών αξόνων και όχι μόνο μέσω τεσσάρων ή έξι όπως συμβαίνει στις σιδηροδρομικές μηχανές [26].

Μειονεκτήματα των MU έναντι σιδηροδρομικών μηχανών

- **Συντήρηση** – Μπορεί να είναι πιο εύκολη η συντήρηση μιας σιδηροδρομικής μηχανής σε σχέση με πολλά αυτοπρωθούμενα βαγόνια.
- **Ασφάλεια** – Στο παρελθόν ήταν ασφαλέστερο να τοποθετούνται τα συστήματα ισχύος της αμαξοστοιχίας μακριά από τον χώρο των επιβατών, ειδικά για τις αμαξοστοιχίες με ατμομηχανή. Σε μια μετωπική ή κάθετη σύγκρουση στην οποία εμπλέκεται μια MU, όπου και υπάρχουν επιβάτες στο μπροστά μέρος της αμαξοστοιχίας, ενδέχεται να υπάρξουν περισσότερες ανθρώπινες απώλειες από ότι σε μια αντίστοιχη σύγκρουση αμαξοστοιχίας με σιδηροδρομική μηχανή στο μπροστά μέρος όπου η βαριά μηχανή μπορεί να λειτουργήσει ως «ζώνη παραμόρφωσης» και να απορροφήσει μέρος της σύγκρουσης.
- **Δυσκολία στην αντικατάσταση της κινητήριας δύναμης** – Αν μια σιδηροδρομική μηχανή αστοχήσει κατά την διάρκεια ταξιδιού, τότε αυτή μπορεί να αντικατασταθεί με μια άλλη με κάποιους ελάχιστους ελιγμούς και δεν θα υπήρχε καμία ανάγκη για τους επιβάτες να απομακρυνθούν από την αμαξοστοιχία. Η αστοχία σε μια MU κατά την διάρκεια ταξιδιού μπορεί να απαιτήσει την ολοκληρωτική αντικατάσταση της

αμαξοστοιχίας και οι επιβάτες να πρέπει να την εκκενώσουν και να επιβιβαστούν σε μια άλλη.

- **Αποδοτικότητα** – Οι σιδηροδρομικές μηχανές, αντί να βρίσκονται σε αχρηστία μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάπου αλλού, για παράδειγμα, από μια αμαξοστοιχία μεταφοράς επιβατών μπορεί να μεταφερθεί ώστε να χρησιμοποιηθεί σε μια αμαξοστοιχία μεταφοράς εμπορευμάτων. Αντιθέτως σε μια MU δεν μπορεί να γίνει εύκολα αυτό.
- **Διάδρομοι** – Είναι δύσκολο να έχουμε διαδρόμους μεταξύ των συνδεδεμένων μονάδων και ταυτόχρονα να έχουμε και αεροδυναμικές μπροστινές επιφάνειες. Εξαιτίας αυτού, συχνά δεν υπάρχει κάποια δίοδος μεταξύ συνδεδεμένων μονάδων υψηλής ταχύτητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται και περισσότερο προσωπικό, όπως για παράδειγμα, ελεγκτές εισιτηρίων. Αυτό οδηγεί και σε υψηλότερα κόστη προσωπικού. Σε μια αμαξοστοιχία συρόμενη από σιδηροδρομική μηχανή, απαιτείται μόνο μια ομάδα προσωπικού για να εξυπηρετήσει όλη την αμαξοστοιχία ανεξαρτήτως τον αριθμό των βαγονιών, αρκεί βεβαίως να μην ξεπερνώντας τα όρια ατομικού φόρτου εργασίας. Ομοίως, σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να έχουμε περισσότερα από ένα βαγόνια εστιατορίου και άλλες κοινόχρηστες λειτουργίες, μειώνοντας όμως έτσι την αποδοτικότητα.
- **Ευελιξία** – Οι μεγάλες σιδηροδρομικές μηχανές μπορεί να αντικαταστήσουν μικρότερες σε περιπτώσεις που χρειάζεται περισσότερη ισχύ. Επίσης, διάφοροι τύποι επιβατικών βαγονιών, όπως ανακλινόμενων καθισμάτων, με καμπίνες, με κουκέτες, κτλ, μπορούν εύκολα να προστεθούν ή να αφαιρεθούν από μια αμαξοστοιχία συρόμενη από σιδηροδρομική μηχανή. Αυτό δεν είναι τόσο εύκολο για μια αμαξοστοιχία MU, καθώς αυτό γίνεται μόνο κατά την συντήρηση. Αυτό επιτρέπει επίσης στις αμαξοστοιχίες συρόμενες από σιδηροδρομικές μηχανές να είναι ευέλικτες όσον αφορά τον αριθμό των βαγονιών.
- **Θόρυβος και δόνηση** – Το περιβάλλον επιβατών μιας αμαξοστοιχία MU είναι συνήθως αισθητά πιο θορυβώδης από ότι μιας αμαξοστοιχίας συρόμενης από μια σιδηροδρομική μηχανή, λόγω της παρουσίας των

μηχανών κάτω από το πάτωμα των βαγονιών. Για τον ίδιο λόγο οι αμαξοστοιχίες MU δονούνται και περισσότερο. Αυτό το πρόβλημα είναι πιο μεγάλο ειδικά σε αμαξοστοιχίες DMU [26].

2. ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗ ΠΡΩΣΗ ΤΡΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL

2.1 Μηχανολογικό Μέρος Σιδηροδρομικών Συστημάτων

2.1.1 Χαρακτηριστικά Κινητήρων Έλξης Diesel

Η εισαγωγή των μηχανών εσωτερικής καύσης υψηλής συμπίεσης από τον Rudolf Diesel στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, αποδείχθηκε πολύ αποτελεσματική πηγή ενέργειας για την κίνηση των τρένων· αυτή η μορφή ενέργειας έγινε ανταγωνιστική της ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως και με την ηλεκτρική έλξη, έτσι και μια σιδηροδρομική μηχανή diesel ή ένα μηχανοκίνητο βαγόνι μπορούν να ξεκινήσουν αμέσως, σχεδόν χωρίς να έχουν ζεστάνει τις μηχανές τους, ενώ συνήθως απαιτείται μόνο ένας χειριστής. Αρχικά οι μηχανές δούλευαν στις 600 μέχρι 900 rpm, ενώ οι πιο μοντέρνες μηχανές λειτουργούν πλέον σε

υψηλότερες στροφές, ενώ ο λόγος ισχύος ανά βάρος του οχήματος έχει βελτιωθεί ακόμα περισσότερο λόγω χρήσης της υπερπλήρωσης. Η επιλογή για το αν θα χρησιμοποιηθεί μηχανή diesel ή ηλεκτρική εξαρτάται από οικονομικούς παράγοντες. Προφανώς τα σημαντικά κόστη που έχουν να κάνουν με το σύστημα σύνδεσης και την τροφοδότηση ισχύος στην χρήση ηλεκτρικής ενέργειας δικαιολογούνται μόνο όταν υπάρχει επαρκής όγκος ζήτησης των συγκεκριμένων δρομολογίων, ενώ ένα ανεξάρτητο όχημα με μηχανή diesel προτιμάται εκεί που η ζήτηση είναι μικρότερη με λιγότερα δρομολόγια. Φυσικά, το όριο μεταξύ αυτών των δύο εναλλακτικών λύσεων αποφασίζεται από τα κυρίαρχα κόστη καυσίμου, εξοπλισμού, εργατικού δυναμικού, κ.α.

Δυστυχώς οι συμβατικές μηχανές diesel δεν λειτουργούν σε πολύ χαμηλές στροφές και επομένως δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας με τους κινητήριους τροχούς. Έτσι λειτουργούν συνηθέστερα σε κάποια επιθυμητή σταθερή ταχύτητα, όπου και η ισχύς μεταδίδεται στους τροχούς με την μορφή ηλεκτρικής μετάδοσης, αν και πολλές φορές χρησιμοποιείται και υδραυλική μετάδοση. Μπορεί λοιπόν μια σιδηροδρομική μηχανή diesel-electric να θεωρηθεί ως μια μορφή ηλεκτρικής έλξης στην οποία παρέχεται ανεξάρτητη παραγωγή ενέργειας από την σιδηροδρομική μηχανή. Περιστασιακά χρησιμοποιούνται, όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και άλλες μορφές ενέργειας, όπως ένας αεριοστρόβιλος ο οποίος είναι μικρότερος σε μέγεθος και ελαφρύτερη κατασκευή, αλλά απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου από ότι μια μηχανή diesel. Ακόμη, με σκοπό την βελτίωση της παροχής ισχύος, μια παρόμοια μορφή μετάδοσης ισχύος απαιτείται και για μια σιδηροδρομική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιεί ένα σύγχρονο ή σταθερών στροφών κινητήρα, ο οποίος λειτουργεί ως ο κύριος παράγοντας παραγωγής ισχύος. Οι τύποι μηχανών diesel που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα στον σιδηρόδρομο είναι:

- (1) Κινητήρες 4-9 κυλίνδρων σε διάταξη σειράς, όπου οι κινητήρες 6 κυλίνδρων είναι οι πιο συνήθεις (σειρά ανάφλεξης 1-5-3-6-2-4),
- (2) Οριζόντιοι ή επικλινείς κινητήρες, συνήθως σε μικρότερα μεγέθη που χρησιμοποιούνται συχνά σε αυτοκινητάμαξες ή σε μηχανοκίνητα βαγόνια όπου και τοποθετούνται κάτω από το πάτωμα του βαγονιού
- (3) Μηχανές πολύ μεγάλων διαστάσεων

(4) Κινητήρες “V” από 8 ως 16 κυλίνδρους.

Και οι τετράχρονοι και οι δίχρονοι κινητήρες που χρησιμοποιούνται, παρέχουν τελικά περίπου την ίδια ισχύ, παρόλο που η μέση πραγματική πίεση των τελευταίων περιορίζεται περίπου στη μισή των πρώτων. Οι σιδηροδρομικοί κινητήρες diesel τείνουν συνήθως σε μία από τις δύο μορφές, κινητήρες χαμηλών ταχυτήτων με μέγιστες ταχύτητες περιστροφής από 600 ως 1000 rpm, ή υψηλών ταχυτήτων με ταχύτητες περιστροφής από 1500 ως 1800 rpm. Εάν η ταχύτητα του αέρα κατά την εισαγωγή του στον κύλινδρο ξεπερνάει τα 60 m/s, τότε η ισχύς εξόδου της μηχανής θα μειωθεί και, όπως στους τετράχρονους κινητήρες όπου το μέγεθος της βαλβίδας εξαρτάται από την διάμετρο του κυλίνδρου, έχει ως συνέπεια ότι ανεξάρτητα της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, η μέση ταχύτητα του εμβόλου περιορίζεται περίπου στα 10 m/s. Έτσι οι κινητήρες μέτριας ταχύτητας έχουν διαδρομή εμβόλου περίπου μέχρι και 300 mm, ενώ οι κινητήρες υψηλών ταχυτήτων μέχρι και 220 mm. Οι κινητήρες υψηλών ταχυτήτων είναι μικρότεροι και ελαφρύτεροι, αλλά τείνουν να είναι λιγότερο αξιόπιστοι και απαιτούν περισσότερη συντήρηση.

Για ένα κινητήρα με συγκεκριμένο βαθμό απόδοσης, η μέγιστη παραγόμενη ισχύς σχετίζεται με την ποσότητα καυσίμου που μπορεί να καεί και κατά συνέπεια και του αέρα που χρησιμοποιείται. Αυτό επίσης σχετίζεται και με τον όγκο του κυλίνδρου, V_h , μέσω της καταστατικής εξίσωσης [1]

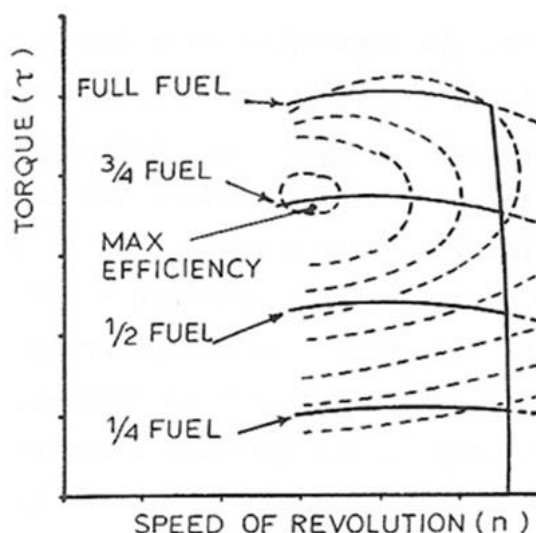
$$p_0 V_h = \frac{m_0}{M} R_m T_0 \quad \Rightarrow \quad m_0 = \frac{p_0 V_h}{k_a T_0} \quad (2.1)$$

όπου $k_a = \frac{R_m}{M}$ και p_0 και T_0 είναι η πίεση και η θερμοκρασία του αέρα στην αρχή της συμπίεσης, αντίστοιχα, m_0 είναι η αντίστοιχη μάζα του αέρα, R_m είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8314.3 J/kmoleK) και M είναι το μοριακό βάρος του αερίου. Για ένα δεδομένο κινητήρα, ο όγκος εμβολισμού του κυλίνδρου και η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του στροφάλου είναι καθορισμένες. Η T_0 αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του αέρα εισόδου, οπότε ένας αποτελεσματικός τρόπος αύξησης της παραγόμενης ισχύος είναι η αύξηση της p_0 μέσω προ-συμπίεσης του αέρα εισαγωγής, ή αλλιώς μέσω της «υπερπλήρωσης». Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ενός συμπιεστή, ο οποίος παίρνει κίνηση από την στροφαλοφόρο άτρακτο, ή συνηθέστερα, από έναν στρόβιλο ο οποίος και αξιοποιεί την ενέργεια των καυσαερίων. Η

συμπύεση του αέρα έχει και ως συνέπεια και την αύξηση της θερμοκρασίας, T_0 , αλλά αυτή μπορεί να μειωθεί στη συνέχεια με την προσθήκη ενός εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του συμπιεστή και της εισόδου του αέρα στον εμβολοφόρο κινητήρα. Για σιδηρόδρομους που έχουν ακραίες υψομετρικές διαφορές, όσο υψηλότερα κινείται μια αμαξοστοιχία, τόσο λιγότερη ισχύ μπορεί να παράγει η σιδηροδρομική μηχανή λόγω της μείωσης της ατμοσφαιρικής πίεσης, αλλά αυτό μπορεί να διορθωθεί με κατάλληλη "ρύθμιση" του υπερπληρωτή [3, 4].

2.1.2 Ροπή και Ισχύς σε Σχέση με την Ταχύτητα Περιστροφής του Κινητήρα Diesel

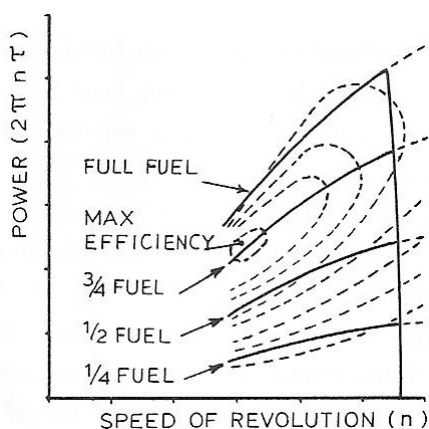
Οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας μπορεί να ποικίλουν αναλόγως του τύπου της μηχανής, της μεθόδου έγχυσης καυσίμου, της ταχύτητας στην οποία λειτουργεί και του βαθμού υπερπλήρωσης, αλλά τυπικές χαρακτηριστικές μιας απλής διάταξης ενός ατμοσφαιρικού κινητήρα θα είναι περίπου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.1.



Σχήμα 2.1.1 Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας και καμπύλες βαθμού απόδοσης τυπικού κινητήρα Diesel για διάφορες παροχές καυσίμου [4]

Φαίνεται ότι η ροπή είναι περίπου ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής για ένα σημαντικό εύρος, αλλά τείνει να μειώνεται λίγο στις υψηλότερες

ταχύτητες, λόγω του περιορισμού της ροής αέρα διαμέσου των βαλβίδων, ένας παράγοντας που ενίοτε εντείνεται στην περίπτωση κινητήρων υψηλών ταχυτήτων. Εάν χρησιμοποιείται υπερπληρωτής, οι χαρακτηριστικές του πρέπει να ταιριάζουν σωστά με αυτές του κινητήρα εκτός και αν σκοπίμως δεν το θέλουμε αυτό με σκοπό την αύξηση της ροπής όσο αυξάνει και η ταχύτητα. Η ταχύτητα της μηχανής περιορίζεται από τον ρυθμιστή στροφών, ο οποίος θέτει και το όριο στα δεξιά των διαγραμμάτων. Αυτός μπορεί να είναι είτε μηχανικός, είτε υδραυλικός, είτε ηλεκτρονικός, όπου ο τελευταίος έχει τα πλεονεκτήματα ότι ανταποκρίνεται άμεσα, μπορεί να λειτουργήσει για να αυξήσει ή να μειώσει την ταχύτητα της μηχανής και μπορεί συχνά να ενσωματωθεί εύκολα με το κυρίως σύστημα ελέγχου. Οι τιμές της ροπής του διαγράμματος στο Σχήμα 2.1.1 μετατρέπονται σε ισχύ σε συνάρτηση με την ταχύτητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.2 [4].

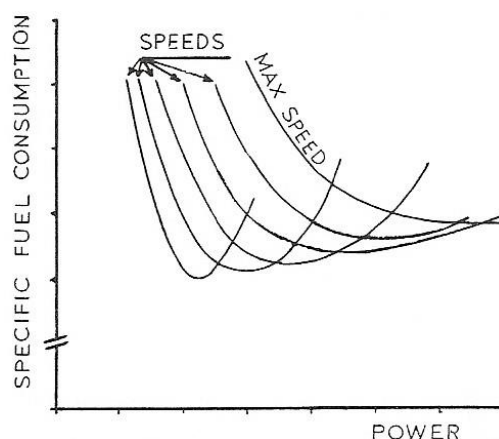


Σχήμα 2.1.2 Χαρακτηριστικές ισχύος-ταχύτητας τυπικού κινητήρα Diesel για διάφορες αναλογίες καυσίμου ανά χρόνο και καμπύλες βαθμού απόδοσης [4]

2.1.3 Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου σε Σχέση με την Ισχύ

Από το διάγραμμα στο Σχήμα 2.1.1, είναι δυνατό να παραχθεί το διάγραμμα για την ειδική κατανάλωση καυσίμου (specific fuel consumption) συναρτήσει της ισχύος, για διάφορες τιμές της ταχύτητας περιστροφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.3. Από αυτό είναι προφανές, όπως συμβαίνει και συνήθως στην πράξη, ότι θα χρειάζονται και χαμηλότερες τιμές της ταχύτητας

περιστροφής ώστε να εξασφαλίζεται μέγιστη οικονομία, και μπορεί να καθοριστεί η κάθε συγκεκριμένη βαθμίδα (βλ. Παράρτημα Β) που να αντιστοιχεί στην ακριβή τιμή της ταχύτητας αυτής [4].



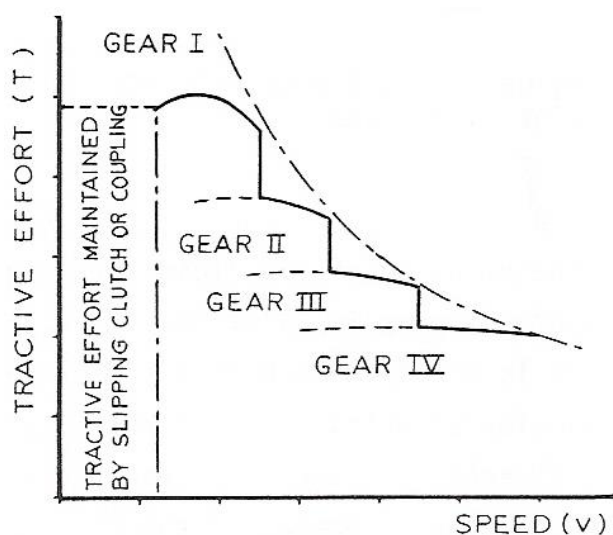
Σχήμα 2.1.3 Ειδική κατανάλωση καυσίμου - ισχύς τυπικού κινητήρα Diesel σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής [4]

2.1.4 Μετάδοση Ισχύος

Για κάθε μετάδοση ισχύος υπάρχουν διαθέσιμα εναλλακτικά μέσα τα οποία μπορεί να χρησιμοποιούν μηχανικά, ηλεκτρικά, υδραυλικά, πνευματικά ή άλλα συστήματα. Τέτοια μέσα όμως μπορεί να μην είναι εξίσου αποτελεσματικά για οποιαδήποτε συγκεκριμένη εφαρμογή. Ενώ η πλειοψηφία των σιδηροδρομικών μηχανών diesel χρησιμοποιεί ηλεκτρική μετάδοση ισχύος, μερικές φορές χρησιμοποιούνται και άλλες μορφές μεταφοράς ισχύος. Ο ίδιος ο Diesel αντιλήφθηκε τις δυσκολίες που υπήρχαν στο να βρεθεί ένα επαρκές ευέλικτο σύστημα μετάδοσης ισχύος για χρήση σε σιδηροδρομική μηχανή, ιδιαίτερα λόγω του ότι ο κινητήρας δεν μπορούσε να λειτουργήσει σε χαμηλές στροφές. Το 1913 κατασκεύασε την πρώτη σιδηροδρομική μηχανή diesel, στην οποία ο κινητήρας ήταν απευθείας συνδεδεμένος με τους κινητήριους τροχούς και υπήρχε τροφοδοσία πεπιεσμένου αέρα που προοριζόταν για την εκκίνηση του κινητήρα. Αργότερα κατασκευάστηκε από την εταιρεία Krupp η αντίστοιχη σιδηροδρομική μηχανή ατμού που εργαζόταν με πεπιεσμένο αέρα, στην οποία ένας κινητήρας diesel και ένας συμπιεστής αντικατέστησαν τον

λέβητα, βελτιώνοντας την απόδοση με την προθέρμανση του πεπιεσμένου αέρα μέσω των αερίων της εξόδου. Κάθε μία από αυτές τις μορφές έχει το ίδιο πλεονέκτημα με την μηχανή ατμού, ότι είναι ικανές να παράγουν έργο χωρίς σημαντική κατανάλωση ενέργειας.

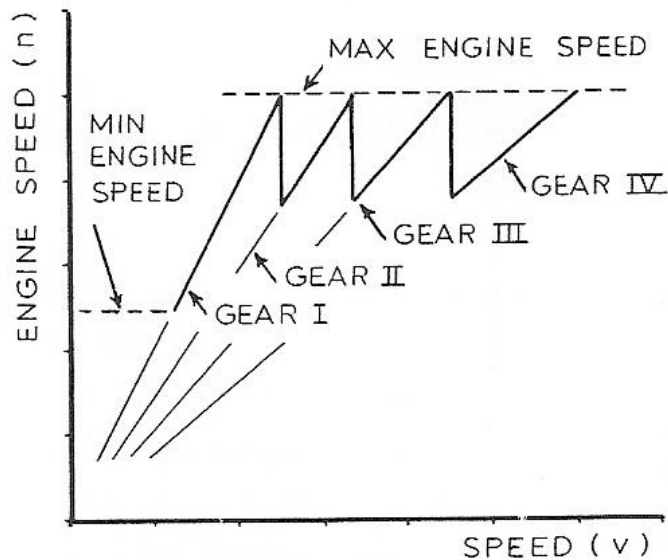
Στο Σχήμα 2.1.1 δόθηκε η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας μια σιδηροδρομικής μηχανής diesel απευθείας συνδεδεμένη με τους κινητήριους τροχούς. Όταν η ισχύς που πρέπει να μεταδοθεί είναι μικρή, όπως στην περίπτωση των μηχανοκίνητων βαγονιών, η χαρακτηριστική που αντιστοιχεί στην μέγιστη ισχύ εξόδου του κινητήρα μπορεί να προσεγγισθεί με την εισαγωγή αλλαγών στις σχέσεις του κιβωτίου ταχυτήτων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.4. Αυτές οι αλλαγές θα έχουν και την επίδραση της μείωσης του εύρους της ταχύτητας της αμαξοστοιχίας που αντιστοιχεί στις χαμηλές ταχύτητες. Στη σιδηροδρομική χρήση δεν είναι επιθυμητό τα γρανάζια να μην εμπλέκονται, οπότε είτε εισάγονται εναλλακτικά γρανάζια μέσω ενδιάμεσων συμπλεκτών ή αλλιώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων. Η αλλαγή ταχυτήτων δίνει μια μικρή ασυνέχεια στην ελκτική δύναμη, αλλά αυτή μπορεί να γίνει ανεκτή στα πιο μικρά οχήματα.



Σχήμα 2.1.4 Χαρακτηριστικές επίδοσης μιας αυτοκινητάμαξας ή μιας μικρής βιομηχανικής σιδηροδρομικής μηχανής με μηχανικές αλλαγές σχέσεων ταχυτήτων [4]

Οι ταχύτητες του κινητήρα που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές επιδόσεων του Σχήματος 2.1.4, φαίνονται στο Σχήμα 2.1.5, στο οποίο

φαίνεται ότι στις περισσότερες ταχύτητες της αμαξοστοιχίας ο κινητήρας λειτουργεί σε κάποια ταχύτητα κάτω της μέγιστης, και συνεπώς παράγει μικρότερη ισχύ από την μέγιστη.



Σχήμα 2.1.5 Ταχύτητες του κινητήρα που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές επίδοσης του Σχήματος 2.1.4 [4]

Η αναλογία της μέγιστης ισχύος εξόδου που μπορεί να μεταδοθεί στους τροχούς, δ_t , θα εξαρτάται επομένως, όχι μόνο από τον βαθμό απόδοσης της μετάδοσης η_t , αλλά και από τον λόγο φ_t , γνωστού και ως «συντελεστή αξιοποίησης». Άρα

$$\delta_t = \varphi_t \eta_t \quad (2.2)$$

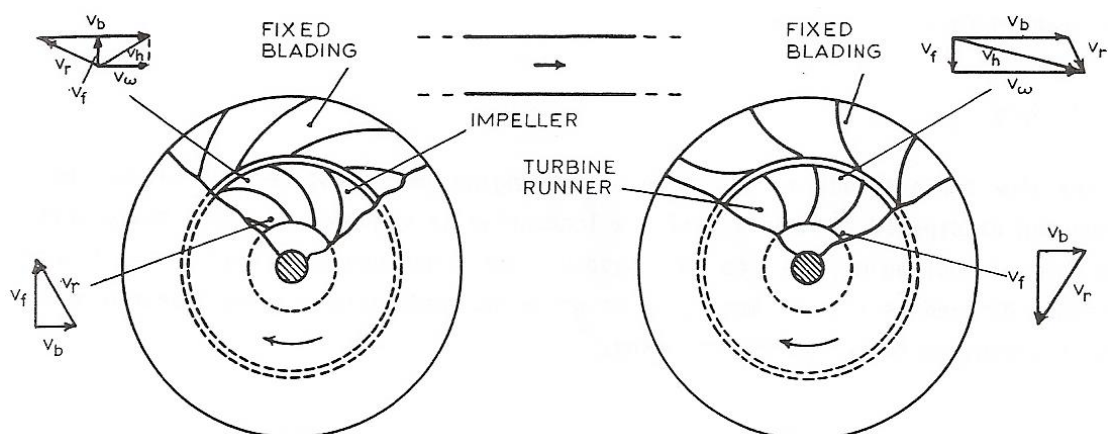
Στις πολύ χαμηλές ταχύτητες της αμαξοστοιχίας, ένα μέρος της ισχύος του κινητήρα πρέπει να απορροφηθεί από τον συμπλέκτη ολίσθησης και να χαθεί ως θερμότητα στο περιβάλλον. Επομένως, αν μια σιδηροδρομική μηχανή πρέπει να εκκινήσει μια βαριά αμαξοστοιχία, τότε ενδεχομένως να χρειαστεί κάποιας μορφής ψύξη. Έτσι η «συνεχής διαβάθμιση» της μετάδοσης καθορίζεται ως η ελάχιστη ταχύτητα στην οποία μπορεί μια σιδηροδρομική μηχανή να λειτουργεί σε πλήρη ισχύ χωρίς να υπάρξει παραπάνω θερμοκρασία από ότι χρειάζεται.

Σε μεγαλύτερες σιδηροδρομικές μηχανές συνήθως βολεύει η χρήση υδραυλικής μετάδοσης. Αυτά τα συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο

κατηγορίες, την «υδροστατική» και την υδροδυναμική. Οι υδροστατική μετάδοση κίνησης, που ενσωματώνει μια αντλία μεταβλητής θετικής εκτόπισης και ένα κινητήρα σταθερής εκτόπισης, χαρακτηρίζεται από υψηλές πιέσεις, μέχρι και 30 MPa και χαμηλό δείκτη ροής. Επίσης, χρησιμοποιείται περιστασιακά για την κίνηση του ανεμιστήρα σε σιδηροδρομικές μηχανές diesel, αλλά δεν έχει γίνει ακόμα αποδεκτή για την μετάδοση της κύριας ισχύος της μηχανής [4].

2.1.5 Υδραυλική Μετάδοση Ισχύος

Μια καλύτερη λύση αυτού του προβλήματος θα μπορούσε ενδεχομένως να είναι η σύνδεση μιας φυγοκεντρικής αντλίας σε ένα στρόβιλο αντίδρασης μέσω κατάλληλης σωλήνωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.6. Δεδομένου ότι η σωλήνωση μεταξύ της αντλίας και του στρόβιλου είναι μικρή σε μήκος και ευθεία, μια τέτοια διάταξη θα μπορεί να δώσει μια λογική απόδοση και με ένα στρόβιλο εσωτερικής ροής. Η ροπή τότε μπορεί να πέσει αμέσως για οποιαδήποτε ξαφνική μείωση του φορτίου, το οποίο είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικό σε σχέση με την πρόσφυση.



Σχήμα 2.1.6 Πιθανή υδραυλική μετάδοση που περιλαμβάνει φυγοκεντρική αντλία και στρόβιλο αντίδρασης μαζί με τα διανυσματικά διαγράμματα που απεικονίζουν την ροή του ρευστού στα σημεία τα οποία υποδεικνύουν [4]

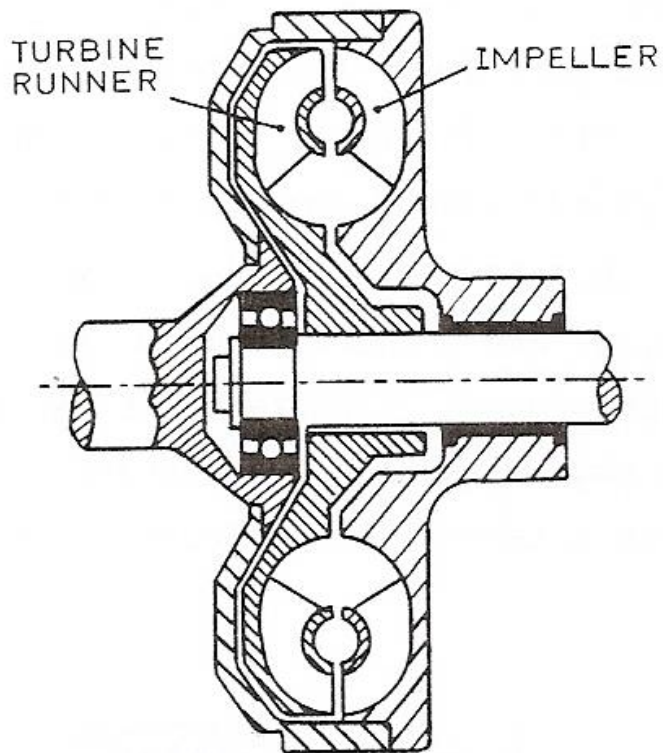
Στο Σχήμα 2.1.6 έχουμε επίσης διανυσματικά διαγράμματα που δείχνουν την ταχύτητα του ρευστού που εισέρχεται και που εξέρχεται από τα

περιστρεφόμενα πτερύγια. Τα πτερύγια της αντλίας κινούνται με μια ταχύτητα v_b , μεταδίδοντας στο ρευστό την πραγματική ταχύτητα v_h , η οποία είναι ένας συνδυασμός ακτινικής ταχύτητας v_r , και εφαπτομενικής ταχύτητας v_w , γνωστή και ως ταχύτητα στροβιλισμού. Η σχετική ως προς τα πτερύγια ταχύτητα του ρευστού v_r , ακολουθεί την διεύθυνσή τους. Αυτά είναι σχηματισμένα έτσι ώστε να παράγουν την ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα που απαιτείται για να έχουμε στροβιλισμό. Μέρος της κινητικής ενέργειας της ροής ταχύτητας v_h , μπορεί να μετατραπεί σε δυναμική ενέργεια μέσω ενός συστήματος σταθερών πτερυγίων, τα οποία μειώνουν την ταχύτητα στην τιμή που απαιτείται ώστε να έχουμε κυκλοφορία του ρευστού. Παρομοίως, η ενδεχομένως ακτινική είσοδος της ροής που έχει ταχύτητα v_r , έλκεται στην πτερωτή από τα πτερύγιά της τα οποία είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε η ροή σχετικής ταχύτητας v_r να ακολουθεί τον σχηματισμό τους. Αντιστρόφως, στον στρόβιλο τα σταθερά πτερύγια αυξάνουν της ακτινική ταχύτητα, v_r , και δημιουργούν μια περιστροφική ταχύτητα, v_w , η οποία είναι αυτή με την οποία περιστρέφεται ο στρόβιλος. Σημειώνεται ακόμα ότι μέγιστος βαθμός απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν η ταχύτητα της ροής και η ταχύτητα και η κατεύθυνση των πτερυγίων σχετίζονται έτσι ώστε το ρευστό να εισέρχεται και να εξέρχεται από τα πτερύγια ομαλά, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο για ένα ρυθμό ροής για οποιαδήποτε συγκεκριμένη ταχύτητα και διάταξη πτερυγίων.

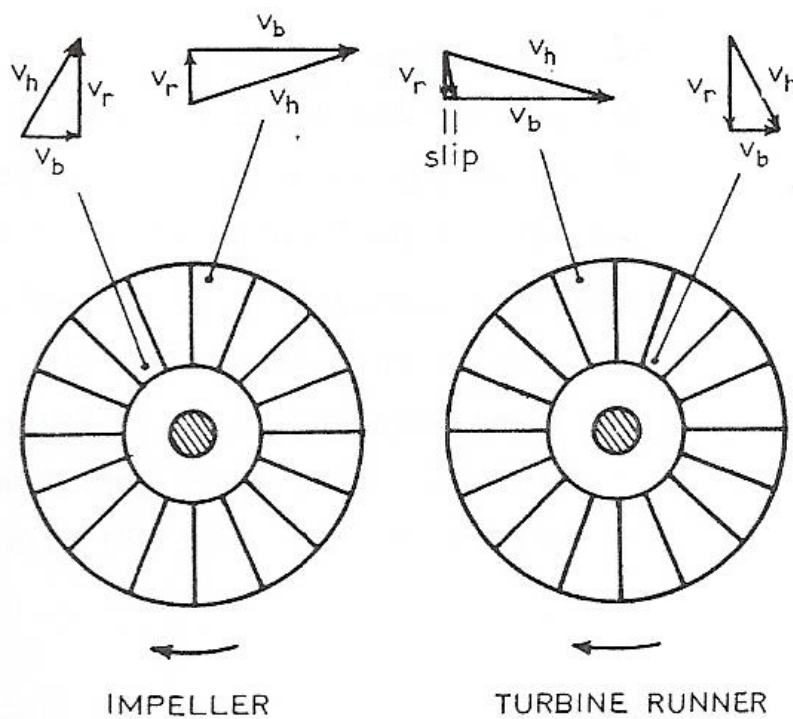
Για να μεταδοθεί ισχύς μεταξύ δύο διπλανών ατράκτων ήταν λογικό οι δύο μηχανές να ενσωματωθούν σε μία μονάδα στην οποία το ρευστό, συνήθως ορυκτέλαιο, κυκλοφορούσε διαμέσου διόδων των οποίων η περιοχή διατομής σχετιζόταν με την ροή. Αρχικά παρουσιάστηκαν δύο μορφές υδραυλικής μετάδοσης, η υδραυλική ζεύξη, η οποία έχει λόγο μετάδοσης μόνο 1:1 περίπου, αλλά λειτουργεί σαν μια μορφή συμπλέκτη και ο μετατροπέας ροπής ο οποίος έχει μεταβλητό λόγο [4].

2.1.6 Υδραυλική Ζεύξη

Η απλούστερη μορφή είναι η υδραυλική ζεύξη, η οποία φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.7, και η πτερύγωσή της όπως φαίνεται, μαζί με τα διανυσματικά διαγράμματα, απεικονίζουν της ταχύτητες της ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.8.



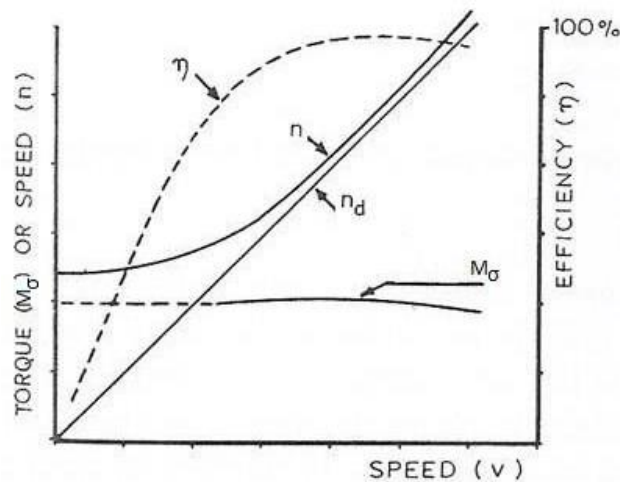
Σχήμα 2.1.7 Διάγραμμα βασικών στοιχείων μιας ζεύξης ρευστού [4]



Σχήμα 2.1.8 Πτερύγωση ζεύξης ρευστού με διανυσματικά διαγράμματα της ροής του ρευστού στα σημεία που υποδεικνύονται [4]

Η ζεύξη γεμίζει ή αδειάζει μέσω της αντλίας που είναι συνδεδεμένη σε μια δεξαμενή αποθήκευσης. Το ρευστό στο οποίο τόσο η ακτινική όσο και η περιφερειακή ταχύτητα έχει μεταδοθεί από την πτερωτή, παράγει μια ροπή στον δρομέα του στροβίλου με το να δίνει κινητική ενέργεια. Καθώς η ροπή δεν μπορεί να χαθεί από το ρευστό, η ροπή εξόδου πρέπει να είναι ίση με ροπή εισόδου, αλλά εφόσον χρειάζεται κάποια ενέργεια ώστε να κινεί το ρευστό στον κύκλο του αντίθετα στην τριβή, η ταχύτητα εξόδου θα είναι μικρότερη της ταχύτητας εισόδου κατά μια μικρή τιμή γνωστή και ως «ολίσθηση», η οποία είναι μια μείωση της ταχύτητας του κινούμενου πτερυγίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.8. Αν η σιδηροδρομική μηχανή είναι ακίνητη ή κινείται σε πολύ χαμηλή ταχύτητα, η ροπή που μεταδίδεται είναι αυτή που παράγεται από τον κινητήρα, αλλά όλη ή το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς της χάνεται από την επιπρόσθετη ολίσθηση. Αυτή η ενέργεια λαμβάνεται από την ζεύξη υπό μορφή θερμότητας, οπότε και ενδεχομένως να απαιτείται κάποια ψύξη, αν αυτό κρατάει για μεγάλο χρονικό διάστημα. Καθώς η ταχύτητα της αμαξοστοιχίας αυξάνεται, η ολίσθηση μειώνεται μέχρι η σχετική κίνηση της πτερωτής και του δρομέα του στροβίλου να επαρκεί μόνο για την διατήρηση της κυκλοφορίας του ρευστού και της μετάδοσης της ροπής, όταν και η σχετική ταχύτητα του ρευστού και στην πτερωτή και στον δρομέα θα είναι ακτινική, (ακτινική πτερύγωση).

Όπως προαναφέρθηκε, η ροπή που παράγεται από ένα κινητήρα diesel επηρεάζεται ελαφρώς από την ταχύτητα (Σχήμα 2.1.1). Είναι οικονομικό για την αμαξοστοιχία να ξεκινάει με την χαμηλότερα εφικτή ταχύτητα του κινητήρα, συνήθως στο 40% της μέγιστης, και αυτή μπορεί στην συνέχεια να αυξηθεί καθώς η αμαξοστοιχία κινείται και η ολίσθηση μειώνεται σταδιακά στην κανονική της τιμή. Οι χαρακτηριστικές που λαμβάνονται από μια ζεύξη ρευστού φαίνονται στο Σχήμα 2.1.9, όπου n και n_d είναι οι ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα και των ζεύξεων των ατράκτων εξόδου αντίστοιχα, η , ο βαθμός απόδοσης και M_σ , η ροπή του κινητήρα.



Σχήμα 2.1.9 Τυπικές χαρακτηριστικές μιας ζεύξης ρευστού [4]

Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από την πτερωτή της αντλίας, P_h , μπορεί να εκφραστεί ως

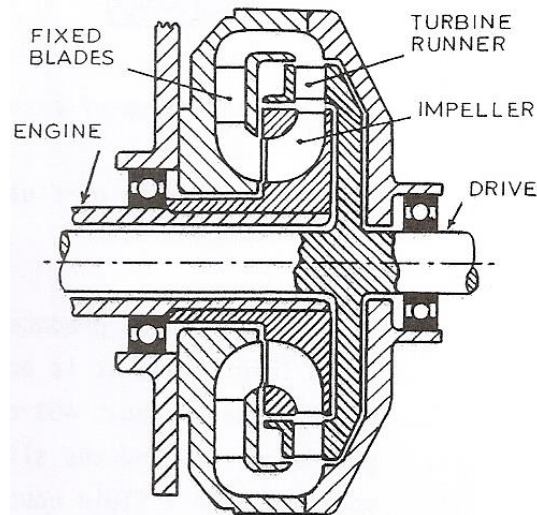
$$P_h = k_h \eta^3 d_h^5 \quad (2.3)$$

Όπου k_h είναι μια σταθερά και d_h είναι η διάμετρος της πτερωτής. Σημειώνεται ότι η ισχύς που μπορεί να μεταδοθεί από μια δεδομένη σχεδίαση ζεύξης αυξάνει ανάλογα με τον κύβο της ταχύτητάς της. Οι μόνες απώλειες σε μια τέτοια ζεύξη είναι αυτές λόγω τριβής του ρευστού, οπότε ο βαθμός απόδοσης είναι υψηλός με τυπικές τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 97-98% [3, 4].

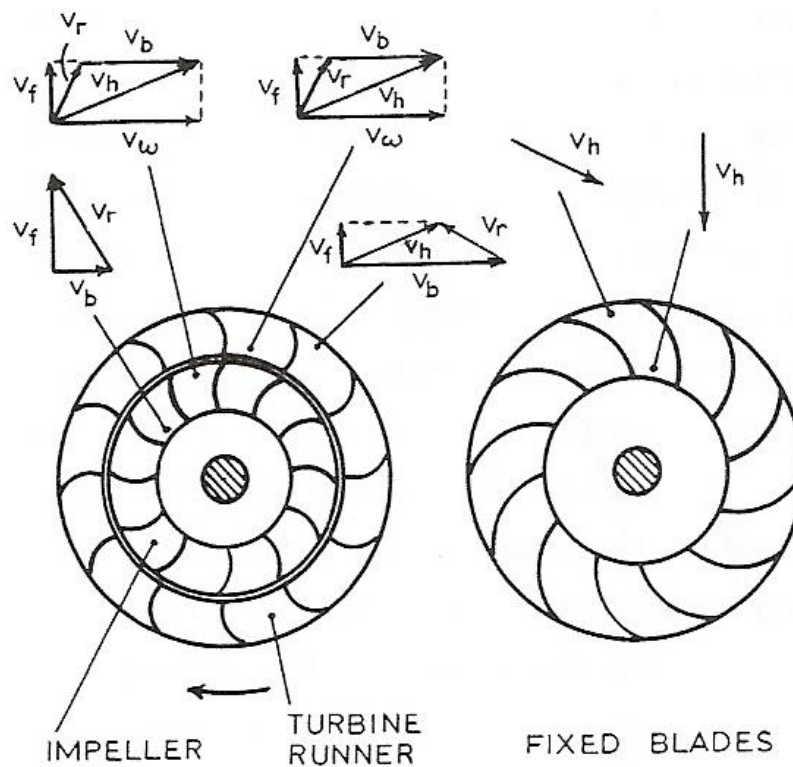
2.1.7 Μετατροπéας Ροπής

Η δεύτερη μορφή μετάδοσης είναι ο μετατροπéας ροπής (torque converter), ο οποίος έχει μεταβλητό λόγο μετάδοσης. Στην άτρακτο εισόδου έχουμε διαφορετική ταχύτητα περιστροφής από ότι στην άτρακτο εξόδου. Κατά συνέπεια διαφέρουν και οι αντίστοιχες τιμές των ροπών, οπότε και πρέπει να υπάρχει και κάποια ροπή αντίδρασης πάνω στο περίβλημα του μετατροπéα. Αυτό έχει ως επακόλουθο να απαιτείται μια επιπρόσθετη διάταξη σταθερών πτερυγίων ώστε να μεταδίδουν αυτή την ροπή από το ρευστό στο περίβλημα. Στην απλούστερη μορφή του λοιπόν, ένας μετατροπéας ροπής αποτελείται από μια πτερωτή, αντίστοιχη μιας ζεύξης ρευστού, ένα δρομέα στροβίλου και ένα σύστημα σταθερής οδήγησης ή πτερυγίων αντίδρασης για την αλλαγή της κατεύθυνσης του ρευστού μεταξύ του δρομέα και της

ππερωτής. Αυτή η συσκευή έχει συνήθως την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.1.10. Στο Σχήμα 2.1.11 φαίνονται επίσης οι διατάξεις των πτερυγίων της και τα διανυσματικά διαγράμματα των ταχυτήτων της.

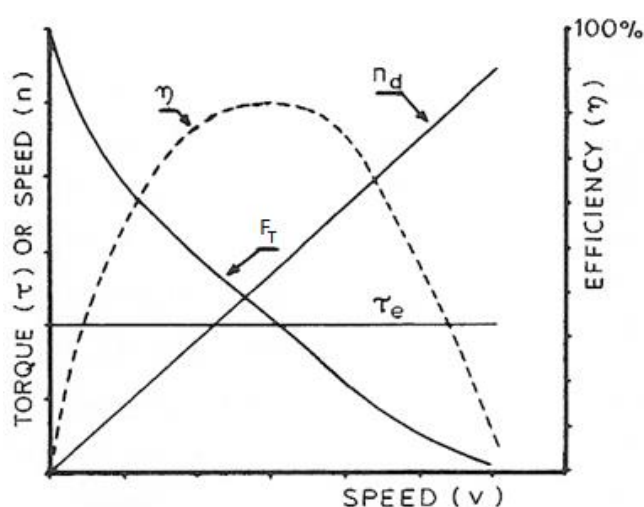


Σχήμα 2.1.10 Διάγραμμα με τα βασικά στοιχεία ενός μετατροπέα ροπής [4]



Σχήμα 2.1.11 Πτερύγωση μετατροπέα ροπής μαζί με τα διανυσματικά διαγράμματα της ροής του ρευστού στα σημεία που υποδεικνύονται [4]

Η υδραυλική κίνηση του ρευστού είναι παρόμοια με αυτή στην ζεύξη ρευστού, μόνο που διαφέρουν η ταχύτητα του κινητήρα, n , και της ατράκτου εξόδου, n_d , και η ροπή του κινητήρα θα πολλαπλασιαστεί αν η ταχύτητα n_d είναι χαμηλή, ή θα μειωθεί αν η ταχύτητα n_d είναι υψηλή. Επίσης, επειδή οι γωνίες των πτερυγίων είναι σχεδιασμένες μόνο για μια συγκεκριμένη τιμή της ταχύτητας και ροής ρευστού, για κάθε τιμή της ταχύτητας του κινητήρα η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης, η , μπορεί να ληφθεί μόνο για μια συγκεκριμένη τιμή της ταχύτητας της ατράκτου εξόδου n_d . Στο Σχήμα 2.1.12 φαίνονται τυπικές χαρακτηριστικές εξόδου ενός τέτοιου μετατροπέα για μία τιμή της ταχύτητας του κινητήρα, όπου η ελκτική δύναμη, F_T , και η ταχύτητα της αμαξοστοιχίας, v , είναι ανάλογες της ροπής εξόδου και της ταχύτητας, αντίστοιχα. Αυτή η απόδοση λαμβάνεται από ένα κινητήρα ο οποίος λειτουργεί υπό σταθερή ταχύτητα και ροπή και έτσι μπορεί κανείς να πει ότι αυτή η μορφή μετατροπέα είναι μια εναλλακτική λύση της ηλεκτρικής μετάδοσης ισχύος.



Σχήμα 2.1.12 Τυπικές χαρακτηριστικές ζεύξης ρευστού για μια τιμή της ταχύτητας του κινητήρα [4]

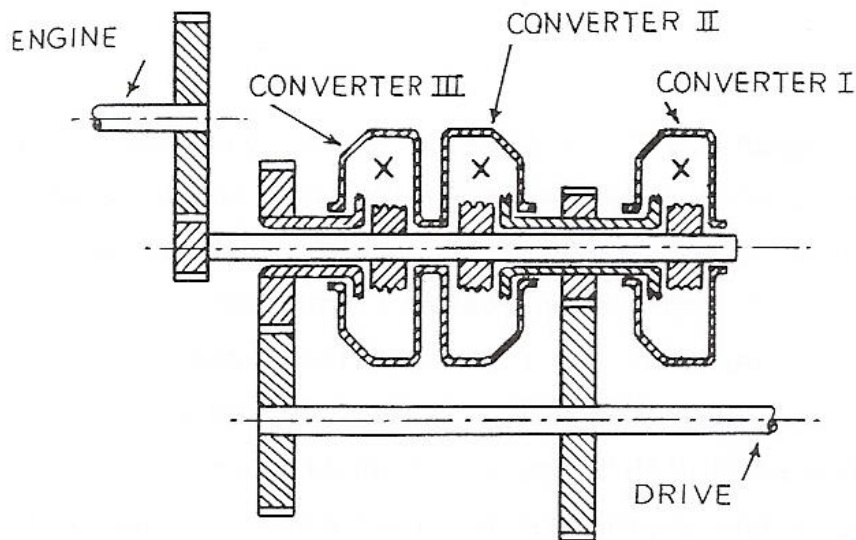
Όπως και με την ζεύξη ρευστού, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από την πτερωτή θα δίνεται από την Εξίσωση 2.3, έτσι ώστε η ισχύς που μεταδίδεται να μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με τον κύβο της

ταχύτητας της ατράκτου εισόδου. Κατά συνέπεια, η ταχύτητα λειτουργίας τέτοιων μετατροπέων συχνά αυξάνεται με την αλλαγή ταχύτητας του κιβωτίου. Έχοντας τρία σετ πτερυγώσεων και μια πιο πολύπλοκη ροή ρευστού, καθιστά αδύνατο για αυτούς τους μετατροπείς να έχουν τους υψηλούς βαθμούς απόδοσης που έχει και η ζεύξη ρευστού, ενώ η μέγιστη τιμή, μεταξύ 82-84%, λαμβάνεται μόνο για ένα περιορισμένο εύρος λειτουργίας.

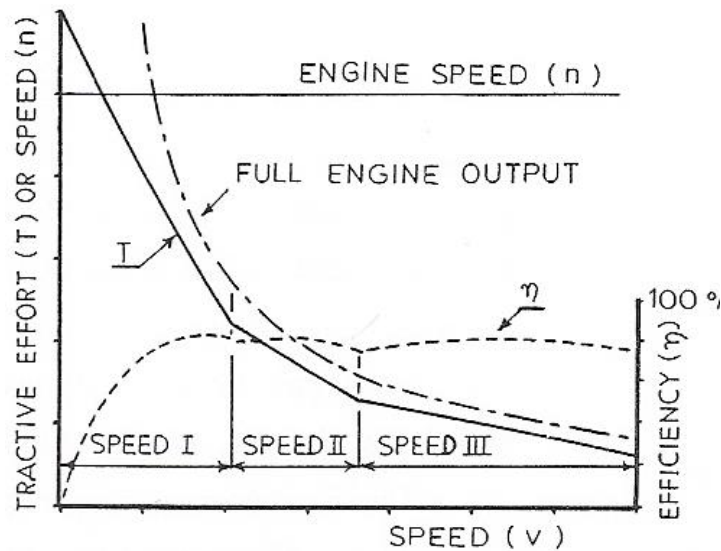
Η ζεύξη ρευστού αντιπροσωπεύει μια μορφή συμπλέκτη μέσω της οποίας, όχι μόνο μπορεί να αποσυνδεθεί η μετάδοση ισχύος, αλλά μπορεί και η ροπή του κινητήρα να μεταδοθεί για σημαντικά χρονικά διαστήματα όταν η σιδηροδρομική μηχανή είναι σταματημένη ή κινείται αργά. Είναι επομένως συμπληρωματικό για το κιβώτιο ταχυτήτων που περιεγράφηκε προηγουμένως, τόσο η βοήθεια που παρέχει στις αλλαγές ταχυτήτων όσο και το ότι επιτρέπει την εκκίνηση της αμαξοστοιχίας μέσω της μετάδοσης ροπής του κινητήρα όταν βρίσκεται σε ακινησία. Τέτοιες μεταδόσεις αποτελούνται συνήθως από κάποια μορφή πλανητικού συστήματος κιβωτίου ταχυτήτων και χρησιμοποιούνται συχνά σε αυτοκινητάμαξες ή σε μικρές σιδηροδρομικές μηχανές, ενώ οι χαρακτηριστικές των επιδόσεών τους είναι περίπου όπως αυτές στο Σχήμα 2.1.4.

Στις μεγαλύτερες μηχανές απαιτείται μια πιο συνεχής αλλαγή σχέσης μετάδοσης, οπότε και προτιμάται ο μετατροπέας ροπής. Δυστυχώς όμως αυτό συνεπάγεται μικρότερο βαθμό απόδοσης και η μέγιστη τιμή λαμβάνεται μόνο για ένα περιορισμένο εύρος ταχύτητας. Έτσι προκύπτει το πρόβλημα το να χρησιμοποιούνται οι μηχανές με όσο περισσότερο αποτελεσματικό τρόπο γίνεται.

Μια τυπική διάταξη η οποία επιτρέπει την λειτουργία με υψηλό βαθμό απόδοσης για ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.13. Σε αυτήν εισάγονται τρεις μετατροπείς, I, II και III, σε σειρά όπου γίνεται αύξηση της ταχύτητας της αμαξοστοιχίας. Στην εκκίνηση χρησιμοποιείται ο μετατροπέας I, ο οποίος μεταδίδει ισχύ, αλλά όσο αυξάνεται η ταχύτητα αυτός αντικαθίσταται από τον μετατροπέα II, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για μεγαλύτερες ταχύτητες αλλά κινείται από το ίδιο γρανάζι. Μια τυπική χαρακτηριστική απόδοσης που θα μπορούσε να ληφθεί από μια μετάδοση αυτής της μορφής φαίνεται στο Σχήμα 2.1.14.



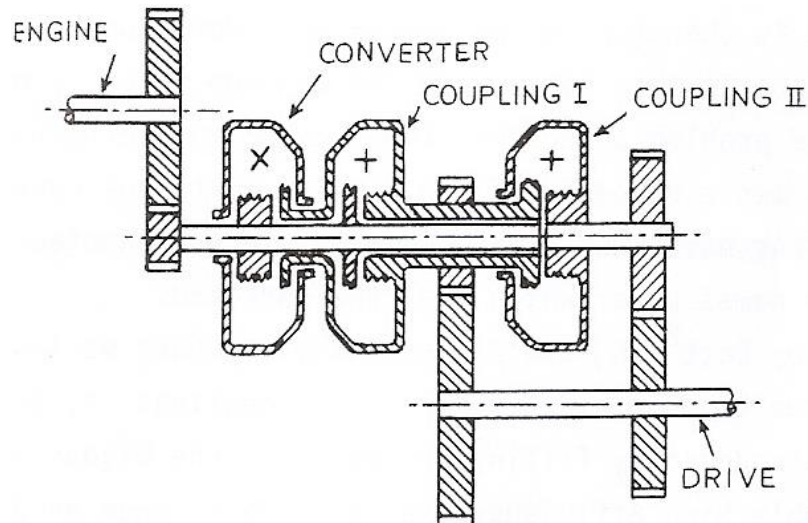
Σχήμα 2.1.13 Διάγραμμα βασικών στοιχείων υδραυλικής μετάδοσης Voith για σιδηροδρομικές μηχανές που καλύπτουν μεγάλο εύρος ταχυτήτων [4]



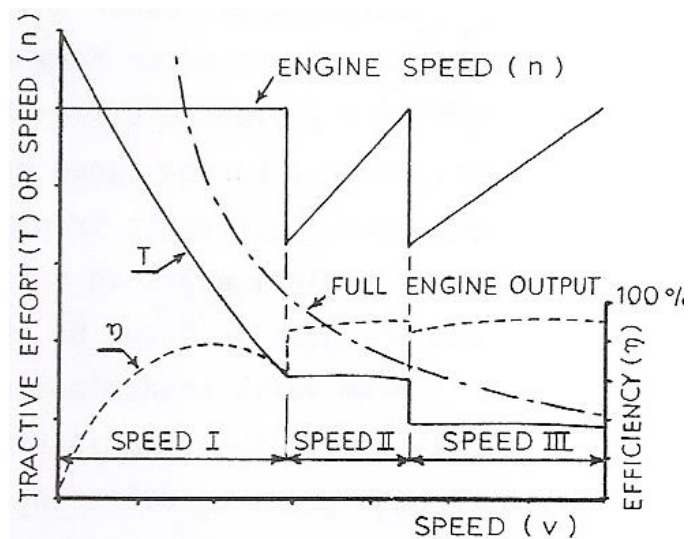
Σχήμα 2.1.14 Πιθανές χαρακτηριστικές επίδοσης μιας σιδηροδρομικής μηχανής εξοπλισμένης με υδραυλική μετάδοση Voith, όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.1.13 [4]

Για μια ταχεία αμαξοστοιχία ή για ένα μηχανοκίνητο βαγόνι που χρησιμοποιείται κυρίως για ταχείες μεταφορές, χρησιμοποιείται μια εναλλακτική διάταξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.15. Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας στην εκκίνηση, αλλά όσο αυξάνεται η ταχύτητα αυτός αντικαθίσταται από μια παρόμοια ζεύξη II μικρότερης σχέσης.

Το πλεονέκτημα αυτής της ζεύξης, όπως βλέπει κανείς και στο Σχήμα 2.1.16, είναι ότι στο υψηλότερο εύρος ταχυτήτων στο οποίο και θα κινείται περισσότερο η σιδηροδρομική μηχανή, η πιο ευθεία οδήγηση επιτρέπει να έχουμε υψηλότερο βαθμό απόδοσης από ότι θα είχαμε αν χρησιμοποιούσαμε ένα μετατροπέα ροπών.

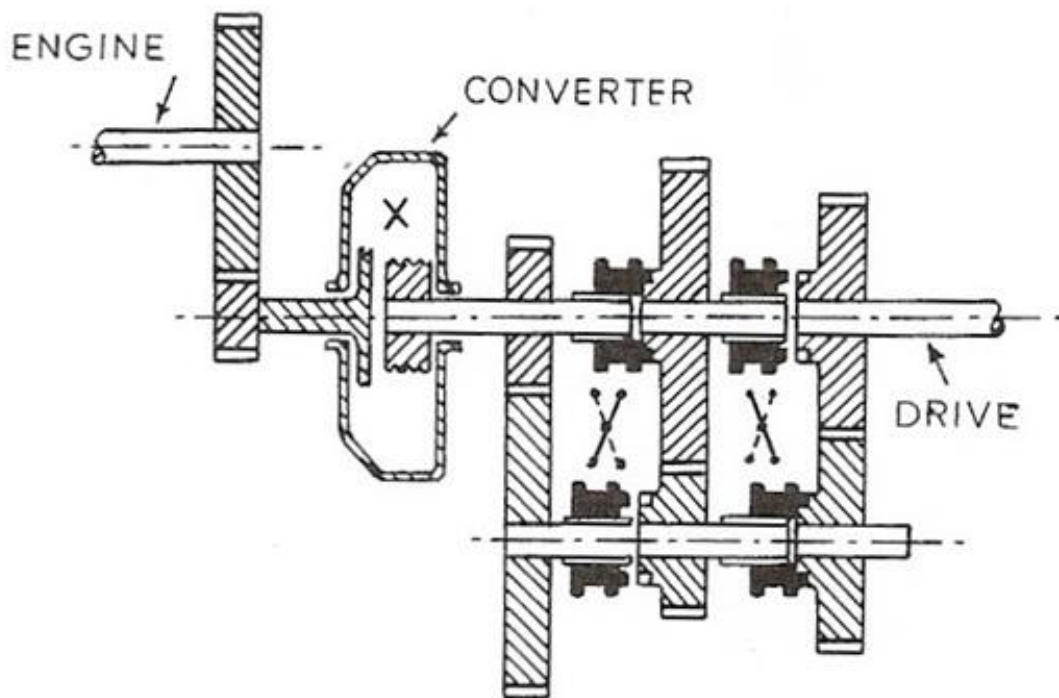


Σχήμα 2.1.15 Διάγραμμα υδραυλικής μετάδοσης Voith για σιδηροδρομική μηχανή ταχείας μεταφοράς [4]

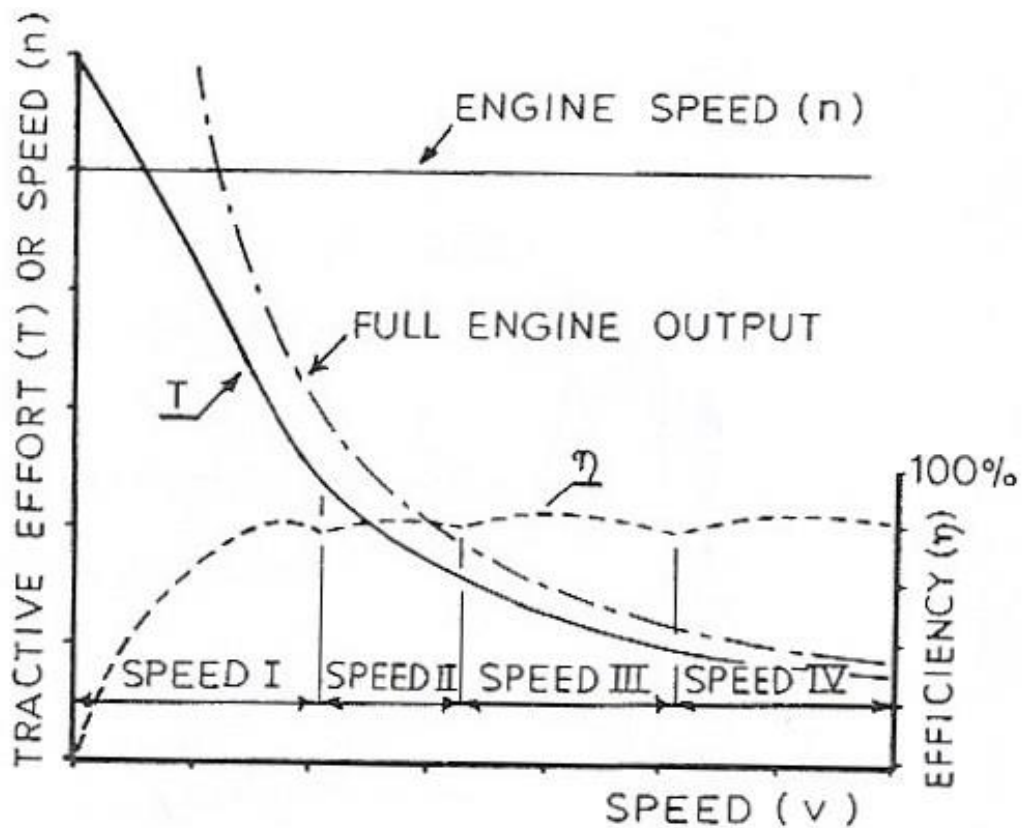


Σχήμα 2.1.16 Πιθανές χαρακτηριστικές επίδοσης μιας σιδηροδρομικής μηχανής ταχείας μεταφοράς εξοπλισμένη με σύστημα μετάδοσης Voith, όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.1.15 [4]

Σε αυτή τη μορφή μετάδοσης, η πλήρης ισχύς της σιδηροδρομικής μηχανής μεταδίδεται μέσα από μια σειρά διάφορων μετατροπένων ή ζεύξεων. Για αυτό το λόγο αυτή η διάταξη είναι πολύ μεγάλη. Αν χρησιμοποιούσαμε ένα μόνο μετατροπέα ροπής, θα μπορούσε να διατηρήσει ένα λογικό βαθμό απόδοσης της τάξης 80% για ένα περιορισμένο εύρος, αλλά αυτό το εύρος θα μπορούσε να μεγαλώσει αλλάζοντας την σχέση ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο η μετάδοση “Mekydro” χρησιμοποιεί ένα μόνο μετατροπέα ροπής που είναι μόνιμα γεμάτος με λάδι και έναν αριθμό εναλλακτικών οδοντωτών τροχών που λειτουργούν μονίμως συντονισμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.17. Το διαφορετικό σε αυτό το σύστημα μετάδοσης είναι ότι η όπισθεν ενσωματώνεται σε άλλον μηχανισμό γρاناζιών. Ο μετατροπέας εμπεριέχει μια εναλλακτική διάταξη πτερυγίων η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αφαιρεί προσωρινά την ροπή εξόδου καθώς γίνεται αλλαγή ταχύτητας. Αυτή η ενέργεια ξεκινάει σε κατάλληλες ταχύτητες μέσω ενός μικρό ρυθμιστή στροφών, με συνέπεια να έχουμε μέγιστη απόδοση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.18.



Σχήμα 2.1.17 Διάγραμμα με τα βασικά στοιχεία μετάδοσης “Mekydro” [4]

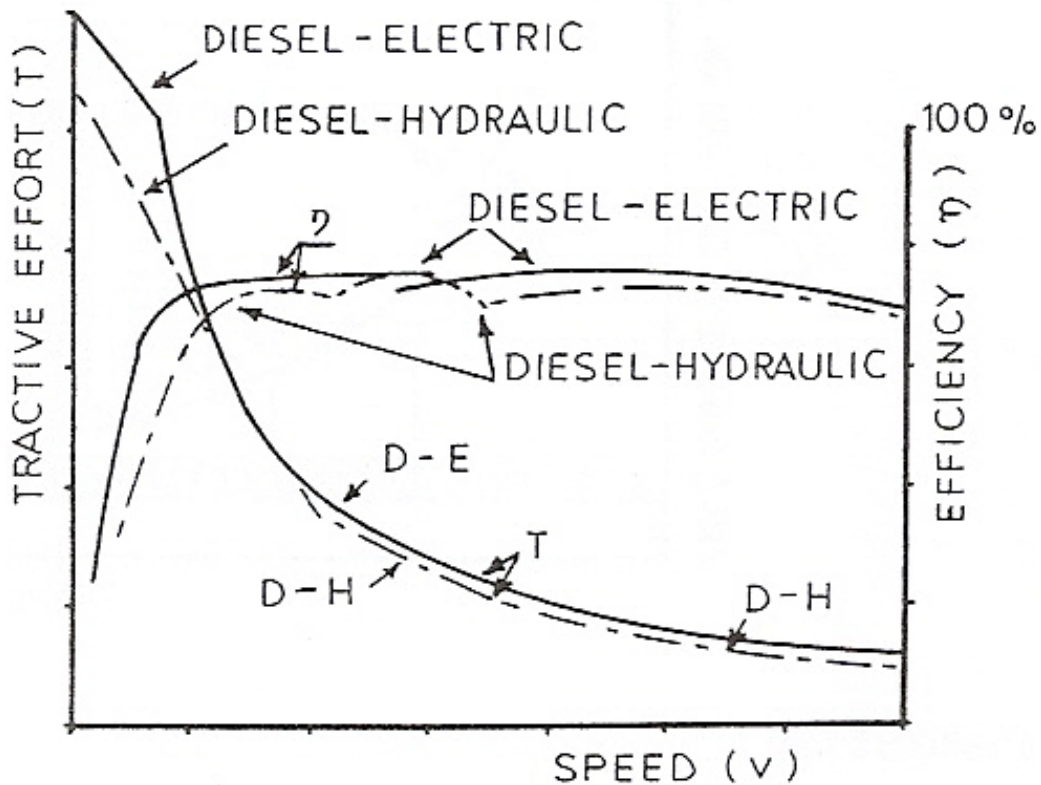


Σχήμα 2.1.18 Πιθανές χαρακτηριστικές επίδοσης μιας σιδηροδρομικής μηχανής εξοπλισμένης με σύστημα μετάδοσης “Mekydro”, όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.1.17 [4]

Επίσης, έχουν αναπτυχθεί και άλλες μορφές υδραυλικής μετάδοσης. Για παράδειγμα ο μετατροπέας Lysholm-Smith, στον οποίο μια πτερωτή με ρυθμιζόμενα πτερύγια και ένας στρόβιλος τριών βαθμίδων προσφέρουν υψηλό βαθμό απόδοσης για ένα συγκριτικά μεγάλο εύρος ταχύτητας ώστε κανονικά να χρησιμοποιείται μόνο ένας μετατροπέας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συνηθέστερη μορφή μετάδοσης είναι η ηλεκτρική, αλλά και η υδραυλική χρησιμοποιείται ευρέως σε ορισμένες χώρες, όπως για παράδειγμα στην Γερμανία. Για τα δύο αυτά συστήματα παρουσιάζεται, στο Σχήμα 2.1.19, μια σύγκριση των επιδόσεων και των βαθμών απόδοσής τους, για δύο παρόμοιες σιδηροδρομικές μηχανές που χρησιμοποιούν τις δύο αυτές μορφές μετάδοσης. Φαίνεται ότι η ηλεκτρική μετάδοση έχει λίγο πιο μεγάλες μέγιστες τιμές και διατηρούνται πιο ομαλά για όλο το εύρος ταχυτήτων. Στην εκκίνηση, η ηλεκτρική μετάδοση έχει

μεγαλύτερη χωρητικότητα για να απορροφήσει την ενέργεια που χάνεται στις χαμηλές ταχύτητες.



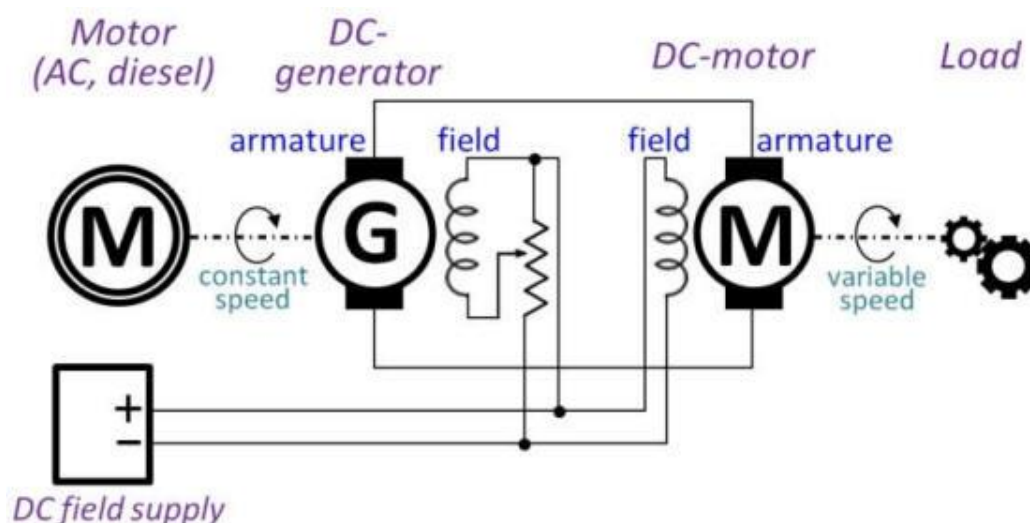
Σχήμα 2.1.19 Σύγκριση επίδοσης και συνολικού βαθμού μετάδοσης δύο σιδηροδρομικών μηχανών με παρόμοιους κινητήρες, με την μία να έχει ηλεκτρικό και την άλλη υδραυλικό σύστημα μετάδοσης [4]

Γενικά όμως, το να αποφασισθεί ποια μορφή μετάδοσης θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται κυρίως από μη τεχνολογικούς παράγοντες, όπως το κόστος, η διαθεσιμότητα ορισμένων υλικών, ιδιαίτερα του χαλκού, και κόστη συντήρησης. Η υδραυλική μετάδοση χρησιμοποιείται κυρίως σε μηχανοκίνητα βαγόνια, αν και σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί επαρκής ο συνδυασμός πλανητικού κιβωτίου ταχυτήτων με ζεύξη ρευστού [4].

2.2 Ηλεκτρολογικό Μέρος Σιδηροδρομικών Συστημάτων

2.2.1 Συσχέτιση Χαρακτηριστικών Κινητήρα Diesel και Γεννήτριας για την Επιλογή Κατάλληλης Ταχύτητας Περιστροφής

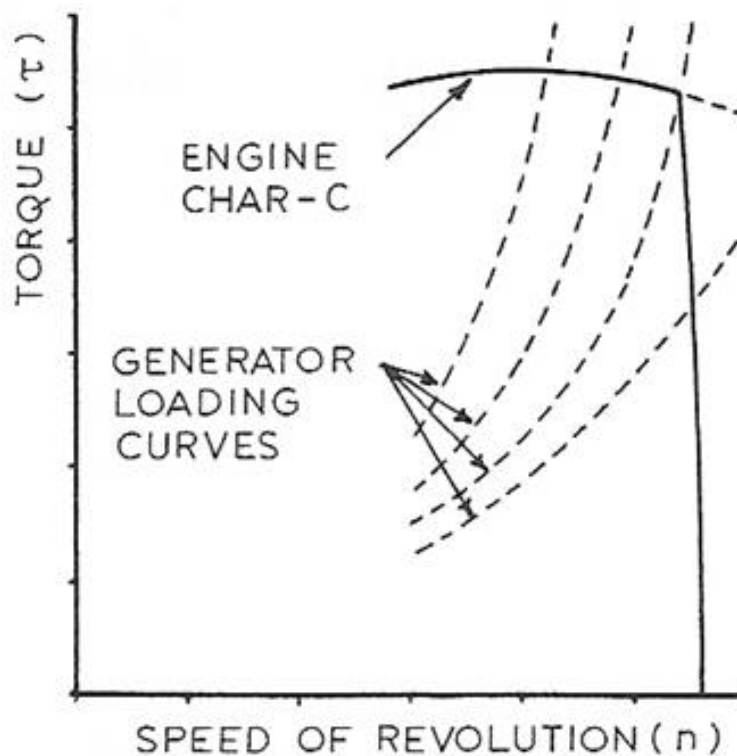
Για ηλεκτρική μετάδοση ισχύος είναι σύνηθες να συνδέεται απευθείας μια γεννήτρια με τον κινητήρα diesel έτσι ώστε να απαιτείται μόνο ένα επιπλέον ρουλεμάν. Αυτή η γεννήτρια κανονικά παράγει συνεχές ρεύμα με μεταβαλλόμενη τάση παρέχοντας ενέργεια στους σειριακούς κινητήρες έλξης συνεχούς ρεύματος έτσι ώστε να έχουμε ένα σύστημα ελέγχου Ward-Leonard, όπως φαίνεται και στο παράδειγμα του Σχήματος 2.2.1 [4].



Σχήμα 2.2.1 Βασική διάταξη συστήματος ελέγχου Ward-Leonard [28]

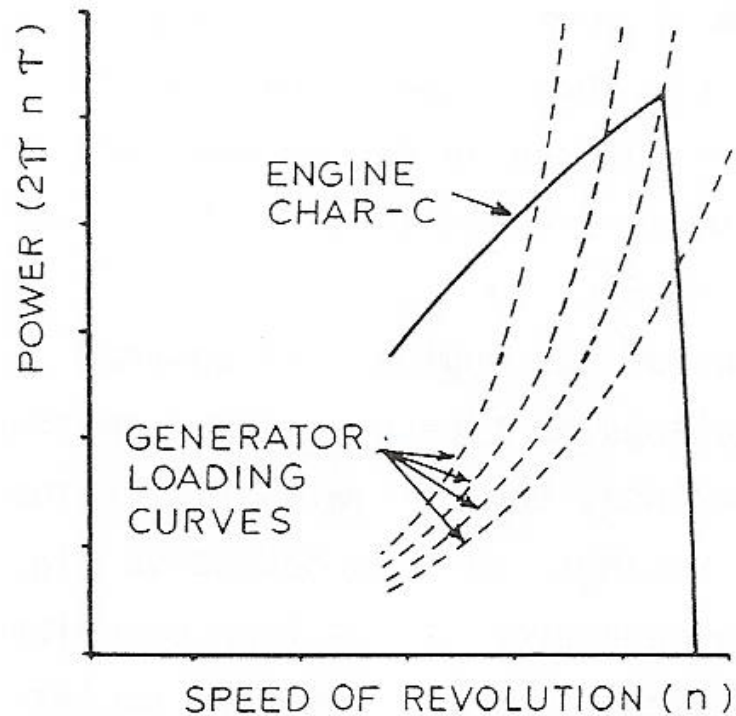
Ο Sachs έδειξε ότι για να έχουμε ικανοποιητική μετάδοση ισχύος, πρέπει οι χαρακτηριστικές του φορτίου που παράγεται από την γεννήτρια να είναι στενά συνδεδεμένες με αυτές του κινητήρα diesel. Εξετάζοντας την μέγιστη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα diesel, από το Σχήμα 2.1.1, και αφήνοντας εκεί να υπερτεθούν αντίστοιχες καμπύλες μιας γεννήτριας σε διάφορους ρυθμούς φορτίου, για μια τυπική γεννήτρια που τροφοδοτεί έναν αριθμό κινητήρων μιας αμαξοστοιχίας, μπορεί να θεωρηθεί ως η ρυμούλκηση μιας αμαξοστοιχίας σε διαφορετικούς ρυθμούς υπό σταθερή ταχύτητα. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.2. Η ταχύτητα περιστροφής στην οποία θα

λειτουργεί η μονάδα συνδυασμού κινητήρα diesel με γεννήτρια θα δίνεται από την τομή αυτών των καμπυλών [4].



Σχήμα 2.2.2 Χαρακτηριστική μέγιστης ροπής-ταχύτητας τυπικού κινητήρα diesel (συνεχής γραμμή) σε σύγκριση με χαρακτηριστικές φορτίου μιας συγκρίσιμης γεννήτριας (διακεκομμένες γραμμές) [4]

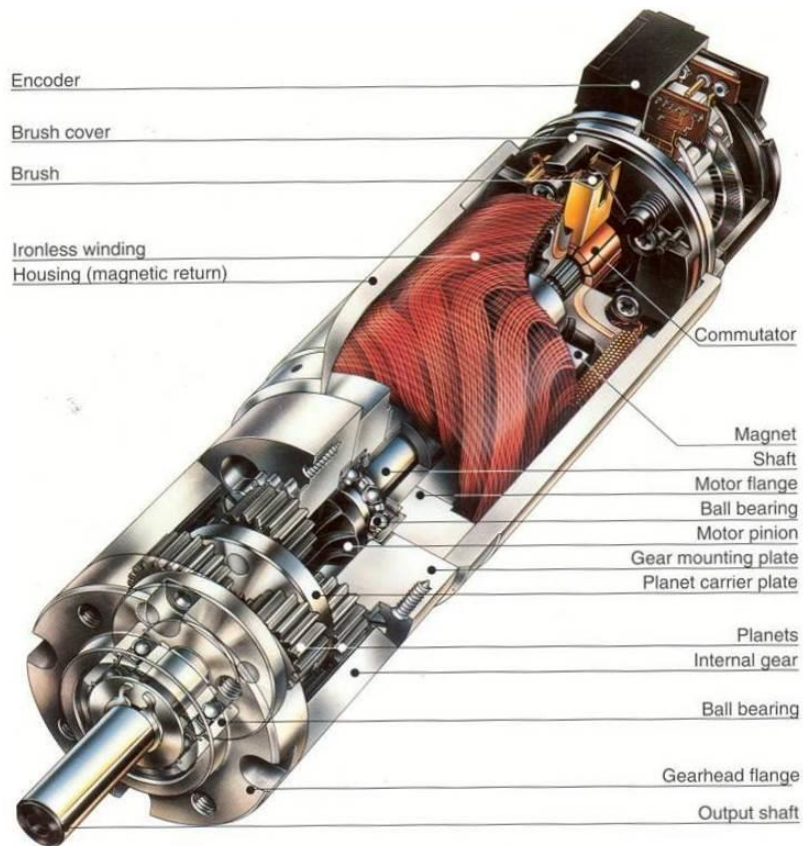
Έχει παρατηρηθεί ότι αν το φορτίο της γεννήτριας είναι πλεονάζον, η ταχύτητα αυτή θα μειωθεί κάτω από αυτή που επιτρέπει ο ρυθμιστής στροφών, ενώ αν το φορτίο είναι πολύ μικρό τότε θα έχουμε και μικρότερη ροπή. Μεταφέροντας αυτές τις τιμές στην σχέση μεταξύ ισχύος-ταχύτητας, είναι φανερό ότι υπάρχει ένα κρίσιμο φορτίο της γεννήτριας στο οποίο λαμβάνεται πλήρες φορτίο και οποιαδήποτε απόκλιση της χαρακτηριστικής προς οποιαδήποτε κατεύθυνση θα μειώσει σημαντικά την λαμβανόμενη ισχύ. Το παραπάνω φαίνεται στο Σχήμα 2.2.3. Αρχικά στην περίπτωση των σιδηροδρομικών μηχανών diesel-electric λόγω του ότι δεν εκτιμήθηκε αυτή η σχέση, υπήρξαν απογοητευτικές επιδόσεις τέτοιων κινητήρων.



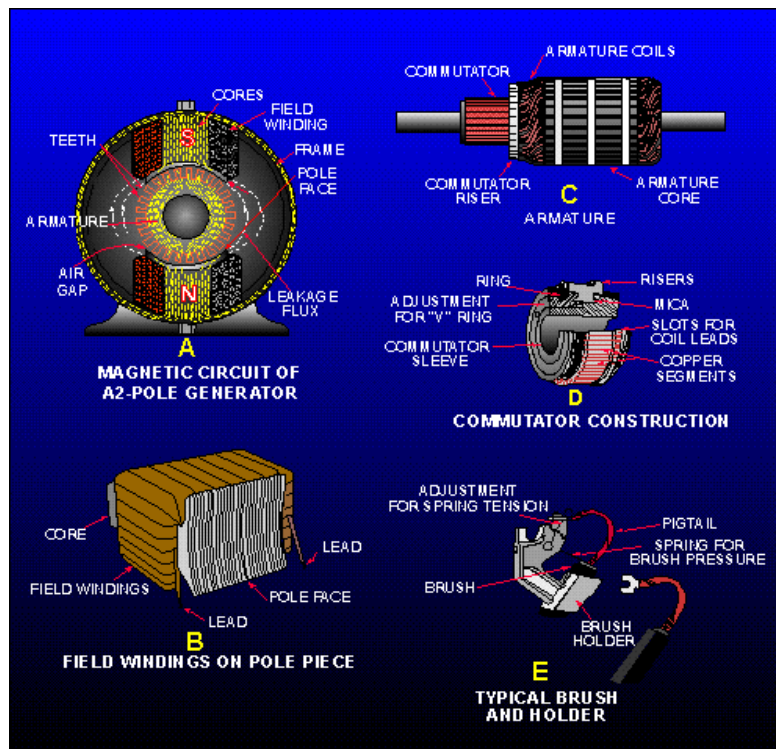
Σχήμα 2.2.3 Χαρακτηριστική μέγιστης ισχύος-ταχύτητας τυπικού κινητήρα diesel και χαρακτηριστικές φορτίου ισχύος συγκρίσιμης γεννήτριας [4]

2.2.2 Γεννήτρια Συνεχούς ρεύματος και οι Χαρακτηριστικές της

Οι επιδόσεις της γεννήτριας απεικονίζονται πιο εύκολα μέσω των γεννητριών με μεταγωγέα συνεχούς ρεύματος με πολλαπλές περιελίξεις πεδίου. Ένα τέτοιο μηχάνημα μπορεί να έχει παράλληλες ή σε σειρά περιελίξεις που διεγείρονται ξεχωριστά, ενώ συνήθως συμπεριλαμβάνεται μια ξεχωριστή περιέλιξη σε σειρά με σκοπό την εκκίνηση της μηχανής χρησιμοποιώντας την γεννήτρια ως κινητήρα που τροφοδοτείται από την βοηθητική μπαταρία [4]. Στο Σχήμα 2.2.4 απεικονίζεται μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος σε τομή και στο Σχήμα 2.2.5 τα μέρη από τα οποία αποτελείται μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος.

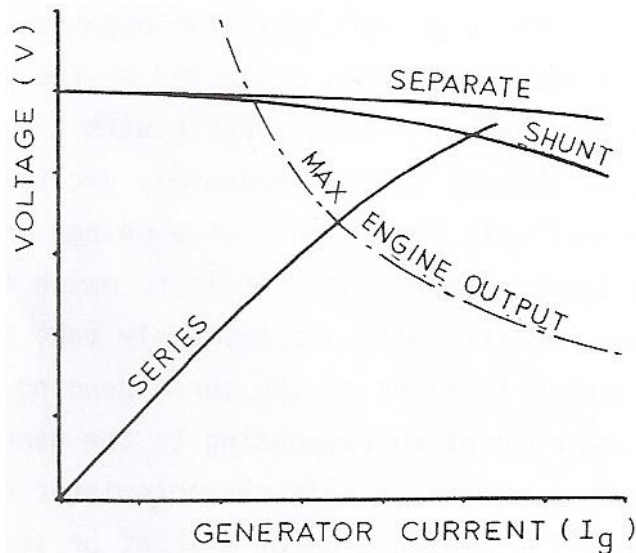


Σχήμα 2.2.4 Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος σε τομή [29]



Σχήμα 2.2.5 Κατασκευαστικό διάγραμμα γεννήτριας συνεχούς ρεύματος [30]

Οι χαρακτηριστικές μιας μηχανής με μια μονή περιέλιξη από κάθε μια από αυτές τις διατάξεις φαίνονται στο Σχήμα 2.2.6 σε σύγκριση με την ορθογώνια υπερβολή που αντιστοιχεί στην σταθερή μέγιστη έξοδο ισχύος της μηχανής και φαίνεται εύκολα ότι καμία από αυτές τις χαρακτηριστικές από μόνη της δεν δίνει την μορφή που απαιτείται [4].



Σχήμα 2.2.6 Χαρακτηριστικές γεννήτριας με σειριακή, παράλληλη ή ξεχωριστή διέγερση σε σύγκριση με την μέγιστη ισχύ εξόδου του κινητήρα [4]

Οι ξεχωριστά διεγερμένες και οι παράλληλες χαρακτηριστικές είναι παρόμοιες, αλλά αν η ισχύς της ξεχωριστά διεγερμένης περιέλιξης λαμβάνεται από μια διεγερμένη γεννήτρια η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη στην μηχανή τότε αυτή θα έχει μια σταθεροποιητική αντίδραση, δεδομένου ότι οποιαδήποτε αύξηση στην ταχύτητα θα προκαλέσει και αύξηση στο φορτίο της γεννήτριας. Η επιθυμητή χαρακτηριστική μπορεί να προσεγγισθεί μόνο με τη χρήση δύο, ή πιθανόν και των τριών αυτών μορφών περιελίξεων και τα αποτελέσματά τους μπορούν να βρεθούν όπως δείχνεται παρακάτω.

Για μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος

$$E_g = k_{I_g} n F(I_f) \quad (2.4)$$

και

$$V = E_g - I_g r_g \quad (2.5)$$

Όπου E_g είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη που παράγεται από την μηχανή, n είναι η ταχύτητα περιστροφής, I_g είναι το ρεύμα της γεννήτριας, r_g είναι η πραγματική αντίσταση και k_{lg} είναι μια σταθερά. Σε αυτή τη περίπτωση όμως, το ρεύμα διέγερσης, I_f , αντιστοιχεί στα ρεύματα των ξένης διέγερσης, παράλληλων και σε σειρά περιελίξεων, που συμβολίζονται ως I_{sep} , I_{sh} και I_{ser} αντίστοιχα. Επίσης, οι μαγνητικές τους επιδράσεις θα εξαρτώνται από τον αριθμό των ελιγμάτων των αντίστοιχων περιελίξεων T_{sep} , T_{sh} και T_{ser} . Οπότε και η $F(I_f)$ θα πρέπει να αντικατασταθεί με $F(I_{sep}T_{sep})$, $F(I_{sh}T_{sh})$ ή $F(I_{ser}T_{ser})$. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν και οι ξεχωριστές και οι διακλαδωμένες διεγέρσεις τότε ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν μαζί, καθώς οι ενέργειές τους είναι παρόμοιες, ενώ η περιέλιξη T_{ser} μπορεί να συνδεθεί είτε στα θετικά είτε στα αρνητικά σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Επίσης, το ρεύμα στην διακλαδωμένη περιέλιξη εξαρτάται από την τάση

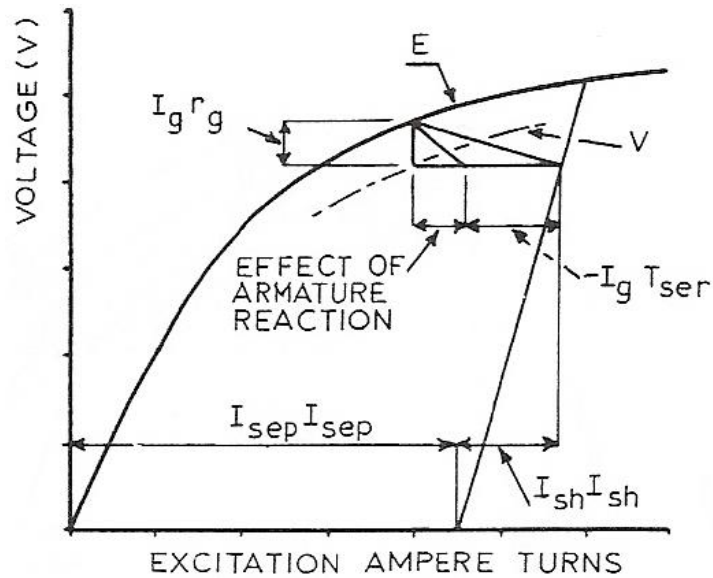
$$I_{sh} = \frac{V}{r_{sh}} \quad (2.6)$$

όπου r_{sh} είναι η συνολική αντίσταση του κυκλώματος της παράλληλης περιέλιξης. Συνδέοντας αυτά έχουμε

$$E_g = k_{lg}nF \left(I_{sep}T_{sep} + \frac{V}{r_{sh}}T_{sh} \pm I_{ser}T_{ser} \right) \quad (2.7)$$

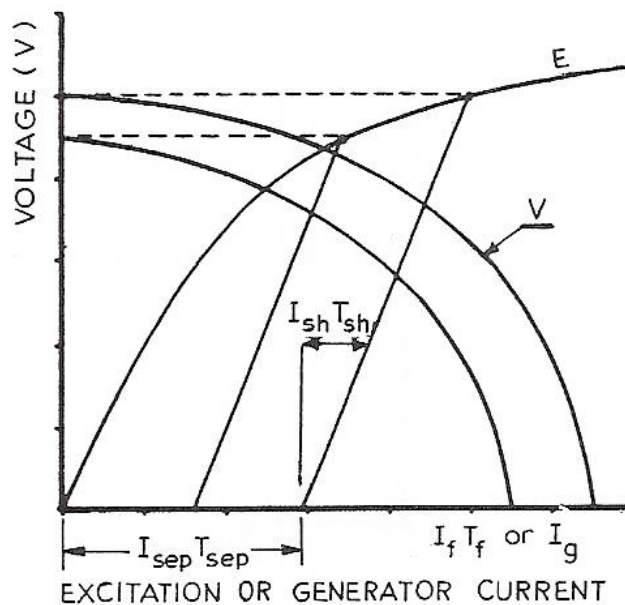
όπου πρακτικά πρέπει να υπάρξει και ανοχή λόγω της απομαγνήτισης του οπλισμού, η οποία καθορίζεται καλύτερα από πραγματική μέτρηση.

Αυτή η σχέση είναι δύσκολο να εκφραστεί με κανονικές συνθήκες υπολογισμών και οι χαρακτηριστικές τάσης οποιασδήποτε γεννήτριας καθορίζονται πιο εύκολα με την κατασκευή ενός διαγράμματος με την μορφή όπως στο Σχήμα 2.2.7. Αυτή αντιστοιχεί στο συμβατικό διάγραμμα μιας παράλληλης γεννήτριας, στην οποία όμως μπορούν να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις των τριών πεδίων, η πτώση της αντίστασης και η απομαγνήτιση του οπλισμού. Το διάγραμμα απεικονίζει μια γεννήτρια με το πεδίο της σε σειρά συνδεδεμένο στα αρνητικά, αλλιώς φυσικά η επιπρόσθετη σειριακή μαγνήτιση θα προβαλλόταν στην θετική πλευρά της γραμμής παραλληλίας.

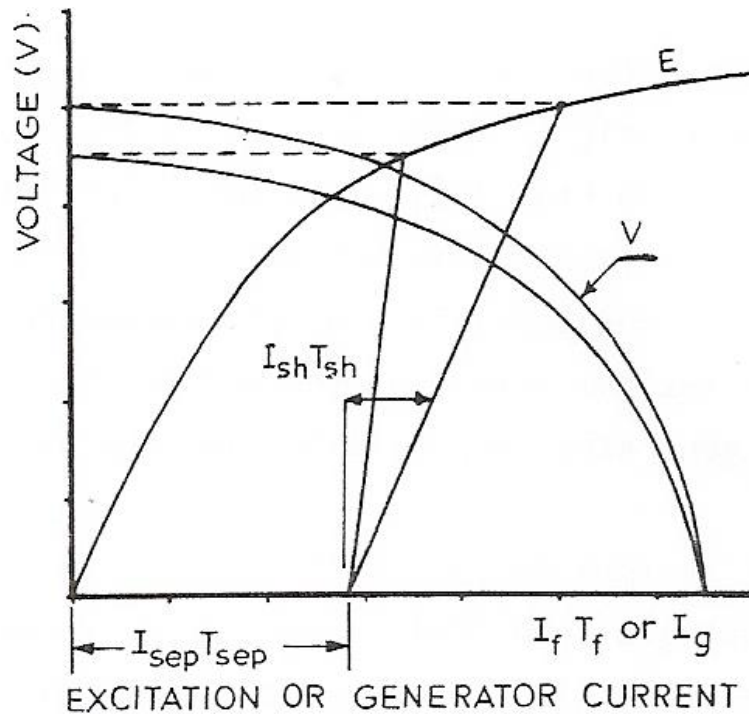


Σχήμα 2.2.7 Καθορισμός της χαρακτηριστικής τάσης μιας γεννήτριας [4]

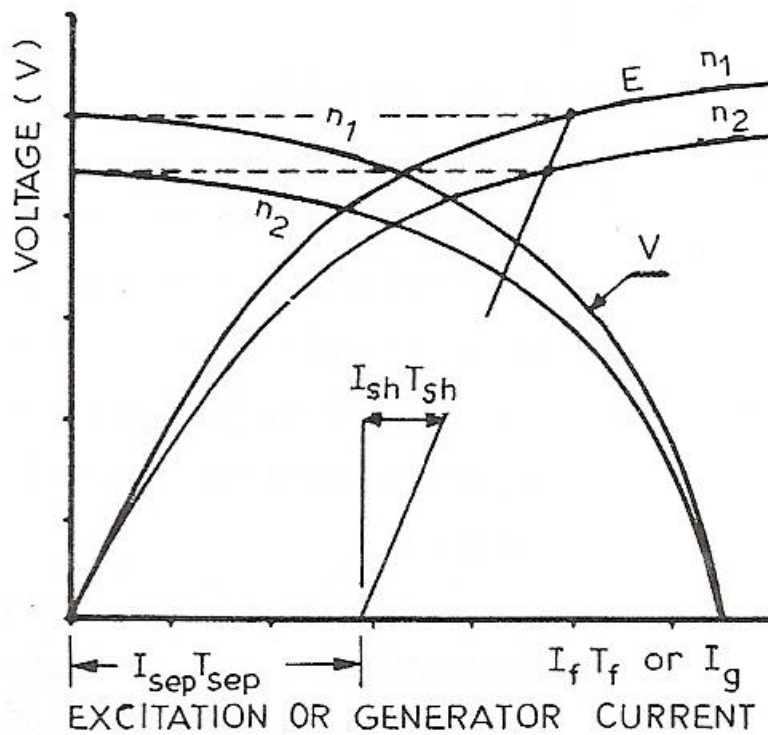
Από αυτό το διάγραμμα μπορούν να καθοριστούν οι επιδόσεις μιας γεννήτριας οποιασδήποτε διάταξης πεδίου και οι επιδράσεις των αλλαγών σε ένα ξεχωριστά διεγερμένο ή σε παράλληλα πεδία φαίνονται στο Σχήμα 2.2.8 και 2.2.9 αντίστοιχα, ενώ αυτό με την αλλαγή στην ταχύτητα φαίνεται στο Σχήμα 2.2.10 [4].



Σχήμα 2.2.8 Επίδραση της μεταβολής ενός ξεχωριστά διεγερμένου πεδίου στην κύρια γεννήτρια [4]



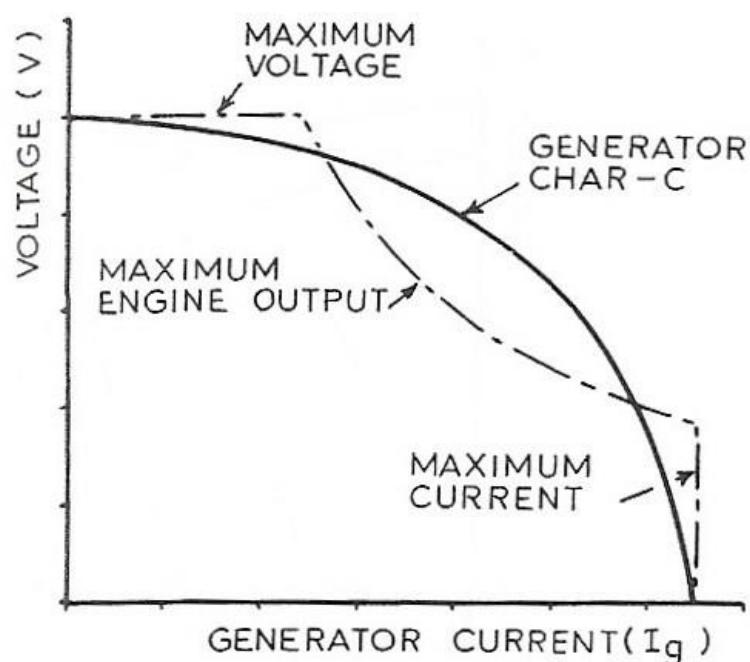
Σχήμα 2.2.9 Επίδραση της μεταβολής ενός παράλληλα διεγερμένου πεδίου στην κύρια γεννήτρια [4]



Σχήμα 2.2.10 Επίδραση της μεταβολής ταχύτητας στην κύρια γεννήτρια [4]

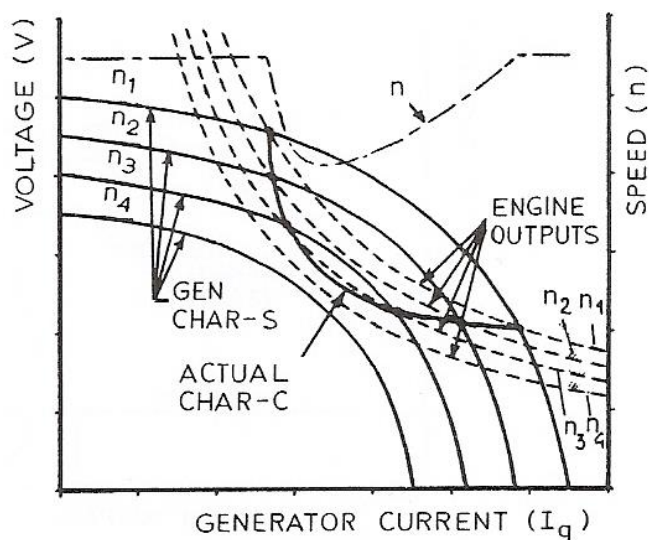
2.2.3 Χαρακτηριστικές Λειτουργίας Κινητήρα Diesel Συνδεδεμένου με Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος

Εάν η είσοδος της γεννήτριας πρέπει να ταιριάζει με την μέγιστη ισχύ εξόδου της μηχανής, τότε η επιθυμητή μέγιστη χαρακτηριστική θα πάρει περίπου την μορφή μιας ορθογώνιας υπερβολής. Αυτή, μαζί με τους περιορισμούς της γεννήτριας και του κινητήρα, απεικονίζει την έξοδο της μηχανής σύμφωνα με τις επιδόσεις της αντίστοιχης γεννήτριας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.11. Είναι θετικό το να αξιοποιούνται μαζί και παράλληλες και ξεχωριστά διεγερμένες περιελίξεις, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται συχνά ο συνδυασμός και των τριών μορφών. Η χαρακτηριστική που λαμβάνεται δίνει μια καλή προσέγγιση στους περιορισμούς της τάσης και του ρεύματος, όπου και το τελευταίο προστατεύει την μηχανή σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, αλλά πάνω από το ενδιάμεσο εύρος η ονομαστική φόρτιση της γεννήτριας θα υπερβαίνει την ενέργεια που μπορεί να παράγεται από τον κινητήρα.



Σχήμα 2.2.11 Επιθυμητή μέγιστη χαρακτηριστική κύριας γεννήτριας (διακεκομμένη γραμμή) σε σύγκριση με μια χαρακτηριστική που λαμβάνεται από μια παράλληλα ή ξεχωριστά διεγερμένη περιέλιξη συνδυασμένη με μια αρνητική σειριακή περιέλιξη [4]

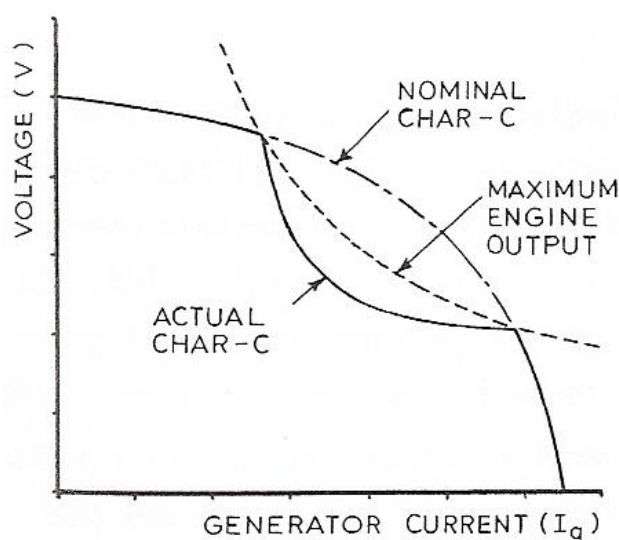
Σε αυτές τις περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.2, ο κινητήρας, ο οποίος λειτουργεί στην μέγιστη χαρακτηριστική του, θα υπερφορτωθεί και έτσι η ταχύτητά του θα μειωθεί, οπότε, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.3, η ισχύς εξόδου του θα μειωθεί. Η τελική μέγιστη απόδοση του συνδυασμού κινητήρα και γεννήτριας μπορεί να καθοριστεί φτιάχνοντας το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 2.2.12, στο οποίο συγκρίνονται οι καμπύλες αποδόσεων του κινητήρα και της γεννήτριας, σε σχέση με την ισχύ εξόδου της γεννήτριας, σε διάφορες τιμές της ταχύτητας. Για οποιοσδήποτε ταχύτητες n_1 , n_2 , κτλ, εφόσον η έξοδος του κινητήρα και η είσοδος της γεννήτριας πρέπει να ισορροπούν, η τάση και το ρεύμα που παράγονται από την γεννήτρια θα δίνονται από τα σημεία τομής της κάθε ταχύτητας του κινητήρα και η θέση αυτών των σημείων απεικονίζει την πραγματική χαρακτηριστική της εξόδου. Οι τιμές των ταχυτήτων n , όταν χαράσσονται δείχνουν την μείωση που συμβαίνει κατά το ενδιάμεσο εύρος.



Σχήμα 2.2.12 Καθορισμός της πραγματικής μέγιστης ισχύος εξόδου του κινητήρα σε υπερφόρτωση μαζί με την γεννήτρια [4]

Η πραγματική χαρακτηριστική της εξόδου κάνει «τα κοίλα προς τα κάτω», για τις τιμές κάτω από αυτές που αντιστοιχούν στην μέγιστη ισχύ εξόδου του κινητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.13. Αυτό μπορεί να έχει μικρή σημασία αν υπάρχει επαρκής διαθέσιμη ισχύς, αλλά έτσι δεν

εκμεταλλευόμαστε πλήρως τον εξοπλισμό που μας παρέχεται. Για τις βαθμίδες όπου επιλέγονται χαμηλότερα επίπεδα ισχύος, εκτός ενδεχομένως από την προτελευταία βαθμίδα, η ισχύς που λαμβάνεται από την γεννήτρια είναι συνήθως μικρότερη της μέγιστης εξόδου του κινητήρα για δεδομένη ταχύτητα, έτσι ώστε η πλήρης χαρακτηριστική της γεννήτριας να είναι διαθέσιμη για όλο της το εύρος.

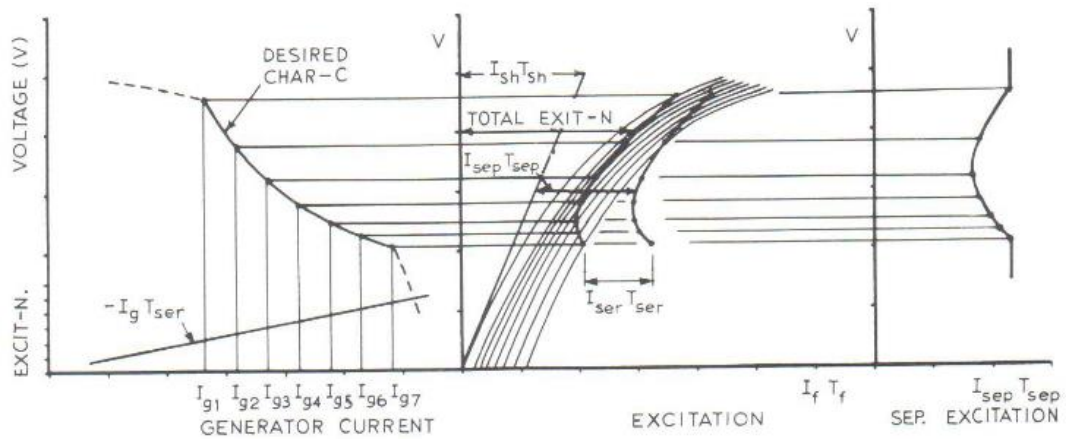


Σχήμα 2.2.13 Πραγματική χαρακτηριστική γεννήτριας σε μέγιστη ισχύ που κάνει «τα κοίλα προς τα κάτω» [4]

Για να εξασφαλίσουμε πλήρως το όφελος της μέγιστης ισχύος εξόδου του κινητήρα, είναι απαραίτητο η απόδοση της γεννήτριας που αντιστοιχεί στην βαθμίδα της «πλήρους ισχύος» να μειωθεί κατά το ενδιάμεσο τμήμα του εύρους του, έτσι ώστε να διατηρηθεί η μέγιστη ταχύτητα του κινητήρα.

Αυτή η εκτίμηση έγινε πρώτη φορά από τον Lemp το 1914, που επινόησε ένα σύστημα ελέγχου πεδίου στο οποίο λειτουργεί ο ρυθμιστής στροφών του κινητήρα και μειώνει αυτόματα την διέγερση της γεννήτριας.

Η ρύθμιση της διέγερσης γίνεται συνήθως στο κύκλωμα της περιελίξεως ξένης διεγέρσεως και η απαραίτητη μείωση για την παραγωγή οποιασδήποτε χαρακτηριστικής της κύριας γεννήτριας μπορεί να καθοριστεί μέσω της βοήθειας του διαγράμματος που φαίνεται στο Σχήμα 2.2.14.



Σχήμα 2.2.14 Καθορισμός των τιμών της συνολικής και της ξένης διέγερσης που απαιτούνται για την παραγωγή οποιασδήποτε επιθυμητής χαρακτηριστικής της κύριας γεννήτριας [4]

Σε αυτό το σχήμα, οι χαρακτηριστικές τάσης της κύριας γεννήτριας που αντιστοιχούν στις ίδιες τιμές του ρεύματος I_g απεικονίζονται πρώτα σε σχέση με τον συνολικό αριθμό των αμπερελιγμάτων, όπως φαίνεται και στο κεντρικό τμήμα του διαγράμματος. Στη συνέχεια συγκρίνονται με τις τάσεις των επιθυμητών χαρακτηριστικών που αντιστοιχούν στις ίδιες τιμές των ρευμάτων I_g , και έτσι λαμβάνεται μια καμπύλη που δείχνει την συνολική απαιτούμενη διέγερση. Τότε από την Εξίσωση 2.5, και δεδομένου ότι η σειριακή περιέλιξη συνδέεται με το αρνητικό άκρο, τα συνολικά αμπερελίγματα $I_f T_f$ θα δίνονται από την σχέση

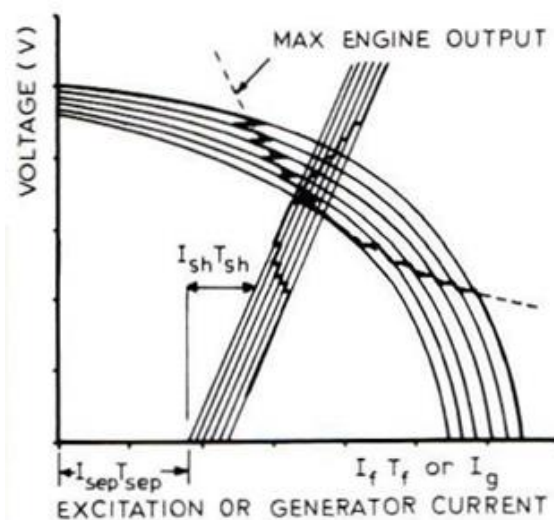
$$I_f T_f = I_{sep} T_{sep} + \frac{V}{r_{sh}} T_{sh} - I_{ser} T_{ser} \quad (2.8)$$

και τα απαιτούμενα αμπερελίγματα για τη ξένη διέγερση είναι

$$I_{sep} T_{sep} = (I_f T_f + I_{ser} T_{ser}) - \frac{V}{r_{sh}} T_{sh} \quad (2.9)$$

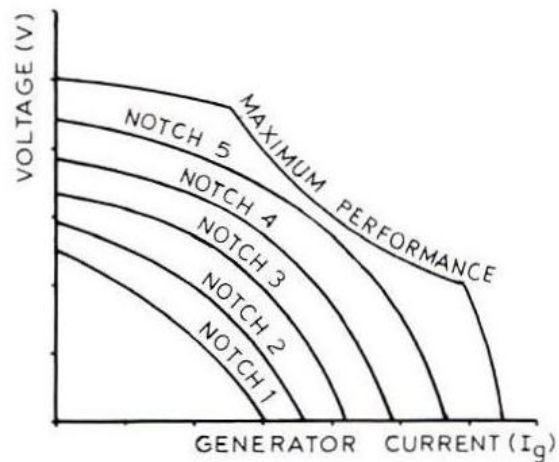
Η διέγερση εκτροπής $\frac{V}{r_{sh}} T_{sh}$, που είναι ανάλογη της τάσης, μπορεί να απεικονίζεται ως μια ευθεία γραμμή με κλίση προς τον άξονα της τάσης, και οι παράλληλες τιμές των $I_{ser} T_{ser}$ να προστίθενται στην συνολική διέγερση δίνοντας έτσι μια δεύτερη καμπύλη απεικονίζοντας την $I_f T_f + I_{ser} T_{ser}$. Επομένως οι απαιτούμενες τιμές των $I_{sep} T_{sep}$ μπορούν να βρεθούν ως η διαφορά στη τιμή της διέγερσης μεταξύ των δύο αυτών γραμμών και απεικονίζονται χωριστά στα δεξιά του διαγράμματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι, καθώς η τάση

αυξάνεται, η ξένη διέγερση πρέπει πρώτα να μειωθεί και στη συνέχεια να αυξηθεί. Το διάγραμμα δείχνει επίσης το ρόλο που παίζει η περιέλιξη εκτροπής σε αυτή τη διάταξη, δεδομένου ότι συμβάλλει σημαντικά στην παροχή της διέγερσης που απαιτείται για την παραγωγή μιας χαρακτηριστικής με την απαιτούμενη μορφή, και χωρίς αυτή θα ήταν βαρύτερα τα ρεύματα που θα έπρεπε να περάσουν από τον έλεγχο Lemp. Αυτή παίρνει συνήθως την μορφή ενός αντιστάτη μεταβλητής αντίστασης, έτσι ώστε οι χαρακτηριστικές μιας πραγματικής γεννήτριας να είναι πιθανώς όπως περίπου στο Σχήμα 2.2.15.



Σχήμα 2.2.15 Πραγματικές χαρακτηριστικές μιας τυπικής γεννήτριας με ρύθμιση Lemp [4]

Για μικρότερη ισχύ εξόδου, που αντιστοιχεί στις χαμηλότερες βαθμίδες της κύριας μονάδας ελέγχου, η διαθέσιμη ισχύς του κινητήρα θα είναι πιθανώς επαρκής, ενώ η συσκευή Lemp χρειάζεται συνήθως μόνο για τις υψηλότερες βαθμίδες. Η πλήρης απόδοση της μονάδας κινητήρα με γεννήτρια που αντιστοιχεί στις διάφορες βαθμίδες ελέγχου θα είναι περίπου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.16.



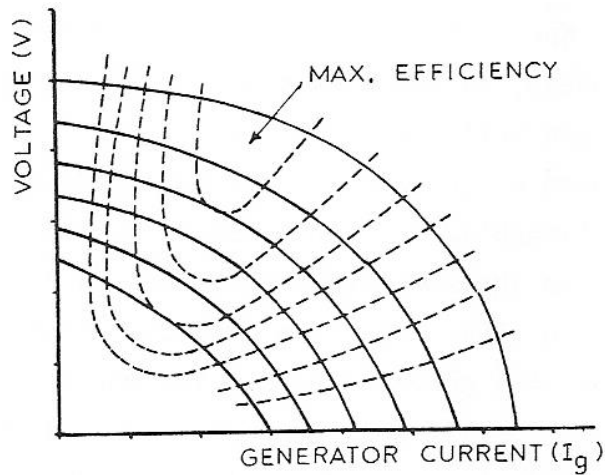
Σχήμα 2.2.16 Τυπικές επιδόσεις μιας μονάδας κινητήρα με γεννήτρια που αντιστοιχούν σε διάφορες βαθμίδες της κύριας μονάδας ελέγχου [4]

Η απόδοση της γεννήτριας, η οποία για μια μηχανή συνεχούς ρεύματος θα έχει πιθανόν μια μέγιστη τιμή περίπου 94%, μπορεί είτε να υπολογιστεί είτε να μετρηθεί για οποιαδήποτε συνθήκη λειτουργίας και αυτές οι τιμές μπορούν επίσης να απεικονισθούν στο διάγραμμα επιδόσεων ως μια σειρά από προφίλ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.17. Οι μετρήσεις των επιδόσεων μιας μονάδας κινητήρα με γεννήτρια γίνονται συνήθως με έναν μεταβλητό αντιστάτη για να απορροφά το φορτίο. Αυτό μπορεί να λάβει την μορφή ενός συνόλου πλεγμάτων από χυτοσίδηρο με αερόψυξη, ή μιας αντίστασης υγρού στην οποία η θερμότητα μειώνεται μέσω της εξάτμισης.

Οι κινητήρες μιας σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric είναι γενικά παρόμοιοι με εκείνους που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδότηση συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης, μόνο που είναι συνήθως σχεδιασμένοι να λειτουργούν σε λίγο υψηλότερη τάση. Φυσικά, η τάση λειτουργίας είναι μεταβλητή, αλλά η μέγιστη τιμή της καθορίζεται πάνω στην οικονομική ισορροπία μεταξύ της αξιοποίησης του χαλκού και της μόνωσης στην γεννήτρια και στους κινητήρες, και κυμαίνεται από 800 μέχρι 1000 V. Αυτό αντιστοιχεί περίπου στην πρότυπη τάση των 750 V για ηλεκτρική παροχή συνεχούς ρεύματος. Όπως και πριν για τους σειριακούς κινητήρες ισχύει

$$V = E + Ir + V_b \quad (2.10)$$

$$E = k_t v F(I) \quad (2.11)$$



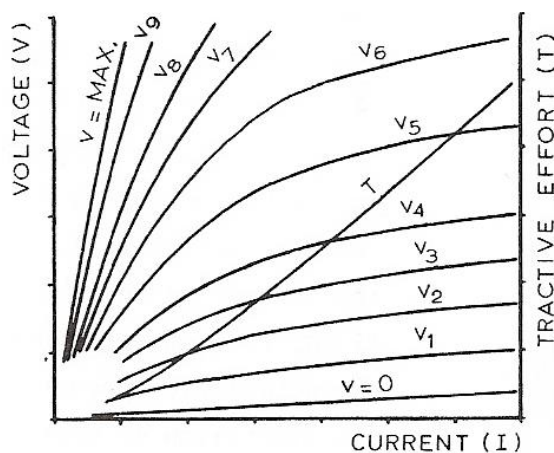
Σχήμα 2.2.17 Διάγραμμα επιδόσεων μιας τυπικής κύριας γεννήτριας μαζί με καμπύλες βαθμών απόδοσης [4]

$$T = k_2 I F(I) \quad (2.12)$$

έτσι ώστε

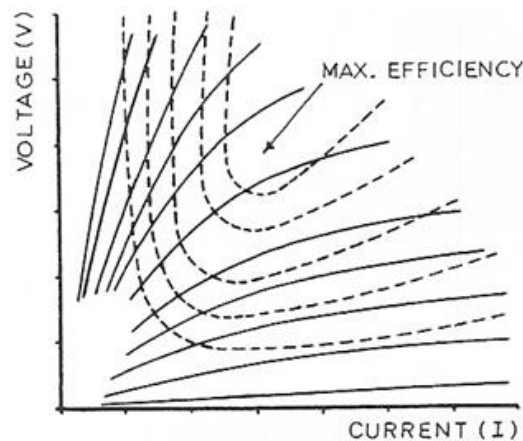
$$V = k_1 v F(I) + Ir + V_b \quad (2.13)$$

και χαράσσοντας τις τιμές της V ως προς το I για διάφορες τιμές της ταχύτητας v , προκύπτει μια οικογένεια καμπυλών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.18, των οποίων οι τιμές πρέπει να αντιστοιχούν σε αυτές της κύριας γεννήτριας. Μπορούν επίσης να καθοριστούν οι τιμές της απόδοσης για κάθε σημείο του διαγράμματος, με την μέγιστη τιμή να φτάνει στο 92%. Στο Σχήμα 2.2.19, παρίστανται κάποιες καμπύλες απόδοσης.

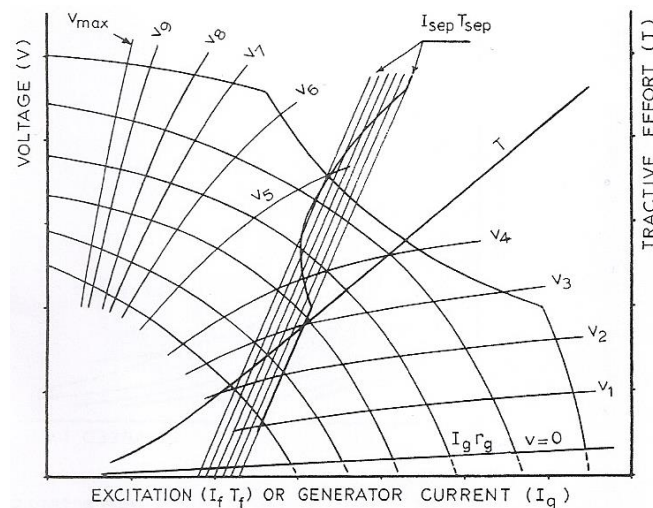


Σχήμα 2.2.18 Απαιτούμενη τάση ενός κινητήρα έλξης συνεχούς ρεύματος για διάφορες ταχύτητες σε σχέση με το ρεύμα [4]

Πολλαπλασιάζοντας τα ρεύματα και την ελκτική δύναμη με τον αριθμό των κινητήρων, οι χαρακτηριστικές του Σχήματος 2.2.18 μπορεί να υπερθετηθούν με τις χαρακτηριστικές του συνδυασμού κινητήρα-γεννήτρια, βλέπε σχήμα στο Σχήμα 2.2.16. Έτσι, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 2.2.20, οι τιμές της ταχύτητας της σιδηροδρομικής μηχανής και η ελκτική δύναμη που αντιστοιχεί στην απόδοση της γεννήτριας μπορεί να ληφθεί για κάθε σημείο του διαγράμματος.



Σχήμα 2.2.19 Χαρακτηριστικές τάσης ενός τυπικού κινητήρα έλξης συνεχούς ρεύματος και καμπύλες βαθμού απόδοσης [4]

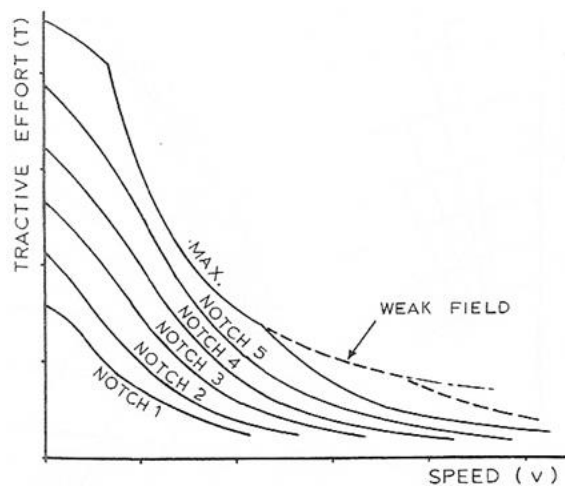


Σχήμα 2.2.20 Ολοκληρωμένο διάγραμμα επιδόσεων μιας σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric [4]

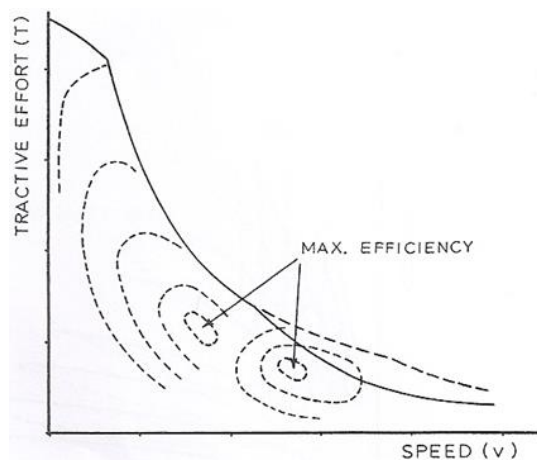
Κατά την εκκίνηση της αμαξοστοιχίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.20, σε κάθε βαθμίδα η ελκτική δύναμη σε ακινησία θα αντιστοιχεί στο ρεύμα για το οποίο η κατάλληλη χαρακτηριστική της γεννήτριας τέμνει την γραμμή που απεικονίζει την πτώση αντίστασης του κυκλώματος του κινητήρα. Καθώς η αμαξοστοιχία κινείται, πρέπει να επιλεγούν οι χαρακτηριστικές του κινητήρα που αντιστοιχούν στην αυξανόμενη ταχύτητα, ενώ η χαρακτηριστική της γεννήτριας θα είναι αυτή της βαθμίδας που χρησιμοποιείται. Εάν από τον έλεγχο επιλέξουμε την «πλήρη ισχύ», η τάση θα αυξηθεί μέχρι το ρεύμα να φτάσει περίπου στο μέγιστο όπου και φτάνουμε στο όριο μέγιστης ισχύος εξόδου. Από το σημείο αυτό και μετά ακολουθεί η καμπύλη άνω ορίου. Κατά το πρώτο μέρος αυτού του ενδιάμεσου εύρους, η αντίσταση που εισέρχεται αυτόματα στο ξεχωριστά διεγερμένο κύκλωμα, θα αυξηθεί και μετά θα μειωθεί στο δεύτερο μέρος, μέχρι να μηδενιστεί ξανά καθώς πλησιάζουμε την μέγιστη τάση της γεννήτριας. Σε αυτό το σημείο, γνωστό και ως «σημείο εκφόρτισης» της γεννήτριας, οι κινητήρες θα λειτουργούν κοντά στην μέγιστη τάση και θα ακολουθούν την κανονική τους χαρακτηριστική απόδοσης με αύξηση της ταχύτητας. Για μια σιδηροδρομική μηχανή υψηλής ταχύτητας, αυτό μπορεί να συνεπάγεται μια ανεπιθύμητη μείωση της ελκτικής δύναμης στις υψηλές ταχύτητες. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να εισαχθούν στους κινητήρες ένα ή περισσότερα στάδια μείωσης του πεδίου ώστε να διατηρήσουν την απόδοσή τους.

Για κάθε σημείο του συνδυασμένου διαγράμματος απόδοσης της γεννήτριας και του κινητήρα, Σχήμα 2.2.20, λαμβάνουμε μια τιμή της ταχύτητας και της ελκτικής δύναμης. Έτσι, οι χαρακτηριστικές απόδοσης της σιδηροδρομικής μηχανής που αντιστοιχούν στην μέγιστη απόδοση και στις ενδιάμεσες βαθμίδες μπορούν να αναπαραχθούν με την μορφή ενός διαγράμματος επιδόσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.21. Το ότι η χαρακτηριστική μέγιστης απόδοσης φαίνεται να μειώνεται απότομα σε σχέση με αυτή μιας κανονικής ηλεκτρικής σιδηροδρομικής μηχανής, οφείλεται στον περιορισμό της ισχύος που παρέχεται από τον κινητήρα diesel. Αν χρησιμοποιούσαμε μεγαλύτερο κινητήρα, τότε αντίστοιχα, έχοντας και κατάλληλο σύστημα μετάδοσης, θα είχαμε και μεγαλύτερες μέγιστες τιμές ελκτικής δύναμης ή ταχύτητας. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η επιπλέον απόδοση που θα παίρναμε σε υψηλότερες ταχύτητες με την εισαγωγή μιας

βαθμίδας αποδυνάμωσης του πεδίου στους κινητήρες, αφού η γεννήτρια έχει φτάσει την μέγιστη τάση της. Οι καμπύλες των βαθμών απόδοσης του κινητήρα diesel, της γεννήτριας και των κινητήρων έλξης δόθηκαν στα Σχήματα 2.1.1, 2.2.17 και 2.2.19, αντίστοιχα. Συνδυάζοντας αυτές τις τιμές, μπορεί να ληφθεί το διάγραμμα του συνολικού βαθμού απόδοσης για κάθε σημείο. Ένα τέτοιο τυπικό διάγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 2.2.22, όπου οι μέγιστες τιμές είναι συνήθως 22-23%. Η εισαγωγή μιας βαθμίδας αποδυνάμωσης του πεδίου στους κινητήρες μετατοπίζει τις τιμές των βαθμών απόδοσης προς την κατεύθυνση υψηλότερης ταχύτητας [4].



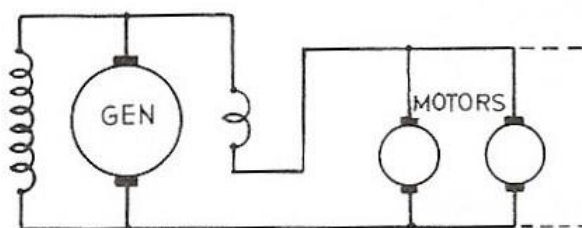
Σχήμα 2.2.21 Τυπικές χαρακτηριστικές επιδόσεων μιας σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric [4]



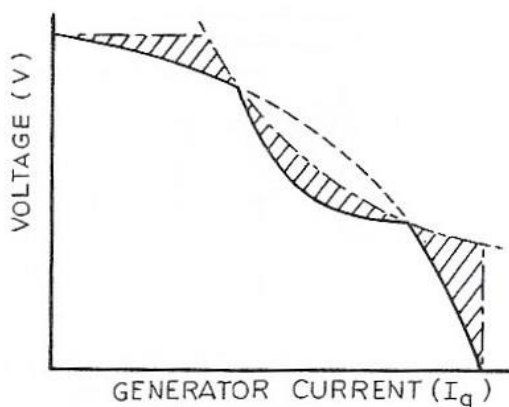
Σχήμα 2.2.22 Διάγραμμα επίδοσης τυπικής σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric με πιθανές καμπύλες βαθμών απόδοσης [4]

2.2.4 Έλεγχος Lemp Σιδηροδρομικής Μηχανής

Για μικρές βιομηχανικές αυτοκινητάμαξες στις οποίες είναι σημαντική η απλότητα στον έλεγχο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας απλός συνδυασμός παράλληλων και αρνητικά σειριακών περιελίξεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.23. Με αυτή τη διάταξη χάνεται μια σημαντική αναλογία της πιθανής απόδοσης της γεννήτριας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.24. Σε τέτοια οχήματα όμως, μια τέτοια δυσκολία μπορεί να ξεπεραστεί με την εισαγωγή ενός μεγαλύτερου κινητήρα και μιας μεγαλύτερης γεννήτριας. Από ένα μέγεθος και πάνω όμως, περιλαμβάνεται και κάποια μορφή ελέγχου Lemp για την εξασφάλιση της μέγιστης πιθανής ισχύς εξόδου. Αυτό συνήθως συνδέεται με τον ρυθμιστή στροφών, ο οποίος έχει κατά συνέπεια δύο λειτουργίες: να μειώνει την παροχή καυσίμου, αν η ταχύτητα τείνει να αυξηθεί, και να μειώνει το φορτίο, αν η ταχύτητα τείνει να μειωθεί.

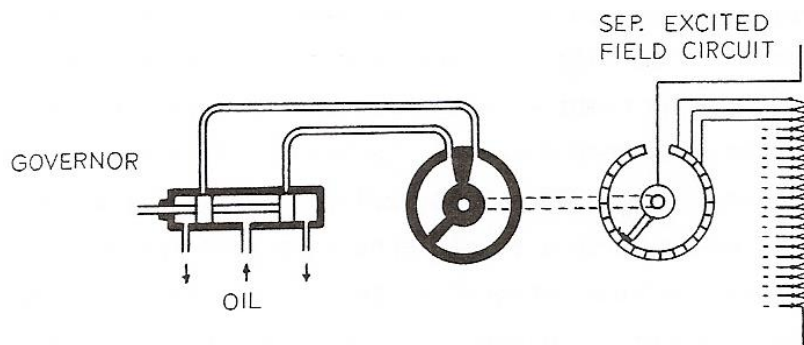


Σχήμα 2.2.23 Διάταξη απλής γεννήτριας όπως χρησιμοποιείται σε μικρές βιομηχανικές σιδηροδρομικές μηχανές ή σε αυτοκινητάμαξες [4]



Σχήμα 2.2.24 Επίδοση γεννήτριας που έχει την διάταξη του Σχήματος 2.2.23. Η σκιαγραφημένη περιοχή είναι απώλειες λόγω της χαρακτηριστικής της γεννήτριας [4]

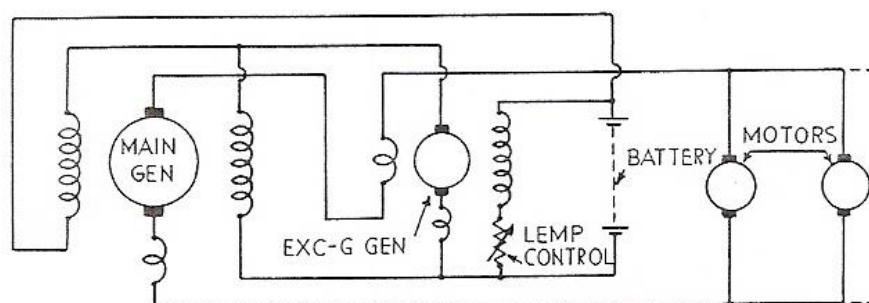
Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μορφές ελέγχου Lemp, όπως υδραυλικός, ηλεκτρικός ή ηλεκτρονικός. Ο υδραυλικός χρησιμοποιεί λάδι υπό πίεση από το σύστημα του κινητήρα και είναι η πιο δημοφιλής μορφή ελέγχου, καθώς η λειτουργία του μπορεί να συνδυαστεί με αυτή του ρυθμιστή στροφών. Ένα παράδειγμα μιας από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μορφές ελέγχου έχει περιγραφεί από τους Schur και Schlaepfer, και η βασική της διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.2.25. Αυτή η συσκευή είναι παρόμοια με την αρχική υδραυλική διάταξη του Lemp, και είναι ένας ιδιαίτερα απλός σερβομηχανισμός που ενεργοποιείται μέσω σφάλματος στον οποίο η λειτουργία αποκατάστασης εξαρτάται από το ολοκλήρωμα χρόνου του σφάλματος. Ο σερβομηχανισμός είναι συνδεδεμένος σε ένα περιστρεφόμενο διακόπτη επαφής, σε έναν σταθερό αντιστάτη. Οι ενέργειες μιας ηλεκτρικής ή μιας ηλεκτρονικής μορφής τέτοιου ελέγχου είναι παρόμοιες με την διαφορά ότι η ρύθμιση είναι συνεχής, με την τελευταία να έχει πλεονεκτήματα ως προς την ακρίβεια, άμεση απόκριση και χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με ένα ηλεκτρονικό ρυθμιστή στροφών.



Σχήμα 2.2.25 Βασικό διάγραμμα ενός ελέγχου Lemp υδραυλικής μορφής [4]

Το αρχικό κύκλωμα που επινόησε ο Lemp ήταν όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2.2.26. Είχε προφανώς συνειδητοποιήσει ότι η ευστάθεια μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση μιας ξεχωριστής γεννήτριας διέγερσης και ότι αυτή η διορθωτική διέγερση μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε μηχανή, έτσι ώστε οι απαραίτητες περιελίξεις να μοιράζονται μεταξύ των δύο μηχανών. Χρησιμοποίησε μπαταρία, απαραίτητη για τα παρελκόμενα και την εκκίνηση,

για να παρέχει ξεχωριστή διέγερση στην γεννήτρια διέγερσης, ενώ συμπεριλήφθηκε και αυτόματος έλεγχος σε αυτό το κύκλωμα. Για να αποφύγει να χρησιμοποιήσει μια επιπλέον γεννήτρια, ρύθμισε αυτή τη μπαταρία να φορτίζεται από την γεννήτρια διέγερσης μέσω μιας αντισταθμιστικής περιέλιξης στην κύρια γεννήτρια, έτσι ώστε κάθε μεταβολή ή διαφορά στην τάση της μπαταρίας να διορθώνεται. Το κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 2.2.26, είναι ικανό να έχει αρκετή διακύμανση και έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές εναλλακτικές διαρρυθμίσεις, όπου όλες αντιπροσωπεύουν το ίδιο βασικό σύστημα.

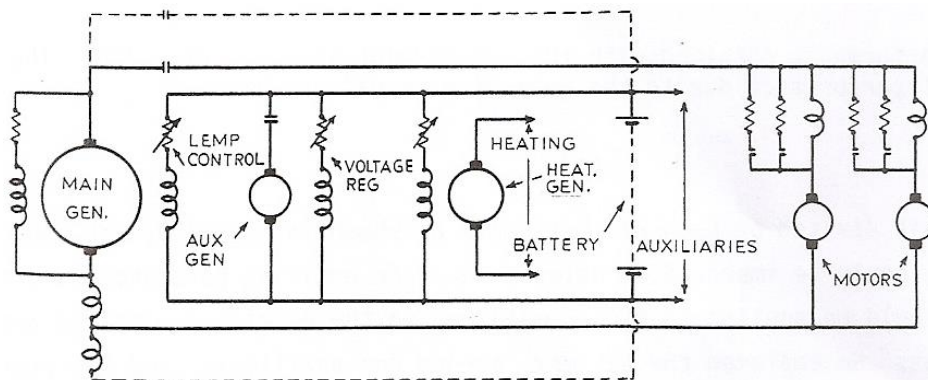


Σχήμα 2.2.26 Βασικό κύκλωμα της αρχικής μορφής του συστήματος ελέγχου Lemp

[4]

Ένα τυπικό, πιο μοντέρνο κύκλωμα είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2.2.27, το οποίο περιλαμβάνει τέσσερις περιελίξεις στην κυρίως γεννήτρια, με την εξωτερική διέγερση να τροφοδοτείται από την βοηθητική γεννήτρια μέσω του μέσου του ελέγχου Lemp. Η τάση της βοηθητικής γεννήτριας διατηρείται περίπου σταθερή με την βοήθεια ενός ρυθμιστή τάσης. Αυτή η διάταξη έχει το πλεονέκτημα ότι μια μόνο βοηθητική γεννήτρια μπορεί να εξυπηρετεί με το να τροφοδοτεί την ξεχωριστή διέγερση, την φόρτιση της μπαταρίας, τον φωτισμό και όλα τα παρελκόμενα, μόνο που η τάση της μπαταρίας είναι πιθανό πολύ μικρή για την θέρμανση της αμαξοστοιχίας, οπότε σε αυτή την περίπτωση απαιτείται μια ξεχωριστή γεννήτρια για την θέρμανση η οποία έχει τον δικό της έλεγχο τάσης. Εναλλακτικά, ξεχωριστές γεννήτριες διέγερσης και βοηθητικές μπορούν να εγκατασταθούν έτσι ώστε η διέγερση της κύριας γεννήτριας και των βοηθητικών συστημάτων να λειτουργούν ξεχωριστά. Η γεννήτρια

διέγερσης και/ή η βοηθητική γεννήτρια συχνά συναρμολογούνται μαζί με την κύρια γεννήτρια και, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι περιελίξεις που αντιστοιχούν σε δύο ή ακόμα και σε τρεις γεννήτριες έχουν ενσωματωθεί μέσα σε ένα και μόνο μηχάνημα.



Σχήμα 2.2.27 Τυπικό βασικό κύκλωμα σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric [4]

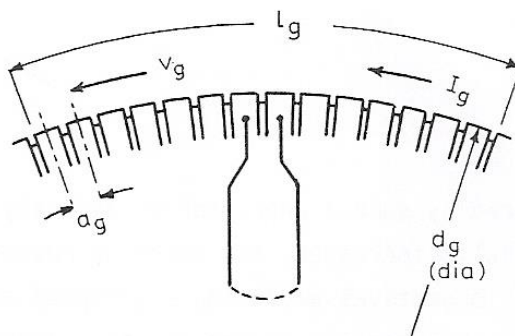
Η γεννήτρια μιας σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric υψηλής ισχύος της μορφής που περιεγράφηκε παραπάνω, τείνει να είναι ένα μηχάνημα μεγάλου μεγέθους και ακριβό, εφόσον πρέπει να μπορεί να καλύψει ένα μεγάλο εύρος τάσης και ρεύματος και έχει τέσσερα ανεξάρτητα πεδία περιελίξεων και ένα πολύ μεγάλο μεταγωγέα. Οι περιελίξεις πεδίου είναι μια βολική μέθοδος λήψης επιθυμητών χαρακτηριστικών, αλλά δεδομένου ότι η λειτουργία τους περιορίζεται στην παραγωγή ενός και μόνο πλέγματος ροής στο μαγνητικό κύκλωμα, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι μια μόνο περιέλιξη που φέρει ένα κατάλληλα ρυθμισμένο ρεύμα θα πρέπει να αρκεί. Στο αρχικό του σχέδιο, Σχήμα 2.2.26, ο Lemp έδειξε ότι μια μικρότερη περιέλιξη στο πεδίο της γεννήτριας διέγερσης μπορεί να λειτουργήσει αντίστοιχα με μια περιέλιξη σε μια μεγαλύτερη μηχανή, αλλά η εισαγωγή ενός ηλεκτρονικού ελέγχου έχει δείξει, σύμφωνα με τον Oldham, ότι εξασφαλίζει όλες τις αναγκαίες μεταβολές στην διέγερση με την χρήση μίας μόνο περιέλιξης [4].

2.2.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μεταγωγέα Γεννήτριας Συνεχούς

Ρεύματος

Ο μεταγωγέας εκτός από μεγάλος σε μέγεθος και ακριβός, απαιτεί και αρκετή συντήρηση και περιορίζει την ισχύ εξόδου της μηχανής. Έστω ένα τόξο ενός τέτοιου μεταγωγέα, όπως στο Σχήμα 2.2.28, μήκους l_g , με περιφερειακή ταχύτητα v_g , που περιέχει περιφερειακά έναν αριθμό ράβδων με βήμα a_g . Για μηχανικούς λόγους η περιφερειακή ταχύτητα περιορίζεται μέχρι κάποια τιμή v'_g , ενώ η εμπειρία έχει δείξει μέγιστες τιμές των v'_g σε V και $(I'_g N'_g)$ σε αμπερελίγματα μεταξύ των ράβδων προσαρμογής. Κατά συνέπεια, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν όσες περισσότερες ράβδοι γίνεται, αλλά η ελάχιστη αποδεκτή τιμή για το πάχος της ράβδου είναι 3.2 mm με ένα μονωμένο κενό των 0.8 mm, δίνοντας έτσι ένα βήμα των 4.0 mm το οποίο είναι γενικά αποδεκτό.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.2.28, ο αριθμός των ραβδών σε ένα τόξο είναι $\frac{l_g}{a_g}$ και η μέγιστη τάση που μπορεί να παραχθεί είναι $\frac{V'_g l_g}{a_g}$, ή $k_{gl} l_g$ όπου k_{gl} είναι σταθερά.



Σχήμα 2.2.28 Τόξο ενός τυπικού μεταγωγέα γεννήτριας [4]

Ο μέγιστος συνολικός αριθμός αμπερελιγμάτων που φέρεται από αυτό το κομμάτι του οπλισμού που αντιστοιχεί στο τόξο του μεταγωγέα l_g , θα είναι $(I'_g N'_g) \frac{l_g}{a_g}$. Αλλά κάθε γεννήτρια συμβατικής μορφής σχεδιασμένη για αυτή τη τάση είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα χρησιμοποιεί περιελίξεις πηνίου μονής

σπείρας, δηλαδή θα υπάρχει ουσιαστικά μια σπείρα που συνδέει κάθε γειτονικό ζεύγος ράβδων του μεταγωγέα. Έτσι ο συνολικός αριθμός σπειρών που συνδέονται στο τόξο του μεταγωγέα θα είναι $\frac{l_g}{a_g}$. Επομένως το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να φέρουν αυτές οι περιελίξεις θα είναι

$$I_{gc} = \frac{(I'_g N'_g) \frac{l_g}{a_g}}{\frac{l_g}{a_g}} = k_{g2} \quad (2.14)$$

όπου k_{g2} είναι μια σταθερά.

Η μέγιστη ισχύς που παράγεται από το τόξο θα είναι επομένως

$$V'_g \frac{l_g}{a_g} I_{gc} = k_{g1} l_g k_{g2} = k_{g3} l_g \quad (2.15)$$

όπου k_{g3} είναι μια άλλη σταθερά και η συνολική μέγιστη ισχύς $\sum V'_g \frac{l_g}{a_g} I_{gc}$ μιας μηχανής που έχει μεταγωγέα διαμέτρου d_g , είτε παράγεται λόγω αύξησης της τάσης είτε από την αύξηση του αριθμού των πόλων, θα είναι

$$\sum V'_g \frac{l_g}{a_g} I_{gc} = \sum k_{g3} l_g = k_{g3} \pi d = k_{g4} d_g \quad (2.16)$$

όπου k_{g4} είναι σταθερά. Σημειώνεται ότι αυτή είναι ανεξάρτητη του αξονικού μήκους του μεταγωγέα, το οποίο θα καθοριστεί από τις διαστάσεις των ψυκτρών και την επιτρεπτή πυκνότητα ρεύματος.

Για μια οικονομική μηχανή, η v_g πρέπει να είναι ίση με την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή v'_g .

$$v_g = n_g \pi d_g = v'_g \quad (2.17)$$

$$\Rightarrow d_g = \frac{v_g}{n_g \pi} \quad (2.18)$$

όπου n_g είναι η ταχύτητα περιστροφής, έτσι ώστε η μέγιστη ισχύς εξόδου της μηχανής να δίνεται από την

$$\sum V'_g \frac{l_g}{a_g} I_{gc} = k_{g4} d_g = \frac{k_{g4} v'_g}{n_g \pi} = \frac{k_{g5}}{n_g} \quad (2.19)$$

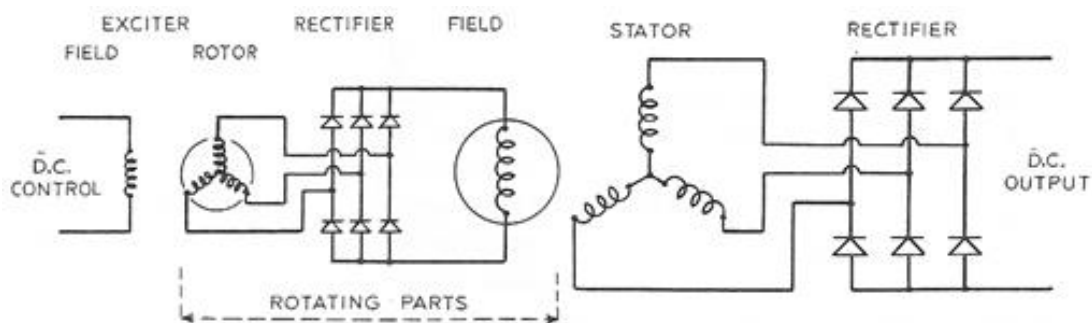
όπου k_{g5} είναι μια άλλη σταθερά.

Επομένως η μέγιστη ισχύς η οποία μπορεί να παραχθεί από μια τέτοια γεννήτρια είναι ευθέως ανάλογη της διαμέτρου του μεταγωγέα της, αλλά αν αυτή αυξηθεί, η ταχύτητα περιστροφής πρέπει να μειωθεί ανάλογα. Για τον λόγο αυτό, οι μεγάλες σιδηροδρομικές μηχανές, υψηλών ταχυτήτων, diesel (ή με αεριοστρόβιλο), έχουν συνήθως ένα μειωτήρα μεταξύ κινητήρα και γεννήτριας ώστε να μειώνεται η ταχύτητα της γεννήτριας. Στο σχεδιασμό

τέτοιων μηχανών μπορεί να γίνεται σύγκριση της σταθεράς $k_{g5} = n_g \sum V'_g \frac{I_g}{a_g} I_{gc}$ της οποίας η τιμή σπάνια ξεπερνάει τις $3 \cdot 10^6 \text{kW/rpm}$

Αυτός ο περιορισμός παραλείπεται σήμερα κατασκευάζοντας την γεννήτρια ως ένα τριφασικό εναλλακτήρα, ο οποίος στη συνέχεια ανορθώνει την έξοδό του. Η γεννήτρια, όσο μεγάλη και αν είναι, μπορεί πάντα να συνδεθεί απευθείας στον κινητήρα και να λειτουργεί σε οποιαδήποτε απαιτούμενη ταχύτητα.

Με την τοποθέτηση των περιελίξεων εναλλασσόμενου ρεύματος στον στάτορα και παρέχοντας το πεδίο του ρότορα, απαιτούνται μόνο δύο δακτυλίδια ολίσθησης και αυτά φέρουν μικρότερο ρεύμα. Σε κάποιες σιδηροδρομικές μηχανές δεν χρησιμοποιούνται τα δακτυλίδια ολίσθησης και κατασκευάζεται η μηχανή ως «γεννήτρια χωρίς ψύκτρες», Σχήμα 2.2.29. Σε αυτή τη περίπτωση, το ρεύμα διέγερσης παράγεται σε μια μικρή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με ένα σταθερό πεδίο, η οποία είναι τοποθετημένη ακριβώς πίσω από την κύρια γεννήτρια, στον σπλισμό της οποίας το ρεύμα διέγερσης μεταφέρεται μέσω διόδων ανόρθωσης πυριτίου τοποθετημένων στον ρότορα. Βέβαια, αυτή η μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν απαιτείται μία μόνο περιέλιξη πεδίου στην κύρια γεννήτρια. Έχει όμως το μικρό μειονέκτημα ότι η ολική σταθερά του χρόνου είναι μεγαλύτερη και μπορεί να είναι η αιτία βραχυκυκλώματος. Είναι αδύνατο για μια μηχανή να ξεκινήσει να λειτουργεί με κάποια από αυτές τις μορφές εναλλακτών, έτσι πρέπει να υπάρχει ένας ξεχωριστός κινητήρας για την εκκίνηση. Με αυτόν τον τρόπο το μέγεθος, το βάρος και το κόστος μιας γεννήτριας μιας μεγάλης σιδηροδρομικής μηχανής μπορούν να μειωθούν σημαντικά.



Σχήμα 2.2.29 Κύκλωμα γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς ψύκτρες [4]

Η πολύπλοκη φύση του ελέγχου μιας σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric δίνει την ευκαιρία να εφαρμοστούν διάφορες ηλεκτρονικές τεχνικές, με συνέπεια να υπάρξει σημαντική βελτίωση του κλάδου αυτού. Από το Σχήμα 2.2.20 φαίνεται ότι η θέση οποιουδήποτε σημείου του διαγράμματος επιδόσεων μπορεί να καθοριστεί από τις τιμές της τάσης και του ρεύματος της γεννήτριας. Έτσι οι μετρήσεις αυτών των ποσοτήτων, μαζί με αυτή της ταχύτητας του κινητήρα, που δίνεται από ένα ταχύμετρο, δίνουν τις απαραίτητες ενδείξεις που χρειάζεται η ηλεκτρονική λειτουργία του ρυθμιστή στροφών, του ελέγχου L_{emp} και οι διάφορες μορφές κύριας μονάδας αυτομάτου ελέγχου. Ενώ αυτή η διάταξη του εξοπλισμού είναι διαφορετική από τις παλαιότερες, χρησιμοποιούνται τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά. Ο συνδυασμός αυτών των λειτουργιών που εκτελέστηκαν προηγουμένως από τα τρία πεδία της γεννήτριας μέσα από τον έλεγχο διέγερσης, δίνει την δυνατότητα στην μηχανή να λειτουργεί με μία μόνο περιέλιξη πεδίου η οποία με την σειρά της δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν μορφές γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος και εναλλακτήρας χωρίς ψύκτρα.

Από το 1964 πολλές σιδηροδρομικές μηχανές ενσωμάτωσαν λίγο πολύ τον ηλεκτρονικό έλεγχο. Τα πλεονεκτήματα είναι η ταχύτητα και η ακρίβεια στην λειτουργία, λιγότερη μηχανική επαφή που απαιτεί καθημερινή συντήρηση και η διευκόλυνση της γρήγορης επισκευής με την αντικατάσταση των επιμέρους κομματιών. Όπως και στην περίπτωση των ηλεκτρικών σιδηροδρομικών μηχανών, η ευκολία που παρέχει ένας τέτοιος έλεγχος ξεκινάει στα κυκλώματα χαμηλής ισχύος και επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση άλλων λειτουργιών, όπως, για παράδειγμα, την μείωση της ελκτικής δύναμης σε μεμονωμένους κινητήρες έλξης κατά την ολίσθηση, τον έλεγχο κινητήρων ξένης διέγερσης, την εξομοίωση του φορτίου στους κινητήρες έλξης σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και τις πιθανές απαιτήσεις του αυτοματισμού.

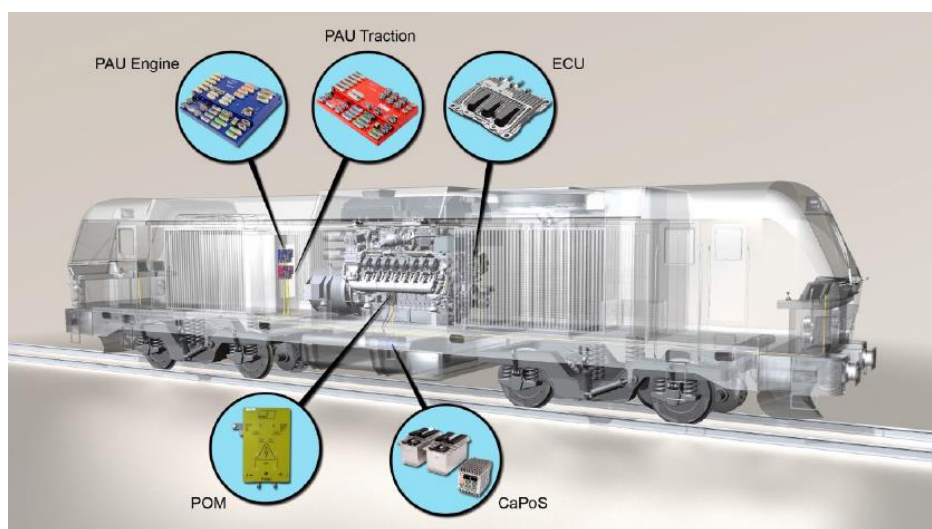
Οι σιδηροδρομικές μηχανές diesel-electric μπορούν επίσης να επωφεληθούν από την χρήση επαγωγικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος που παρέχονται από τους ηλεκτρονικούς αναστροφείς συνεχούς ρεύματος-τριφασικούς εναλλασσόμενου ρεύματος. Επειδή παρέχεται μεταβλητή τάση συνεχούς ρεύματος, ο αναστροφέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας χωρίς περαιτέρω ρύθμιση της τάσης. Από την άλλη μεριά, το διαμορφωμένο πλάτος παλμού του αναστροφέα μπορεί να

τροφοδοτηθεί από μια πηγή συνεχούς ρεύματος, έτσι ώστε η γεννήτρια να μπορεί να λειτουργεί πάντα στην μέγιστη τάση της όταν το εύρος του ρεύματος μειώνεται, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του μεγέθους, βάρους και κόστους [4].

2.2.6 Powerline – Συστήματα Αυτοματισμού Σιδηροδρομικής Μηχανής της Εταιρείας MTU

2.2.6.1 Περίληψη του Συστήματος Powerline

Στο Σχήμα 2.2.6.1 απεικονίζεται συνολικά το σύστημα Powerline της εταιρείας MTU, ένα τυπικό ηλεκτρονικό μοντέρνο σύστημα ελέγχου σιδηροδρομικού κινητήρα diesel-electric.

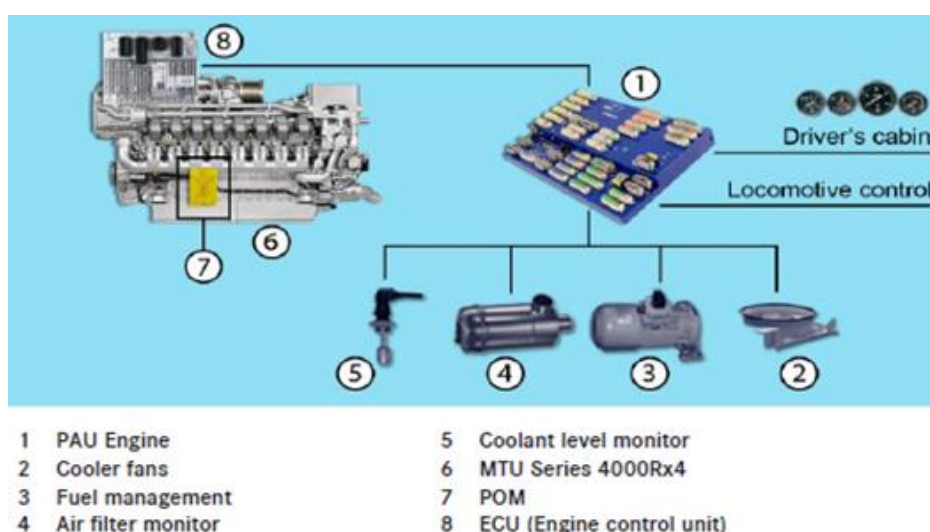


Σχήμα 2.2.6.1 Συνολική απεικόνιση ενός συστήματος Powerline [31]

Το Powerline αναπτύχθηκε ως ένα συναρμολογούμενο σύστημα με διάφορα λειτουργικά δομοστοιχεία προκειμένου να δώσει στους κατασκευαστές σιδηροδρομικών μηχανών ένα υψηλό βαθμό ανεξαρτησίας. Η ιδέα προσφέρει ευελιξία στην επιλογή και την προσαρμογή των λειτουργιών ώστε να ταιριάζουν σε μεμονωμένες σιδηροδρομικές μηχανές. Τα Σχήματα 2.2.6.2 και 2.2.6.3 παρέχουν μια γενική επισκόπηση των εφαρμογών Powerline διάφορων τύπων σιδηροδρομικών μηχανών εστιάζοντας στα

επιμέρους ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η κεντρική διασύνδεση του συστήματος Powerline είναι η «Μονάδα Αυτοματισμού Ισχύος, Κινητήρα» (“Power Automation Unit, Engine” – PAU Engine) που φαίνεται στο Σχήμα 2.2.6.2. Αυτή έχει ως πρωταρχικά καθήκοντα την σύνδεση διάφορων συστημάτων ελέγχου της σιδηροδρομικής μηχανής με τον κινητήρα diesel, μέσω ενός δίαυλου ή ασύρματων σημάτων, και την προσαρμογή των εξωτερικών περιφερειακών του κινητήρα. Η PAU Engine αναλαμβάνει επίσης το δύσκολο έργο του ελέγχου και της παρακολούθησης των μηχανημάτων ψύξης της σιδηροδρομικής μηχανής, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο κινητήρας diesel λειτουργεί σύμφωνα με τα πρότυπα πιστοποίησης των εκπομπών ρύπων (βλ. Κεφάλαιο 3). Επιπλέον, διαθέτει μια τυποποιημένη διασύνδεση λειτουργίας προσαρμογέα δικτύου Ethernet που παρέχει στον χρήστη απλές λειτουργίες διαγνωστικών για τον κινητήρα diesel και για τα ηλεκτρονικά Powerline.

Τα τυπικά σήματα μεταξύ της σιδηροδρομικής μηχανής και της PAU Engine περιλαμβάνουν την εκκίνηση και το σβήσιμο του κινητήρα και την επιθυμητή ταχύτητα, ενώ επεξεργάζεται και άλλες σημαντικές πληροφορίες όπως, η πίεση του λιπαντικού και η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού, και όλα αυτά μπορούν και προβάλλονται στην κονσόλα του οδηγού μέσω του συστήματος ελέγχου της σιδηροδρομικής μηχανής. Όταν προκύψει αστοχία, η PAU Engine διαχειρίζεται τους συναγερμούς χρησιμοποιώντας ένα σύστημα κίτρινων και κόκκινων σημάτων συναγερμού.

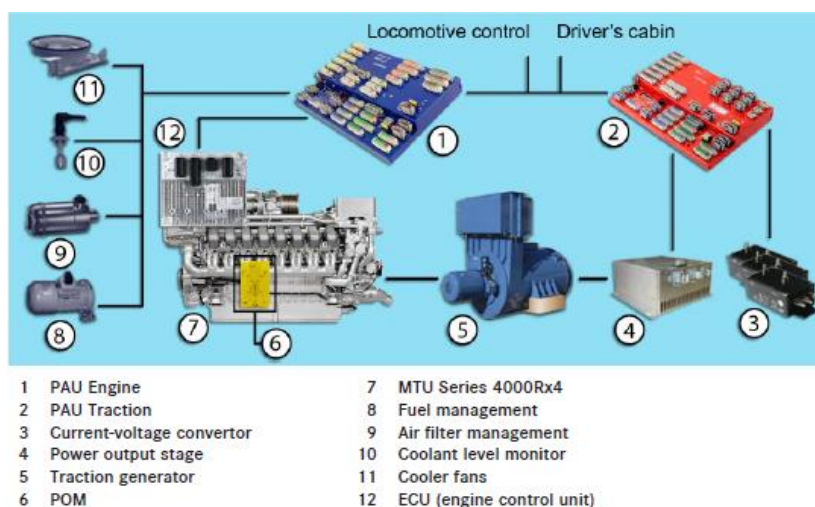


Σχήμα 2.2.6.2 Επισκόπηση συστημάτων σιδηροδρομικών μηχανών diesel-hydraulic και diesel-electric εναλλασσόμενου ρεύματος [31]

Άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα όπως η “PAU Traction”, μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης και μια βαθμίδα ισχύος εξόδου είναι επίσης διαθέσιμα για τις σιδηροδρομικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος/συνεχούς ρεύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.6.3. Σε αυτό το σύστημα, η PAU Traction λειτουργεί ως μια διασύνδεση της γεννήτριας έλξης και των συναφών συνιστωσών της.

Οι κύριες λειτουργίες της PAU Traction είναι να παρακολουθεί και να ελέγχει την γεννήτρια έλξης και να παρέχει επιπλέον λειτουργίες παρακολούθησης, προστασίας και ελέγχου. Σε αυτές περιλαμβάνεται μια λειτουργία αντιολίσθησης στην οποία η PAU Traction εντοπίζει την ολίσθηση των τροχών της σιδηροδρομικής μηχανής και ενεργοποιεί τα κατάλληλα αντιμέτρα, όπως την μείωση της διαθέσιμης, προς τον κινητήρα έλξης, ισχύ. Άλλες λειτουργίες μπορεί να είναι η αποδυνάμωση του πεδίου των κινητήρων έλξης, όπως για παράδειγμα την ηλεκτρική αλλαγή ταχυτήτων, ή την παρακολούθηση του ανορθωτή.

Για να υλοποιηθούν αυτές οι λειτουργίες, η PAU Traction καταγράφει και επεξεργάζεται το ρεύμα και την τάση των κινητήρων έλξης και της γεννήτριας έλξης χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης για την απομονωμένη μέτρησή τους έτσι ώστε η PAU Traction να μην είναι ανοικτή σε σήματα υψηλής τάσης. Έπειτα η PAU Traction ελέγχει την διέγερση της γεννήτριας έλξης μέσω της βαθμίδας ισχύος εξόδου.



Σχήμα 2.2.6.3 Επισκόπηση συστήματος σιδηροδρομικής μηχανής diesel-electric εναλλασσόμενου ρεύματος/ εναλλασσόμενου ρεύματος [31]

Επομένως, η PAU Engine και η PAU Traction, ως τα κύρια στοιχεία του συστήματος Powerline, παρέχουν όλες τις διασυνδέσεις που απαιτούνται για την σύνδεση των σχετικών εξαρτημάτων και ενσωματώνουν τα εξωτερικά περιφερειακά. Οι διασυνδέσεις και στα δύο αυτά στοιχεία ταιριάζουν πλήρως στις απαιτήσεις των εφαρμογών στο σιδηρόδρομο.

Προκειμένου να καλυφθούν και άλλες απαιτήσεις και να διασφαλισθεί η ευελιξία που απαιτείται, τα εξαρτήματα της Powerline δίνουν την δυνατότητα προσαρμογής και παραμετροποίησης όλων των λειτουργιών του λογισμικού ώστε να ταιριάζει με το σχετικό περιβάλλον της σιδηροδρομικής μηχανής. Αυτό παρέχει ένα εξαιρετικά ευέλικτο σύστημα, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε να ταιριάζει με κάθε μεμονωμένο τύπο σιδηροδρομικής μηχανής [31].

2.2.6.2 Ενσωμάτωση σε Διάφορους Τύπους Σιδηροδρομικών Μηχανών

Τα στοιχεία του συστήματος που περιγράφονται μπορούν να ενσωματωθούν σε τρεις διαφορετικούς τύπους σιδηροδρομικών μηχανών [31].

2.2.6.2.1 Σιδηροδρομική Μηχανή Diesel-Hydraulic

Στο Σχήμα 2.2.6.4 φαίνεται μια πιθανή διάταξη των στοιχείων που ενσωματώνουν την Powerline σε μια σιδηροδρομική μηχανή diesel-hydraulic.

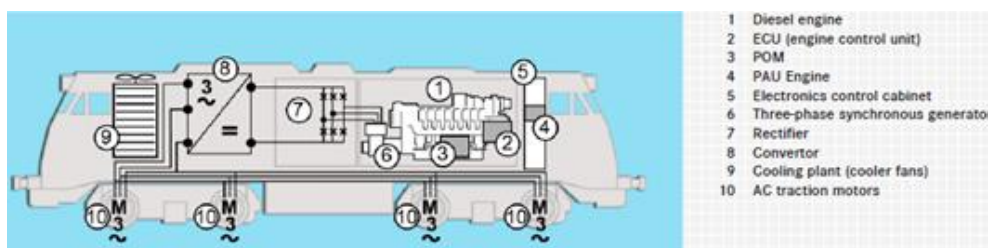
Εκτός από τα εξαρτήματα του πυρήνα μετάδοσης κίνησης κινητήρας diesel και υδραυλική μετάδοση κίνησης, η διαμόρφωση αυτή παρουσιάζει και τα εξαρτήματα του πυρήνα της Powerline και το σύστημα ελέγχου της σιδηροδρομικής μηχανής. Για λόγους απλότητας, δεν φαίνονται οι διάφοροι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές.



Σχήμα 2.2.6.4 Σιδηροδρομική μηχανή με σύστημα μετάδοσης κίνησης diesel-hydraulic [31]

2.2.6.2 Σιδηροδρομική Μηχανή Diesel-Electric AC / AC

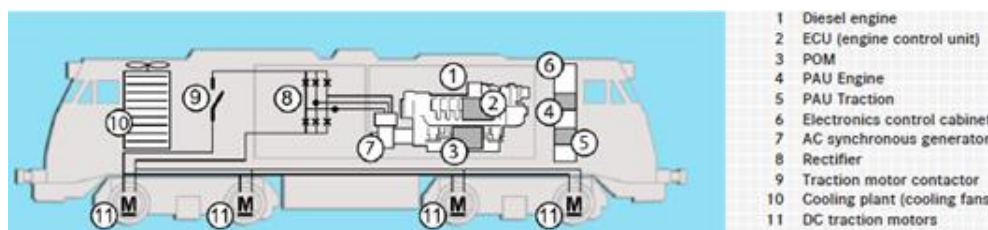
Η ενσωμάτωση του συστήματος Powerline σε μια σιδηροδρομική μηχανή diesel-electric με την τεχνολογία AC/AC (εναλλασσόμενου ρεύματος / εναλλασσόμενου ρεύματος) περιλαμβάνει τα ίδια στοιχεία με τις σιδηροδρομικές μηχανές diesel-hydraulic, όπως δείχνει το Σχήμα 2.2.6.5. Οι κινητήριες μονάδες σε αυτούς τους τύπους σιδηροδρομικών μηχανών είναι 3-φασικοί κινητήρες που τροφοδοτούνται από μετατροπείς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.6.5 [31].



Σχήμα 2.2.6.5 Σιδηροδρομική μηχανή με σύστημα μετάδοσης κίνησης diesel-electric εναλλασσόμενου ρεύματος / εναλλασσόμενου ρεύματος [31]

2.2.6.2.3 Σιδηροδρομική Μηχανή Diesel-Electric AC / DC

Η Powerline υποστηρίζει επίσης σιδηροδρομικές μηχανές diesel-electric AC/DC (εναλλασσόμενου ρεύματος / συνεχούς ρεύματος) που λειτουργούν με κινητήρες έλξης συνεχούς ρεύματος. Εκτός από τα στοιχεία Powerline που ήδη αναφέρθηκαν, η διαμόρφωση αυτή συμπεριλαμβάνει και PAU Traction για τον έλεγχο της γεννήτριας. Η όλη διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.2.6.6 [31].



Σχήμα 2.2.6.6 Σιδηροδρομική μηχανή με σύστημα μετάδοσης κίνησης diesel-electric εναλλασσόμενου ρεύματος /συνεχούς ρεύματος [31]

2.2.6.3 Στοιχεία του Πυρήνα της Powerline

2.2.6.3.1 Μονάδα Ελέγχου Κινητήρα – Engine Control Unit (ECU)

Η ECU είναι ο ηλεκτρονικός ελεγκτής του κινητήρα με ενσωματωμένη διαχείριση του κινητήρα· τοποθετείται απευθείας πάνω στον κινητήρα diesel. Η ECU είναι στις προδιαγραφές μιας σιδηροδρομικής μηχανής και χρησιμοποιείται σε μια γκάμα διαφορετικών εφαρμογών, όπως στον σιδηρόδρομο, στο ναυτικό, την αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσαρμογή στις διάφορες εφαρμογές γίνεται χρησιμοποιώντας διάφορα σύνολα παραμέτρων ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα και τον τομέα εφαρμογής. Τα κύρια καθήκοντα της ECU περιλαμβάνουν την αρχή ελέγχου ακολουθίας, τον έλεγχο της ταχύτητας και την παρακολούθηση του κινητήρα. Επίσης διαθέτει ένα σύστημα ασφαλείας του κινητήρα [31].

2.2.6.3.2 Στοιχείο Ισχύος Εξόδου – Power Output Module (POM)

Το POM είναι ένα προαιρετικό στοιχείο για τον έλεγχο της μίζας αλλά λειτουργεί και ως τερματικό για τα καλώδια της μίζας. Όπως και η ECU, τοποθετείται απευθείας πάνω στον κινητήρα. Το POM ελέγχεται άμεσα μέσω της ECU [31].

2.2.6.3.3 Μονάδα Αυτοματισμού Κινητήρα Powerline – Powerline Automation Unit Engine (PAU Engine)

Η PAU Engine είναι το κεντρικό στοιχείο σύνδεσης μεταξύ του συστήματος ελέγχου σιδηροδρομικής μηχανής και του ελέγχου του κινητήρα diesel της MTU. Είναι ένα στοιχείο αυτοματισμού με διασυνδέσεις και λειτουργίες ειδικά αναπτυγμένες για σιδηροδρομικές εφαρμογές. Σε αντίθεση με τις ECU και POM, η PAU Engine δεν είναι τοποθετημένη πάνω στον κινητήρα, αλλά βρίσκεται στον ηλεκτρονικό πίνακα της σιδηροδρομικής μηχανής. Η PAU Engine μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που κυμαίνονται από νέες κατασκευές σιδηροδρομικών μηχανών μέχρι πρότζεκτ επανενίσχυσης ισχύος σε σιδηροδρομικές μηχανές και σε οχήματα ειδικού σκοπού.

Για την σύνδεση με το σύστημα ελέγχου της σιδηροδρομικής μηχανής, η PAU Engine παρέχει πολυάριθμες διασυνδέσεις ειδικές για τον σιδηρόδρομο

με την μορφή δυαδικών και αναλογικών σημάτων καθώς και τυποποιημένων διασυνδέσεων διαύλων, όπως η CANopen (controller area network).

Επίσης η PAU Engine διασυνδέεται με την κονσόλα του οδηγού. Αυτό της επιτρέπει να παρέχει ένα εύρος πληροφοριών, όπως σήματα ελέγχου για λαμπτήρες συναγερμού και όργανα που προβάλλουν την ταχύτητα του κινητήρα, την θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου και την πίεση του λιπαντικού λαδιού, κτλ. Προφανώς, η PAU Engine παρέχει μια διασύνδεση με την ECU με την μορφή μιας επιπλέον διαύλου CAN.

Προκειμένου να διασφαλιστεί υψηλό επίπεδο ευελιξίας και λειτουργικότητας, η PAU Engine διευκολύνει την μετάδοση διαγνωστικών πληροφοριών. Αυτό επιτρέπει την πρόσβαση διάφορων διαγνωστικών και θέσεων λειτουργίας μέσω μιας τυποποιημένης διασύνδεσης Ethernet και ενός προγράμματος περιήγησης διαδικτύου, χωρίς την ανάγκη διαγνωστικών εργαλείων ειδικής χρήσεως.

3. Προδιαγραφές

Ρύπων Σιδηρο- δρομικών Κινητήρων και Κύκλοι Δοκιμής

3.1 Προδιαγραφές Ρύπων Σιδηροδρομικών Κινητήρων

Τα Πρότυπα ή προδιαγραφές εκπομπών (emission regulations) είναι ένα σύνολο από απαιτήσεις, οι οποίες καθορίζουν τα αποδεκτά όρια των εκπομπών ρύπων των νέων κινητήρων ή οχημάτων που ταξινομούνται στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.), στις Η.Π.Α., στην Ιαπωνία κλπ. Όσον αφορά την Ε.Ε., τα Πρότυπα αυτά καθορίζονται σε μία σειρά από Οδηγίες (Directives) ή Κανονισμούς (Regulations), που αποσκοπούν στη σταδιακή επιβολή όλο και αυστηρότερων προδιαγραφών, και καλύπτουν τις παρακάτω εκπομπές [2]:

- οξείδια του αζώτου NO_x ,
- άκαυστους υδρογονάνθρακες HC,

- μονοξείδιο του άνθρακα CO,
- σωματίδια PM ή ορισμένες φορές (εναλλακτικά) αιθάλη,
- οξείδια του θείου SO_x,
- διοξείδιο του άνθρακα CO₂, και

Τα Ευρωπαϊκά πρότυπα εκπομπών για τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε μηχανήματα χρήσης εκτός δρόμου (non-road mobile machinery) (NRMM) είναι γνωστά ως Stage (Στάδιο ή Φάση) I έως V. Οι κανονισμοί για τα στάδια Στάδια I ως IV για τους κινητήρες diesel καθορίστηκαν αρχικά από την κοινοτική οδηγία 97/68/EC με μετέπειτα τροποποιήσεις από πέντε άλλες οδηγίες, οι οποίες εγκρίθηκαν από το 2002 έως το 2012.

Αρχικά ορίστηκαν τα Στάδια I/II, τα οποία αποτελούσαν και την πρώτη Ευρωπαϊκή νομοθεσία για την ρύθμιση των εκπομπών ρύπων από κινητό εξοπλισμό εκτός δρόμου, η οποία ψηφίστηκε στις 16 Δεκεμβρίου 1997. Οι κανονισμοί για τους κινητήρες diesel εκτός δρόμου εισήχθησαν σε δύο φάσεις: Το Στάδιο I εφαρμόστηκε το 1999 και το Στάδιο II εφαρμόστηκε από το 2001 έως το 2004, ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα. Τα πρότυπα αυτά κάλυπταν εφαρμογές όπως βιομηχανικά γεωτρήματα, συμπιεστές, φορτωτές, μπουλντόζες, φορτηγά μη οδικής χρήσης, εκσκαφείς αυτοκινητόδρομων, ανυψωτικά μηχανήματα, εξοπλισμό συντήρησης αυτοκινητόδρομου, εκχιονιστικά, εξοπλισμό εδάφους αεροδρομίων, εναέριους αναβατήρες και κινητούς γεραμούς. Γεωργικά και δασικά τρακτέρ είχαν και αυτά τα ίδια πρότυπα εκπομπών ρύπων, αλλά διαφορετικές ημερομηνίες εφαρμογής. Κινητήρες για ναυτική, σιδηροδρομική ή αεροπορική χρήση καθώς και για ηλεκτροπαραγωγή δεν καλύπτονταν στα δύο αρχικά πρότυπα Στάδια I/II.

Οι πρώτες προδιαγραφές κινητήρων σιδηροδρομικής χρήσης περιελήφθησαν στα Στάδια III και IV, τα οποία εγκρίθηκαν από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο στις 21 Απριλίου 2004. Μία επιπλέον οδηγία με ενδιαφέρον για τους σιδηροδρομικούς κινητήρες, η 2010/26/EU, εγκρίθηκε το 2010 και προβλέπει περαιτέρω τεχνικές λεπτομέρειες σχετικά με τον έλεγχο και την έγκριση κινητήρων του Σταδίου IIIB και του Σταδίου IV.

Το Στάδια III, το οποίο χωρίζεται επιπλέον σε Στάδια IIIA και IIIB, εισήχθη σταδιακά από το 2006 μέχρι το 2013, ενώ το Στάδιο IV τέθηκε σε ισχύ το

2014. Σημειωτέον ότι η νομοθεσία των Σταδίων III και IV ισχύει μόνο για καινούρια οχήματα και εξοπλισμό, ενώ οι κινητήρες αντικατάστασης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται ήδη, εκτός από τις αυτοκινητάμαξες και τις σιδηροδρομικές μηχανές (και τους κινητήρες πρόωσης εσωτερικής ναυσιπλοΐας), θα πρέπει να συμφωνούν με τις τιμές των ορίων που οι προς αντικατάσταση κινητήρες έπρεπε να τηρούν όταν αρχικά ήταν στην αγορά.

Κινητήρες Σιδηροδρομικής Πρόωσης: Τα Στάδια IIIA και IIIB έχουν εγκριθεί για τους κινητήρες ισχύος άνω των 130 kW, που χρησιμοποιούνται για την πρόωση σιδηροδρομικών μηχανών κατηγορίας R, RL, RH και αυτοκινητάμαξων, κατηγορίας RC, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1. Δεν υπάρχουν πρότυπα Σταδίου IV για κινητήρες σιδηροδρομικής πρόωσης. Σημειώνεται ότι οι ημερομηνίες που αναφέρονται στους παρακάτω πίνακες, είναι οι ημερομηνίες διάθεσης στην αγορά των εξοπλισμών που πληρούν τα νέα πρότυπα [38].

Πίνακας 3.1 Πρότυπα Στάδια IIIA και IIIB για Κινητήρες Σιδηροδρομικής Πρόωσης [38]

| Κατηγορία | Καθαρή Ισχύς [kW] | Ημερομηνία | CO [g/kWh] | HC [g/kWh] | HC+NOx [g/kWh] | NOx [g/kWh] | PM [g/kWh] |
|---|-------------------|------------|------------|------------|----------------|-------------|------------|
| Στάδιο IIIA | | | | | | | |
| RC A | P>130 | 2006 | 3.5 | - | 4.0 | - | 0.2 |
| RL A | 130≤P≤560 | 2007 | 3.5 | - | 4.0 | - | 0.2 |
| RH A | P>560 | 2009 | 3.5 | 0.5* | - | 6.0* | 0.2 |
| Στάδιο IIIB | | | | | | | |
| RC B | P>130 | 2012 | 3.5 | 0.19 | - | 2.0 | 0.025 |
| R B | P>130 | 2012 | 3.5 | - | 4.0 | - | 0.025 |
| Για κινητήρες με P>2000 kW και V _h >5 L/κύλινδρος είναι HC=0.4 g/kWh και NOx=7.4 g/kWh | | | | | | | |

Στις 25 Σεπτεμβρίου 2014, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε τους κανονισμούς εκπομπών ρύπων της Φάσης V. Οι προτεινόμενες προδιαγραφές εκπομπών ρύπων αυτού του Σταδίου για τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται για την πρόωση σιδηροδρομικών μηχανών (RLL) και αυτοκινητάμαξων (RLR) οποιασδήποτε ονομαστικής ισχύος και τύπου

ανάφλεξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Οι βοηθητικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε μηχανές ή αυτοκινητάμαξες θα πρέπει να πληρούν τα πρότυπα εκπομπών για τις κατηγορίες NRE ή NRS, τα οποία δίνονται στον Πίνακα 3.3 [38].

Πίνακας 3.2 Προτεινόμενες προδιαγραφές εκπομπών ρύπων Σταδίου V για κινητήρες σιδηροδρομικής πρόωσης [38]

| Κατηγορία | Καθαρή Ισχύς [kw] | Ημερο-μηνία | CO [g/kWh] | HC ^a [g/kWh] | NO _x [g/kWh] | PM [g/kWh] | PN [1/kWh] |
|---------------------------------------|-------------------|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|--------------------|
| RLL-v/c-1 (Σιδηροδρομικές μηχανές) | P>0 | 2021 | 3.50 | 4.00 ^b | | 0.025 | - |
| RLR-v/c-1 (Αυτοκινητάμαξες) | P>0 | 2021 | 3.50 | 0.10 | 2.00 | 0.015 | 1×10 ¹² |

^a A=6.00 για κινητήρες αερίου
^b HC+NO_x

Πίνακας 3.3 Προτεινόμενα όρια εκπομπών Σταδίου V για κινητήρες κατηγορίας NRE [38]

| Κατηγορία | Τύπος Ανάφλεξης | Καθαρή Ισχύς [kW] | Ημερο-μηνία | CO | HC | NO _x | PM | PN |
|-----------|-----------------|-------------------|-------------|---------|----------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| | | | | [g/kWh] | | | | [1/kWh] |
| NRE-v/c-1 | CI | P<8 | 2019 | 8.00 | 7.50 ^{a, c} | | 0.40 ^b | - |
| NRE-v/c-2 | CI | 8≤P<19 | 2019 | 6.60 | 7.50 ^{a, c} | | 0.40 | - |
| NRE-v/c-3 | CI | 19≤P<37 | 2019 | 5.00 | 4.70 ^{a, c} | | 0.015 | 1×10 ¹² |
| NRE-v/c-4 | CI | 37≤P<56 | 2019 | 5.00 | 4.70 ^{a, c} | | 0.015 | 1×10 ¹² |
| NRE-v/c-5 | All | 56≤P<130 | 2020 | 5.00 | 0.19 ^c | 0.40 | 0.015 | 1×10 ¹² |
| NRE-v/c-6 | All | 130≤P≤560 | 2019 | 3.50 | 0.19 ^c | 0.40 | 0.015 | 1×10 ¹² |
| NRE-v/c-7 | All | P>560 | 2019 | 3.50 | 0.19 ^d | 3.50 | 0.045 | - |

^a HC+NO_x
^b 0.60 για χειροκίνητη εκκίνηση, αερόψυκτων κινητήρων άμεσης έγχυσης καυσίμου
^c A=1.10 για κινητήρες αερίου
^d A=6.00 για κινητήρες αερίου

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2, οι κανονισμοί του Σταδίου V εισάγουν ένα επιπλέον όριο, αυτό για τις εκπομπές αριθμού σωματιδίων (PN – particle number).

Τα πρότυπα εκπομπών ρύπων της ΕΕ για τους κινητήρες μη οδικής χρήσης συνήθως καθορίζουν δύο σειρές ημερομηνιών εφαρμογής: (1) ημερομηνία έγκρισης, όπου μετά την οποία όλα τα νέα μοντέλα πρέπει να πληρούν το πρότυπο για να λαμβάνουν έγκριση τύπου και (2) ημερομηνία τοποθέτησης στη αγορά ή πρώτης εγγραφής, μετά την οποία όλοι οι νέοι κινητήρες που τοποθετούνται στην αγορά θα πρέπει να πληρούν τα πρότυπα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ημερομηνίες έγκρισης νέου τύπου είναι ένα έτος πριν από τις αντίστοιχες ημερομηνίες διάθεσης στην αγορά.

3.2 Κύκλος Δοκιμής Σιδηροδρομικών Κινητήρων

Ξεκινώντας από τη δεκαετία του 1980, τα διάφορα «οχήματα» με εμβολοφόρους κινητήρες πιστοποιούνται προ της έκδοσης έγκρισης τύπου (και άρα πριν την κυκλοφορία τους), όσον αφορά τις εκπομπές καυσαερίων, χρησιμοποιώντας τυποποιημένες δοκιμές ή Κύκλους Δοκιμής (Test Cycles). Οι δοκιμές συγκροτούνται στην περίπτωση των μη-οδικών κινητήρων από μία σειρά διακριτών σημείων μόνιμης λειτουργίας (συνδυασμοί ταχυτήτων περιστροφής και φορτίων από την άφορτη λειτουργία έως το πλήρες φορτίο, αντιπροσωπευτικών της εκάστοτε χρήσης). Στα συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας μετρώνται οι ρύποι, ενδεχομένως το CO₂ και η κατανάλωση· το τελικό αποτέλεσμα (των «συνολικών») εκπομπών προκύπτει από άθροιση των επιμέρους εκπομπών σε κάθε διακριτό σημείο μόνιμης λειτουργίας με κατάλληλο συντελεστή βαρύτητας. Αυτό το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν στους Πίνακες 3.1-3.3.

Ειδικά για τους σιδηροδρομικούς κινητήρες, οι οποίοι όπως αναφέρθηκε πιο πάνω εμπίπτουν στην ευρύτερη κατηγορία των κινητήρων (οχημάτων) εκτός δρόμου, ισχύει το Πρότυπο ISO 8178. Πρόκειται ουσιαστικά για συνδυασμό πολλών Κύκλων μόνιμης λειτουργίας (με την προσθήκη στο τέλος κωδικού C1, D1 κλπ) ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, π.χ. ο ISO 8178 C1 χρησιμοποιείται για κινητήρες οχημάτων εκτός δρόμου (τρακτέρ, μπουλντόζες κλπ), ο ISO 8178 E3 από ναυτικούς κινητήρες, ο ISO 8178 F από σιδηροδρομικούς κοκ.

Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιείται για την πιστοποίηση των εκπομπών και/ή για την έγκριση τύπων μέσω δοκιμών σε πολλές χώρες,

συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών, της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ιαπωνίας. Ο Πίνακας 3.4 δίνει τα υπό εξέταση σημεία λειτουργίας κατά τη δοκιμή σιδηροδρομικών κινητήρων, τα οποία όπως φαίνεται είναι συνολικά τρία: η άφορτη λειτουργία με συντελεστή βαρύτητας 60% (λαμβάνεται έτσι υπόψιν η επιβάρυνση της ατμόσφαιρας εντός πόλεων όπου και σταθμεύουν συνήθως τα τρένα), το σημείο μέγιστης ισχύος με συντελεστή βαρύτητας 25%, καθώς και μία «αντιπροσωπευτική» ενδιάμεση κατάσταση λειτουργίας [2].

Πίνακας 3.4 Συντελεστές στάθμισης για Β-τύπου κύκλων δοκιμών κατά ISO 8178 [37]

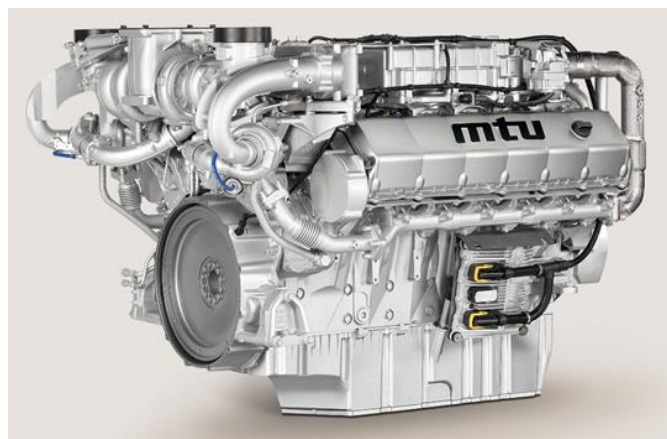
| Αριθμός Ρύθμισης | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------------------------|---------------------|----|----|----|----|--------------------|----|------|----|----|-------------------|
| Ροπή, % | 100 | 75 | 50 | 25 | 10 | 100 | 75 | 50 | 25 | 10 | 0 |
| Ταχύτητα | Ονομαστική Ταχύτητα | | | | | Ενδιάμεση Ταχύτητα | | | | | Άφορτη Λειτουργία |
| Σιδηροδρομικές Μηχανές | | | | | | | | | | | |
| Τύπος F | 0.25 | - | - | - | - | - | - | 0.15 | - | - | 0.60 |

Σημειώσεις:

- Η ροπή του κινητήρα είναι εκφρασμένη ως ποσοστό της μέγιστης διαθέσιμης ροπής για τη δεδομένη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα
- Η ονομαστική ταχύτητα είναι η ταχύτητα περιστροφής για την οποία ο κατασκευαστής ορίζει την ονομαστική ισχύ του κινητήρα
- Η ενδιάμεση ταχύτητα είναι αυτή που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή του κινητήρα

4. Παραδείγματα Σιδηροδρομικών Κινητήρων

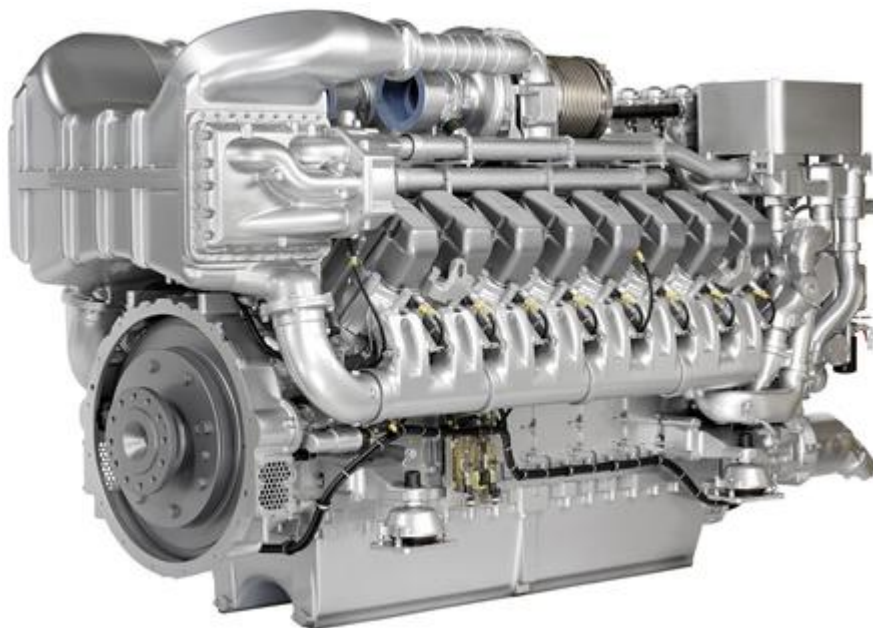
Στα Σχήματα 4.1 ως 4.4β παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα κινητήρων της εταιρείας MTU, ενώ ο Πίνακας 4.1 περιέχει ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 4.1 Series 1600 R50, MTU [31]



Σχήμα 4.2 Series 4000 R41, MTU [31]

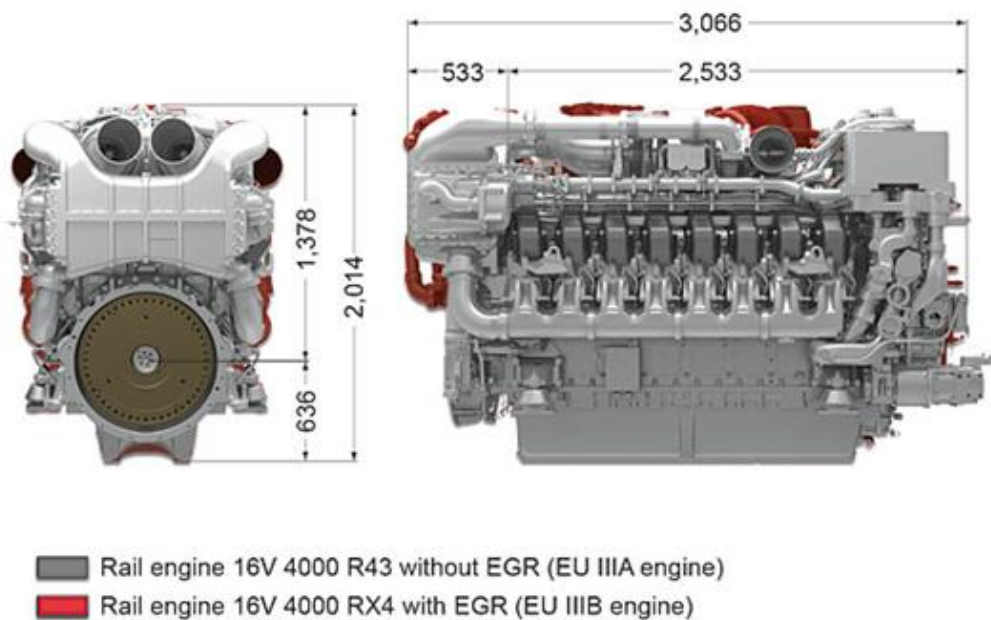


Σχήμα 4.3 Series 4000 R43, MTU [31]

Στο Σχήμα 4.4α και στο Σχήμα 4.4β απεικονίζεται ο κινητήρας 4000 Rx4, ο οποίος είναι ίδιος με τον 4000 R43, μόνο που έχει επιπλέον σύστημα επανακυκλοφορίας καυσαερίων EGR για μείωση των εκπομπών NOx.



Σχήμα 4.4α Series 4000 Rx4, MTU [31]



Σχήμα 4.4β Series 4000 Rx4, MTU [39]

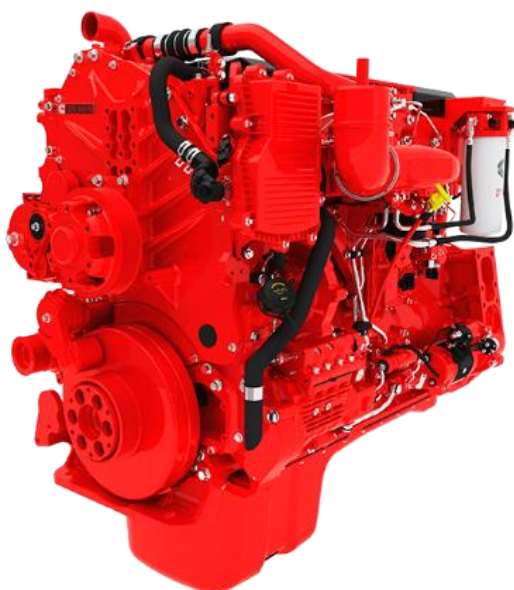
Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά κινητήρων 12V 1600 R50, 8V 4000 R41, 16V 4000 R41L, 8V 4000 R43 και 20V 4000 R43L, της εταιρείας MTU [31-36]

| Μοντέλο Κινητήρα | 12V 1600 R50 | 8V 4000 R41 | 16V 4000 R41L | 8V 4000 R43 | 20V 4000 R43L |
|--|---------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Πρότυπο Εκπομπών | EU Stage IIIB | UIC II | UIC II | EU/UIC Stage IIIA | EU/UIC Stage IIIA |
| Μέγιστη ονομαστική ισχύς [kW] | 690 | 1000 | 2200 | 1000 | 3000 |
| Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής [rpm] | 1500 | 1800 | 1800 | 1800 | 1800 |
| Διαστάσεις και μάζα κινητήρα | | | | | |
| Μήκος (L) [mm] | 1850 | 1915 | 2875 | 2000 | 3335 |
| Πλάτος (W) [mm] | 1200 | 1380 | 1405 | 1565 | 1562 |
| Ύψος (H) [mm] | 1200 | 1800 | 1815 | 2015 | 2015 |
| Μάζα (ξηρή) [kg] | 2350 | 4700 | 7400 | 5250 | 9850 |
| Κύρια στοιχεία κινητήρα | | | | | |
| Διάμετρος/Διαδρομή Εμβόλου [mm] | 122/150 | 165/190 | 165/190 | 170/210 | 160/210 |
| Κυβισμός Κυλίνδρου [L] | 1,75 | 4,06 | 4,06 | 4,77 | 4,77 |
| Συνολικός Όγκος Εμβολισμού [L] | 21 | 32,5 | 65 | 38,2 | 95,4 |
| Θερμοκρασία εισόδου αέρα [K] | 298 | 298 | 298 | 298 | 298 |
| Θερμοκρασία ψυκτικού ψυγείου υπερπληρωτή [K] | 328 | 318 | 318 | 318 | 318 |
| Κατανάλωση καυσίμου στην ονομαστική ισχύ [l/h] | 165.7 | 249.4 | 546 | 248.2 | 759 |

* Σε υψόμετρο 100m και σε βαρομετρική πίεση 1bar.

** UIC είναι η Διεθνής Ένωση Σιδηροδρόμων (Union internationale des chemins de fer, στα Γαλλικά ή αλλιώς International Union of Railways, στα Αγγλικά).

Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται ένας κινητήρας της εταιρείας Cummins ο οποίος, εκτός από σιδηροδρομική χρήση, είναι κατάλληλος και για χρήση εκτός οδικού δικτύου, (αγροτική, κατασκευές, μεταλλευτική βιομηχανία, γεώτρηση) και ο οποίος πληρεί και το πρότυπο προδιαγραφών Σταδίου IV, ενώ ο Πίνακας 4.2 περιέχει ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 4.5 QSX15, Cummins [40]

Πίνακας 4.2 Παρουσίαση χαρακτηριστικών κινητήρα της εταιρείας Cummins [40]

| | |
|---|-----------------------|
| Μοντέλο Κινητήρα | QSX15 |
| Πρότυπο Εκπομπών | Tier 4 Final/Stage IV |
| Ισχύς [kW] | 373-503 |
| Ροπή [Nm] | 2237-2779 |
| Κυβισμός [L] | 15 |
| Αριθμός Κυλίνδρων | 6 |
| Χωρητικότητα Συστήματος Λαδιού [L] | 83 |
| Καθαρό Βάρος Κινητήρα [kg] | 1365 |

Στα Σχήματα 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 και 4.10 απεικονίζονται κάποια παραδείγματα κινητήρων της εταιρείας CSR. Στον Πίνακα 4.3 αναγράφονται τα ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 4.6 16V280ZJA, Μοντέλο κινητήρα diesel σιδηροδρομικής μηχανής της CSR [41]



Σχήμα 4.7 R16V280ZJ , Μοντέλο κινητήρα diesel σιδηροδρομικής μηχανής της CSR [41]



Σχήμα 4.8 12V280ZJ, Μοντέλο κινητήρα diesel σιδηροδρομικής μηχανής της CSR [41]



Σχήμα 4.9 6280ZJ, Μοντέλο κινητήρα diesel σιδηροδρομικής μηχανής της CSR [41]

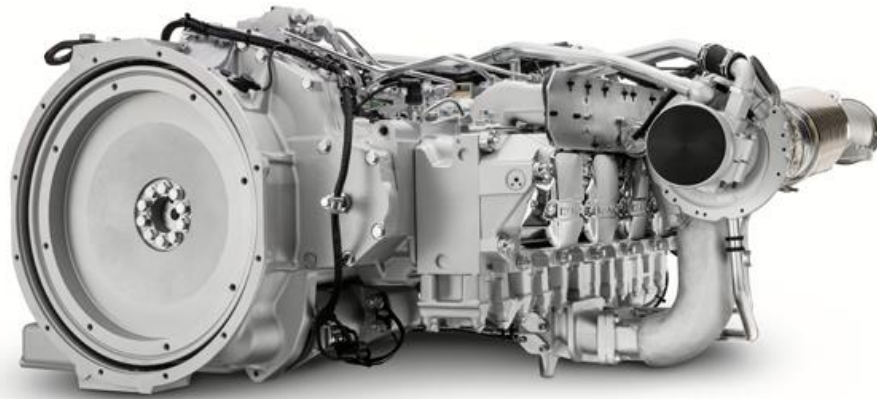


Σχήμα 4.10 12V240ZJ, Μοντέλο κινητήρα diesel σιδηροδρομικής μηχανής της CSR [41]

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά κινητήρων της εταιρείας CSR [41]

| Μοντέλο Κινητήρα | 16V280ZJA | R16V280ZJ | 12V280ZJ | 6280ZJ | 12V240ZJ |
|---------------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Αριθμός Κυλίνδρων | 16 | 16 | 12 | 6 | 12 |
| Διάμετρος Εμβόλου [m] | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.24 |
| Διαδρομή Εμβόλου [m] | 0.285 | 0.3 | 0.285 | 0.285 | 0.275 |
| Ονομαστική Ισχύς κατά UIC [kW] | 3860 | 4705 | 2900 | 1470 | 2200 |
| Ονομαστική Ταχύτητα Περιστροφής [rpm] | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Ειδική κατανάλωση καυσίμου [g/kWh] | 208+7 | 199 | 208+3 | 208 | 208+3 |
| Διαστάσεις (L×B×H) [mm] | 4970.5×1725× 2898 | 5330×1770× 3040 | 3957.5×1725× 2895 | 4583.5×1352× 2702 | 4286.5×1775× 2806.5 |
| Καθαρό Βάρος [t] | 24,12 | 28,3 | 20,13 | 14,8 | - |

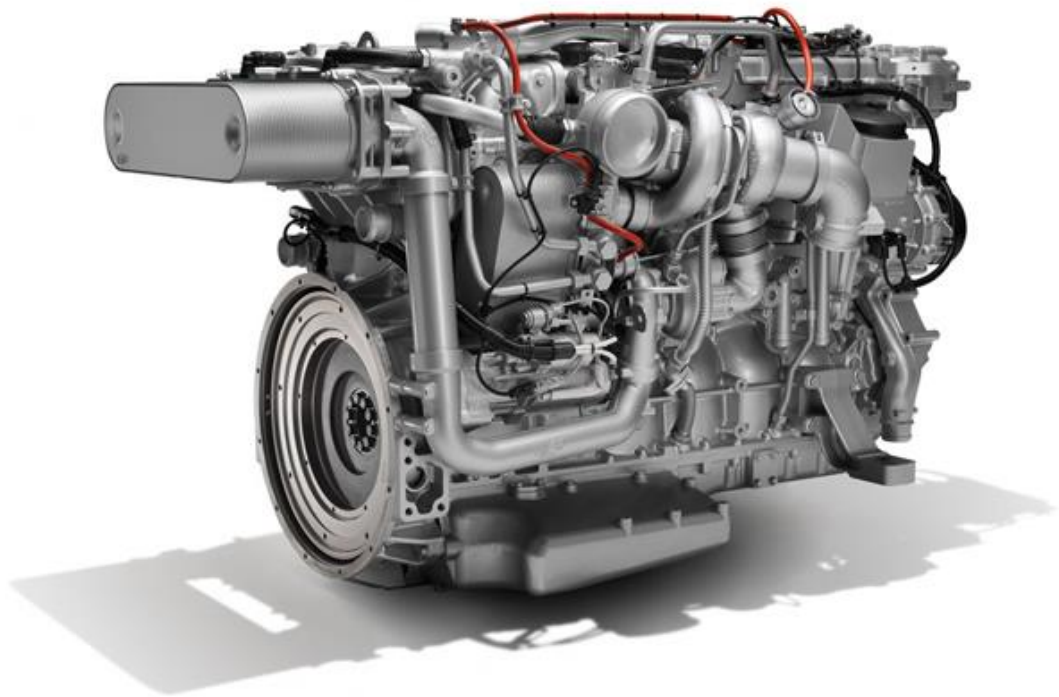
Στη συνέχεια, στα Σχήματα 4.11, 4.12 και 4.13, απεικονίζονται κάποιοι κινητήρες της εταιρείας MAN και στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 4.11 Μοντέλο κινητήρα D2876 για αυτοκινητάμαξες της εταιρείας MAN, πρότυπου Σταδίου IIIA ή IIIB [42]



Σχήμα 4.12 Μοντέλο κινητήρα D2862 για αυτοκινητάμαξες ή σιδηροδρομικές μηχανές της εταιρείας MAN, πρότυπου Σταδίου IIIB [42]



Σχήμα 4.13 Μοντέλο κινητήρα D2676 για αυτοκινητάμαξες ή σιδηροδρομικές μηχανές της εταιρείας MAN, πρότυπου Σταδίου IIIB [42]

Πίνακας 4.4 Χαρακτηριστικά κινητήρων της εταιρείας MAN [42]

| Μοντέλο Κινητήρα | D2876 Stage IIIA/IIIB | D2862 Stage IIIB | D2676 Stage IIIB |
|-------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| Διάταξη | Οριζόντια, εν σειρά | V 90° | Κάθετη, εν σειρά |
| Ισχύς [kW] | 257-386/294-390 | 588-735 | 338 |
| Αριθμός Κυλίνδρων | 6 | 12 | 6 |
| Κυβισμός [L] | 12,8 | 24,2 | 12,4 |

Στη συνέχεια, στα Σχήματα 4.14 και 4.15, απεικονίζονται κάποιοι κινητήρες της εταιρείας VOITH και στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 4.14 Μοντέλο κινητήρα R2876T3 της εταιρείας VOITH [43]



Σχήμα 4.15 Μοντέλο κινητήρα V2868T3L3 της εταιρείας VOITH [43]

Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικά κινητήρων της εταιρείας VOITH [43]

| Μοντέλο Κινητήρα | R2876T3 | V2868T3L3 |
|---|-------------------------------------|--|
| Ονομαστική Ισχύς [kW] | 390/353/294 | 500/520 |
| Ονομαστική Ταχύτητα Περιστροφής [rpm] | 1800 | 1900/1800 |
| Μέγιστη Ροπή [Nm] | 2300/2200/1900 | 2750 |
| Ταχύτητα Περιστροφής στη Μέγιστη Ροπή [rpm] | 1100-1400 | 1425/1800 |
| Μέση πραγματική πίεση [bar] | 22.6/21.6/18.6 | 21.4 |
| Κυβισμός [L] | 12,82 | 16,16 |
| Πρότυπο Εκπομπών Ρύπων | Stage IIIB (EU 97/68/EG-2011/88/EG) | Stage IIIB (EU97/68/EG-2004/26/EG / EU97/68/EG-2011/88/EG) |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρακάτω περιγράφονται τα κύρια στοιχεία που αποτελούν την αντίσταση μιας αμαξοστοιχίας.

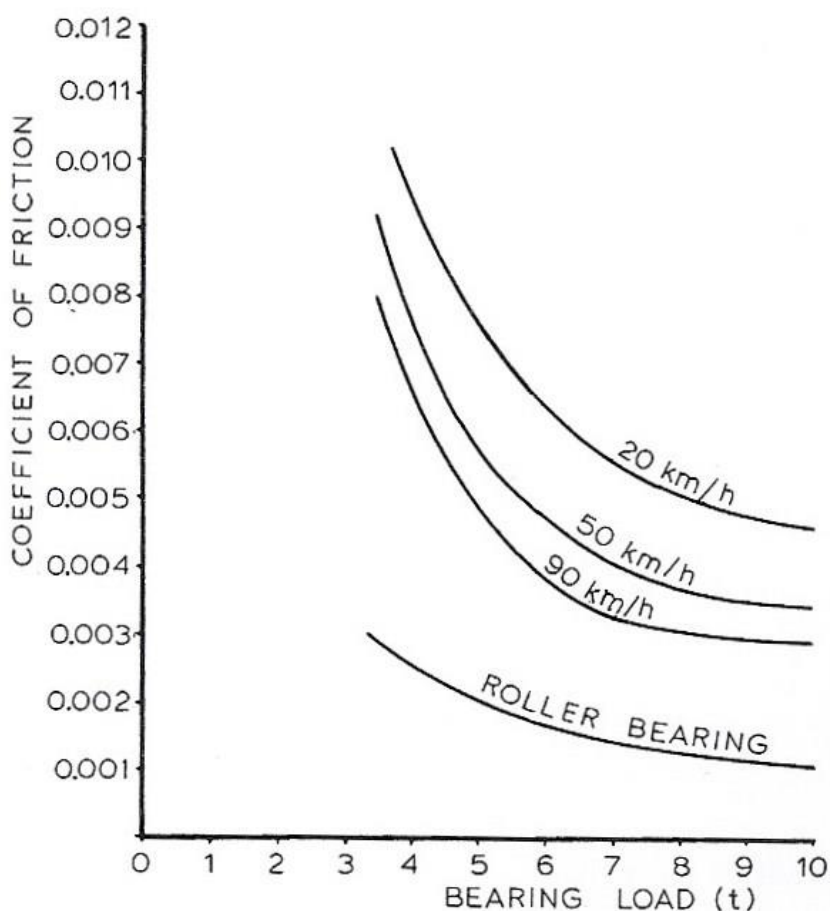
Αντίσταση των ρουλεμάν

Η αντίσταση των ρουλεμάν ποικίλει σημαντικά ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής, την πίεση λαδιού του ρουλεμάν, την μέθοδο λίπανσης, τις φυσικές ιδιότητες του λιπαντικού και την θερμοκρασία του ρουλεμάν. Σε φυσιολογικές τιμές φορτίου, ο συντελεστής τριβής συνήθως μειώνεται και με την αύξηση της ταχύτητας και με την αύξηση του φορτίου. Για καλά σχεδιασμένα και με λίπανση ρουλεμάν σιδηροδρόμων, η τυπική σχέση μεταξύ του συντελεστή τριβής και του φορτίου σε διαφορετικές ταχύτητες φαίνεται στο Σχήμα Α.1. Έχει βρεθεί ότι οι παροδικά υψηλότερες τιμές της αντίστασης που παρατηρήθηκαν στην εκκίνηση, συνδέονται με την αντίσταση των ρουλεμάν και έχει να κάνει με μία συγκεκριμένη περιστροφή ώστε να υπάρξουν κατάλληλες συνθήκες λίπανσης.

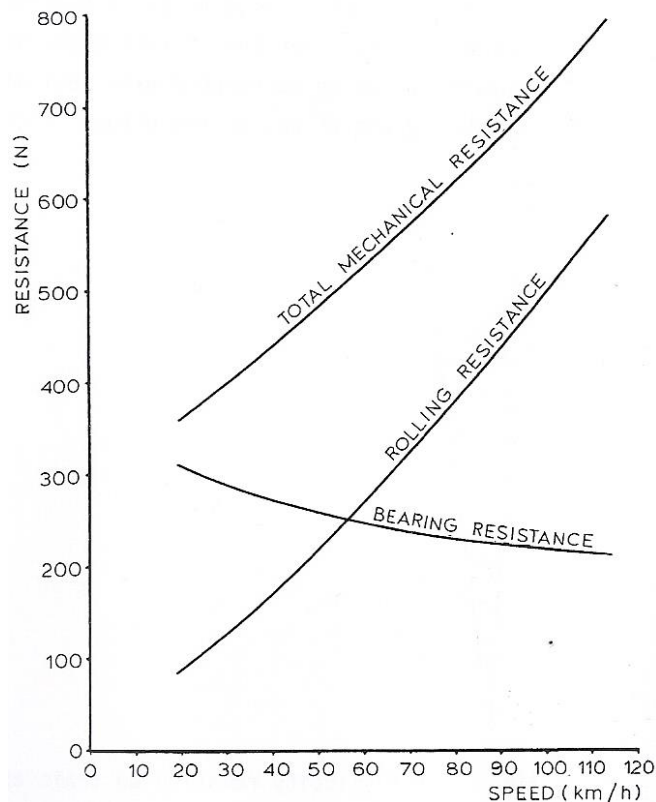
Η τριβή του ρουλεμάν μπορεί να μειωθεί σημαντικά και οι αρχικές παροδικές τιμές να εξαλειφθούν με την χρήση κυλινδρικών ρουλεμάν, των οποίων οι χαρακτηριστικές τριβών φαίνονται επίσης στο Σχήμα Α.1. Ωστόσο, η αντίσταση του ρουλεμάν είναι πολύ μικρή σε σχέση με την συνολική αντίσταση ώστε να δικαιολογήσει το επιπλέον κόστος αυτών των ρουλεμάν, τα οποία είναι κυρίως γνωστά για την μεγάλη αξιοπιστία τους, τόσο ώστε να αποφεύγονται τα επιπλέον κόστη λειτουργίας λόγω των αστοχιών στα ρουλεμάν [4].

Αντίσταση κύλισης

Όταν η συναρμολόγηση ενός τροχού με ένα άξονα που στηρίζει ένα κάθετο φορτίο κυλάει κατά μήκος μίας ράγας, έχει βρεθεί ότι υπάρχει αντίσταση στην κίνηση ανάλογη της τιμής του φορτίου και της ταχύτητας. Αυτό γίνεται κυρίως λόγω της κύλισης του τροχού πάνω στην ράγα και του σημείου επαφής μεταξύ τους, κάτι το οποίο θα συζητηθεί παρακάτω. Σε αυτό πρέπει και να προστεθεί οποιαδήποτε τριβή υπάρχει μεταξύ των φλαντζών στους τροχούς και των πλευρών στις ράγες, ένας παράγοντας ο οποίος πιθανόν να είναι διακοπτόμενος σε ευθεία τροχιά, αλλά προφανώς παίρνει μια μέση τιμή για ένα τρένο λογικού μήκους. Οι τιμές συνήθως καθορίζονται αφαιρώντας την αντίσταση των ρουλεμάν από την ολική μηχανική αντίσταση του οχήματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα A.2 [4].



Σχήμα A.1 Τυπικές τιμές της σταθεράς τριβής σε σχέση με το φορτίο για ρουλεμάν με λιπαντικό, αλλά και για κυλινδρικά ρουλεμάν [4]



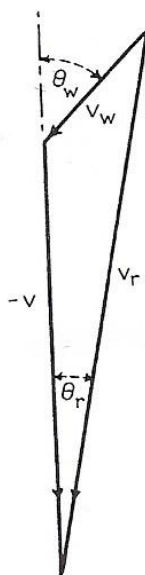
Σχήμα A.3 Τυπικές τιμές μηχανικής αντίστασης και των στοιχείων της σε σχέση με την ταχύτητα για ένα επιβατικό βαγόνι βάρους 30.5 t [4]

Αντίσταση του αέρα

Το πέρασμα ενός οχήματος μέσα από τον περιβάλλοντα αέρα αυξάνει την αντίσταση λόγω θετικών και αρνητικών πιέσεων στις εκτεθειμένες άκρες και στην τριβή πλευρικά του οχήματος. Αυτή η αντίσταση είναι ανεξάρτητη του βάρους του οχήματος, αλλά εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα, και σύμφωνα με τους νόμους της μηχανικής των ρευστών, είναι ανάλογη της πυκνότητας του αέρα και της σχετικής ταχύτητας. Αυτή η σχετική ταχύτητα, ή αλλιώς η αισθητή ταχύτητα του αέρα για έναν παρατηρητή στο μπροστινό μέρος του τρένου, v_r , είναι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα A.3, το διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας που είναι ίση και αντίθετη της ταχύτητας του τρένου, v , και της πραγματικής ταχύτητας του αέρα, v_w . Έτσι η αντίσταση του τρένου επηρεάζεται και από την ταχύτητα αλλά και από την κατεύθυνση του πραγματικού αέρα, ειδικά σε υψηλές ταχύτητες.

Υπάρχει επίσης ένας αριθμός μικρότερων παραγόντων οι οποίοι μπορεί να συνεισφέρουν στην αντίσταση του τρένου, αλλά η επιρροή τους συνήθως αμελείται. Πιθανώς ο πιο σημαντικός να είναι λόγω των παρασιτικών κινήσεων οχημάτων σε ένα τρένο, για παράδειγμα το «μύτιασμα» των οχημάτων χαμηλού μεταξόνιου, το οποίο μπορεί να αυξήσει την αντίσταση τρένου μέσω της αυξανόμενης τριβής από τις περιοδικές δυνάμεις στις φλάντζες.

Η αντίσταση του αέρα στα τρένα έχει μελετηθεί σε αεροδυναμικές σήραγγες από ένα μεγάλο αριθμό παρατηρητών για πολλά χρόνια, με αποκορύφωση την λεπτομερή έρευνα του Johansen, την οποία αργότερα προχώρησαν οι Peacock και Gawthorpe. Οι δοκιμές σε αεροδυναμικές σήραγγες, οι οποίες υποχρεωτικά γίνονται πάνω σε μοντέλα χαμηλότερης κλίμακας, επιτρέπουν την μελέτη του σχήματος της ροής του αέρα γύρω από ένα σώμα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στο ότι συγκρίσιμες μετρήσεις μπορούν να παρθούν άμεσα σε μοντέλα που έχουν λεπτομερείς τροποποιήσεις και έτσι μπορεί να αναπτυχθεί το πιο αποτελεσματικό προφίλ. Έχουν όμως το μειονέκτημα ότι είναι δύσκολη η κλιμάκωση προς τα πάνω των μετρήσεων που αντιστοιχούν σε αληθινές διαστάσεις και υπάρχει επίσης, το πρόβλημα του να αναπαρασταθεί ικανοποιητικά σε μία αεροδυναμική σήραγγα η επιρροή που έχει το πραγματικό έδαφος.



Σχήμα A.3 Ταχύτητα του αέρα σε σχέση με την αμαξοστοιχία όπως αυτή επηρεάζεται από τον άνεμο [4]

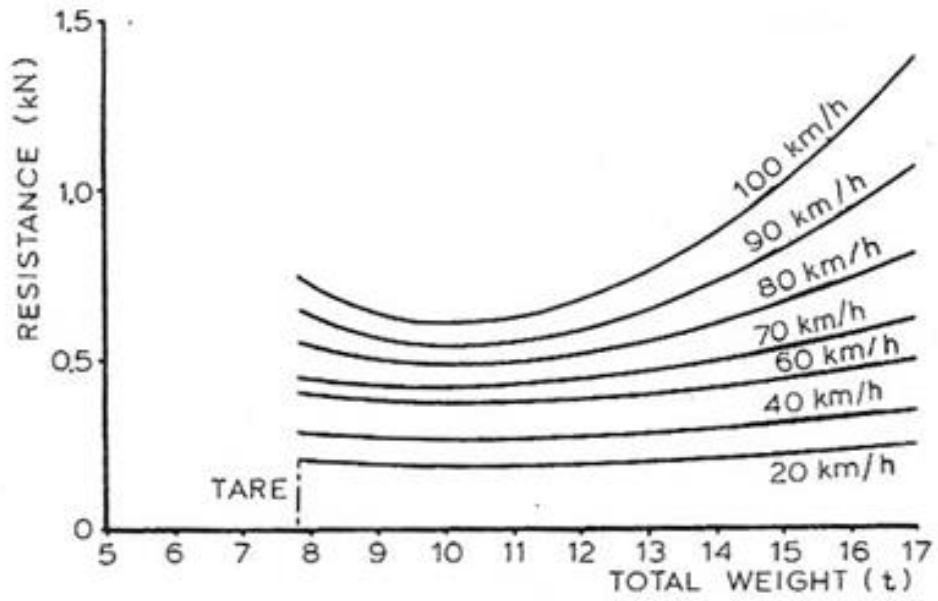
Στην πορεία αυτών των ερευνών, επιβεβαιώθηκε ότι η αντίσταση της ροής του αέρα πάνω από ένα τρένο είναι ανάλογη της πυκνότητας του αέρα και του τετραγώνου της σχετικής του ταχύτητας. Προφανώς το πρώτο βαγόνι ενός τρένου, με σχήμα σφήνας, σπρώχνει τον αέρα μπροστά του έτσι ώστε υψηλότερη πίεση να είναι λίγο πολύ ομοιόμορφα κατανομημένη πάνω στην επιφάνεια του. Στο πίσω μέρος του τρένου, ο αέρας τείνει να στροβιλίζεται με σχετικά μικρή πτώση πίεσης έτσι ώστε η αντίσταση στο μπροστινό μέρος του τρένου να είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στο πίσω μέρος του τρένου. Επιπλέον αντίσταση προκαλείται λόγω τριβής της ροής του αέρα στα πλευρικά των βαγονιών, η οποία θα πρέπει να είναι όσο πιο ομαλή γίνεται χωρίς προεξοχές. Πιο σημαντικό, όμως, ήταν το συμπέρασμα του Johansen ότι όταν η σχετική ροή του αέρα παρουσίαζε ένα εγκάρσιο στοιχείο, λόγω του πλευρικού ανέμου, η αντίσταση τρένου μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά λόγω της επίδρασης του αέρα στις διαγώνια εκτεθειμένες άκρες των βαγονιών ή των μπροστινών φορείων. Συμπέρανε ότι ταιριάζοντας ένα τρένο με ένα «φέρινγκ» στο μπροστινό μέρος, η εξάλειψη κενών μεταξύ των βαγονιών και η τοποθέτηση κουρτινών μεταξύ των φορείων των βαγονιών είναι σημαντικοί παράγοντες στην μείωση της αντίστασης του αέρα η οποία, αν και μικρή σε χαμηλές ταχύτητας, έχει μεγάλη σημασία μεταξύ 100 km/h και 200 km/h, και είναι υψίστης σημασίας για πάνω από 160 km/h.

Οι αντιστάσεις κύλισης των μηχανών τρένων, που είναι φυσικά παρόμοιες και για τους ηλεκτρικούς ή τους diesel-electric κινητήρες, γενικά αντιστοιχούν σε αυτές των βαγονιών, μόνο που αυτές είναι μεγαλύτερου βάρους και συμπεριλαμβάνεται πάντα και η αντίσταση της μπροστινής επιφάνειας. Αν και η μηχανολογική αντίσταση των κινητήρων στην περιστροφή δεν θεωρείται μέρος της αντίστασης κύλισης, εφόσον συμπεριλαμβάνεται κατάλληλα στον βαθμό απόδοσης του κινητήρα, πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν ο κινητήρας έχει σβήσει, καθώς τα αξονικά ρουλεμάν εξυπηρετούν την διπλή λειτουργία στήριξης της μηχανής και της διατήρησης των αντιδράσεων από την ελκτική δύναμη. Εάν είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η αντίσταση των ρουλεμάν για τις δύο λειτουργίες ξεχωριστά, αυτό γίνεται συνήθως σε αναλογία με το φορτίο που μετέφερε. Η αντίσταση βαγονιών μεταφοράς αγαθών διαφορετικών φορτίων σε συνάρτηση με το συνολικό βάρος για διάφορες ταχύτητες σε μέσες συνθήκες λειτουργίας, απεικονίζονται στο Σχήμα Α.4. Ένα τυπικό

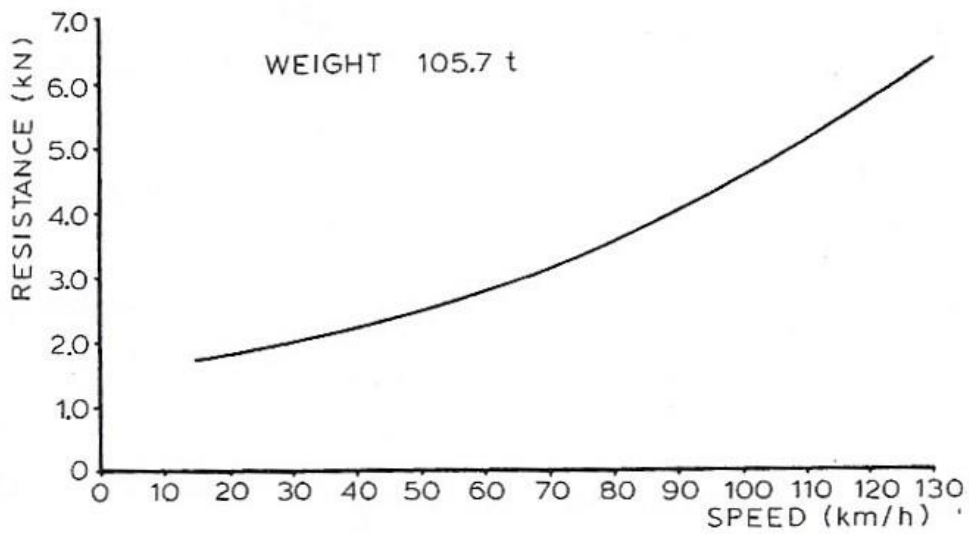
σύνολο αποτελεσμάτων για μια σιδηροδρομική μηχανή μεσαίου μεγέθους για μέσες συνθήκες εργασίας φαίνεται στο Σχήμα A.5. Τέτοιες τιμές καθορίζουν συνήθως την έλξη της σιδηροδρομικής μηχανής, που μετράται από το βαγόνι-δυναμόμετρο για σταθερή ταχύτητα στο επίπεδο, με την συνολική τιμή της ελκτικής δύναμης στις ζάντες των τροχών, καθορισμένη από τα γνωστά χαρακτηριστικά του κινητήρα και την μετρούμενη τιμή ρεύματος του κινητήρα.

Εφόσον η αεροδυναμική αντίσταση στην μπροστινή επιφάνεια της αμαξοστοιχίας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν στην πίσω επιφάνεια, η αντίσταση των βαγονιών με τις μηχανές καθορίζεται καλύτερα με την τοποθέτηση των δοκιμαστικών οχημάτων μπροστά από το βαγόνι-δυναμόμετρο ενώ η σιδηροδρομική μηχανή να είναι στο πίσω μέρος. Η αντίσταση μετράται τότε ως η ώθηση που απαιτείται για να διατηρηθούν τα δοκιμαστικά οχήματα σε σταθερή ταχύτητα και διορθώνεται για την κλίση. Δεδομένου ότι αυτή η τιμή διαφορετικά θα περιλάμβανε την περιστροφική αντίσταση των ηλεκτρικών κινητήρων είναι συνηθισμένο, είτε να πρέπει να αφαιρεθούν τα γρανάζια είτε να αφαιρεθεί μια εκτιμώμενη τιμή προερχόμενη από δοκιμές του κινητήρα. Τυπικές μετρήσεις για ένα μηχανοκίνητο βαγόνι και για ένα συρόμενο βαγόνι, δίνονται στο Σχήμα A.6.

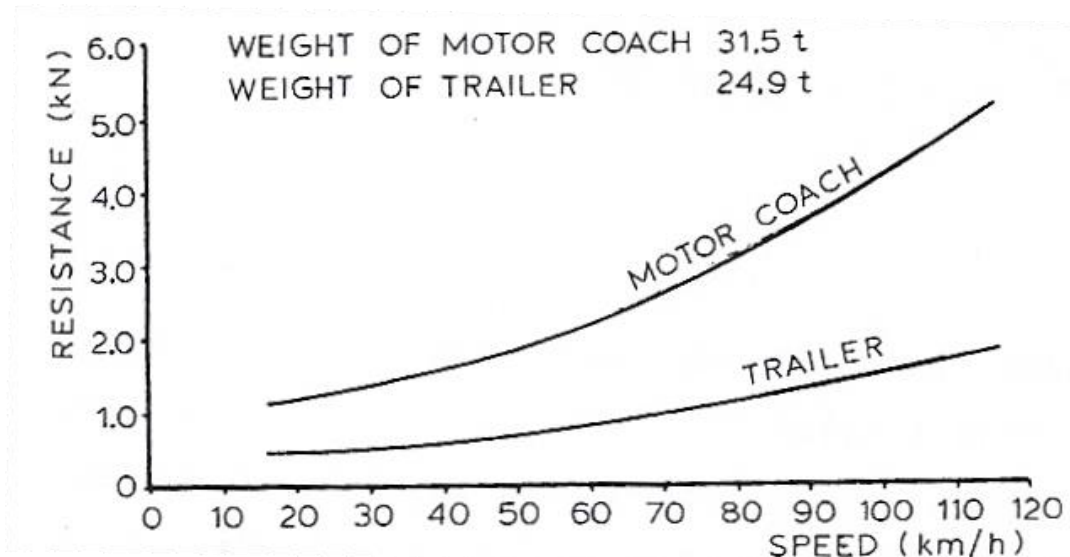
Όλα τα επιβατικά βαγόνια και μερικά φορτηγά βαγόνια είναι εξοπλισμένα με ηλεκτρικές γεννήτριες φωτισμού, και για την μέτρηση της αντίστασής τους συνηθίζεται η αφαίρεση των κινητήριων ιμάντων τους καθώς αυτοί προκαλούν επιπλέον αντίσταση, που εξαρτάται από το φορτίο φωτισμού και την κατάσταση της μπαταρίας. Πρέπει όμως να υπάρχει μια ανοχή για την επίδραση αυτών των μηχανών οι οποίες, μόλις η γεννήτρια «κόβει» (“cut in”), μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντίσταση στις χαμηλότερες ταχύτητες, ενώ καμπύλες για μια τυπική γεννήτρια φαίνονται στο Σχήμα A.7. Στην εκτίμηση της αντίστασης των οχημάτων σε μέσες συνθήκες υπηρεσίας, τέτοιες τιμές πρέπει να προστεθούν στην μετρούμενη αντίσταση, και η φόρτιση της γεννήτριας να λαμβάνεται ως αυτή που χρειάζεται για την διατήρηση του φορτίου της μπαταρίας με μέσες περιόδους φωτισμού.



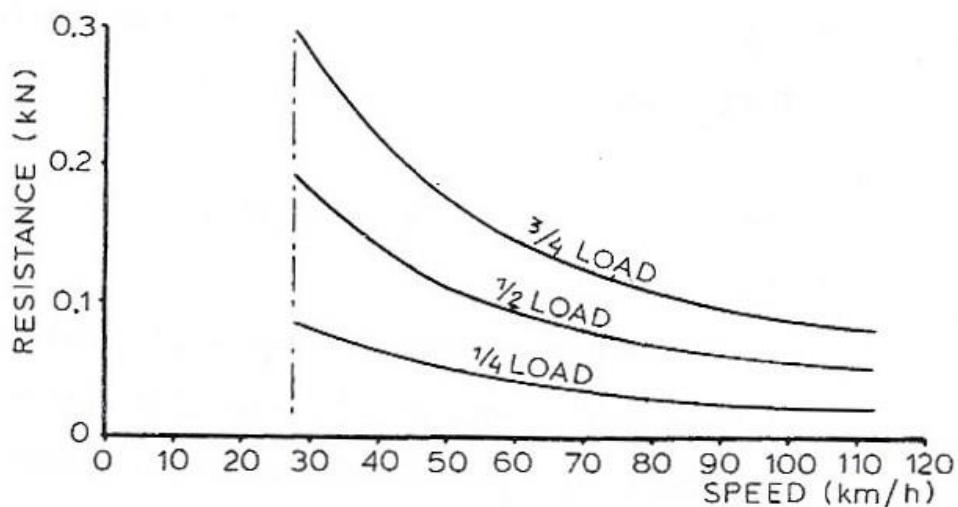
Σχήμα A.4 Αντίσταση βαγονιών μεταφοράς αγαθών διάφορων φορτίων σε σχέση με το συνολικό βάρος σε διάφορες ταχύτητες με μέσες συνθήκες λειτουργίας [4]



Σχήμα A.5 Τυπικό σύνολο αποτελεσμάτων σιδηροδρομικής μηχανής μεσαίου μεγέθους για μέσες συνθήκες λειτουργίας [4]



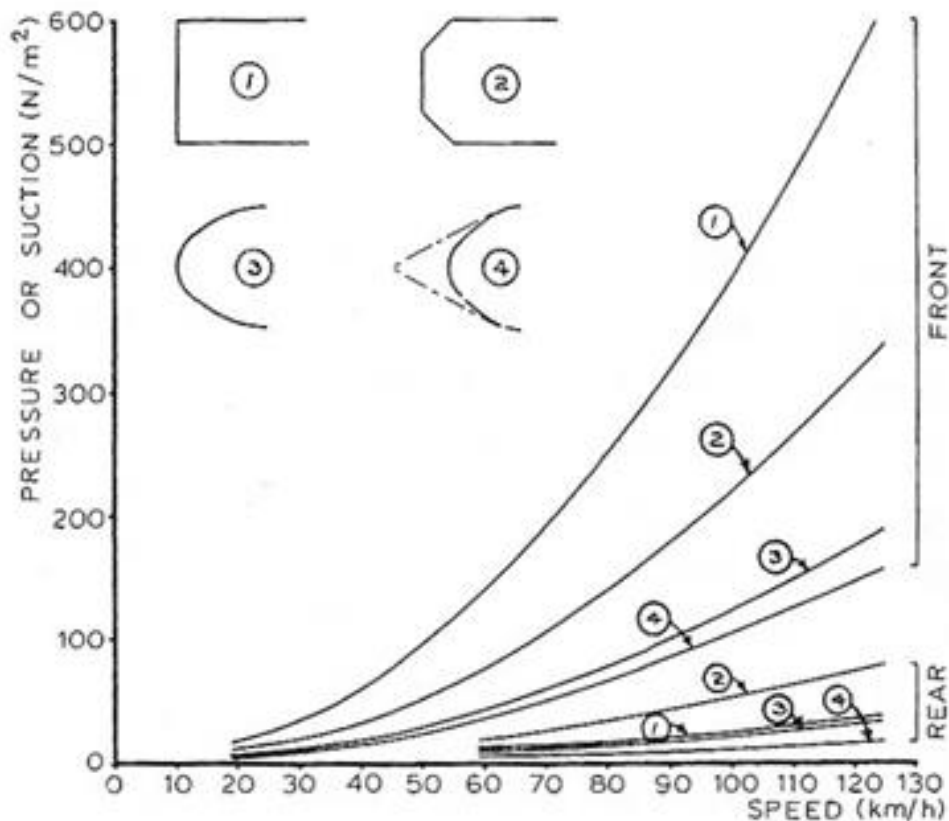
Σχήμα A.6 Αντίσταση τυπικού μηχανοκίνητου βαγονιού και ενός συρόμενου βαγονιού σε μέσες συνθήκες λειτουργίας [4]



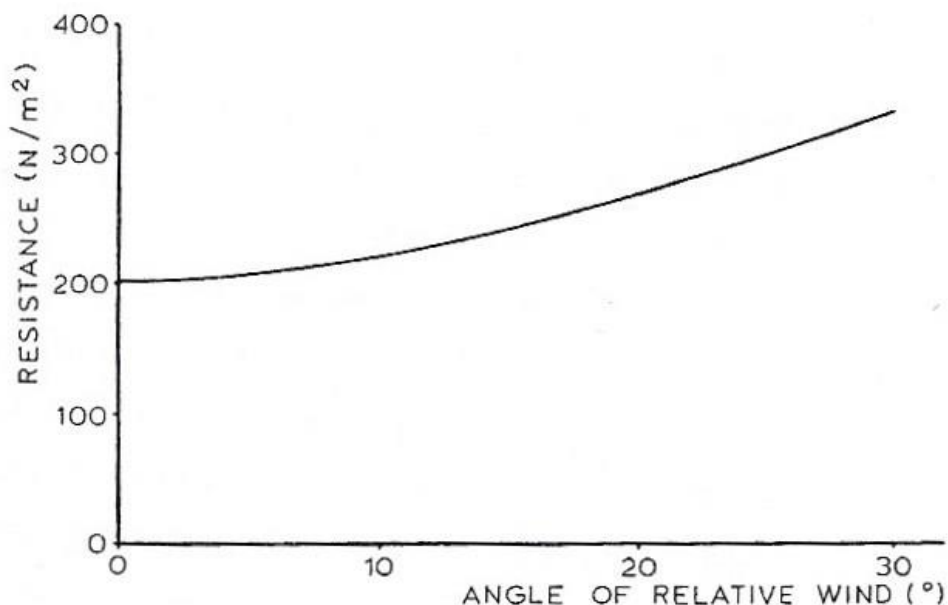
Σχήμα A.7 Επιπλέον αντίσταση βαγονιού λόγω τυπικής γεννήτριας ιδιοκατανάλωσης φωτισμού σε διάφορα φορτία [4]

Σε αρκετές από τις δοκιμές που έχουν αναφερθεί, έχουν γίνει προσπάθειες συσχέτισης των μετρούμενων τιμών της αντίστασης με την φύση, αλλά, εκτός από ακραίες περιπτώσεις, είναι συνήθως αδύνατον να εντοπιστούν οποιοσδήποτε σημαντικές διαφορές.

Για την εκτίμηση της αντίστασης της αμαξοστοιχίας σε οποιοσδήποτε συγκεκριμένες καταστάσεις, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του σχετικού ανέμου πρέπει πρώτα να καθοριστούν διανυσματικά από τις ταχύτητες της αμαξοστοιχίας και του πραγματικού αέρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα Α.3. Επιπλέον προσθήκες είναι απαραίτητες για τις πιέσεις στο μπροστά και στο πίσω μέρος της αμαξοστοιχίας (τιμές από το Σχήμα Α.8 πολλαπλασιάζονται με την περιοχή εγκάρσιας διατομής), στην περίπτωση των φορτηγών τρένων για οποιαδήποτε εκτεθειμένη άκρη των βαγονιών οι τιμές του Σχήματος Α.9 διορθωμένες για την σχετική ταχύτητα ανέμου και πολλαπλασιασμένες με την εκτεθειμένη περιοχή), και οποιαδήποτε ανοχή χρειάζεται για γεννήτριες φωτισμού.



Σχήμα Α.8 Σχηματισμοί οχημάτων στα άκρα τους: 1) ορθογώνιο, 2) κομμένη γωνία, 3) παραβολικό, 4) παραβολική σφήνα, μαζί με τιμές πίεσης ή υποπίεσης στο μπροστά και στο πίσω μέρος της αμαξοστοιχίας [4]

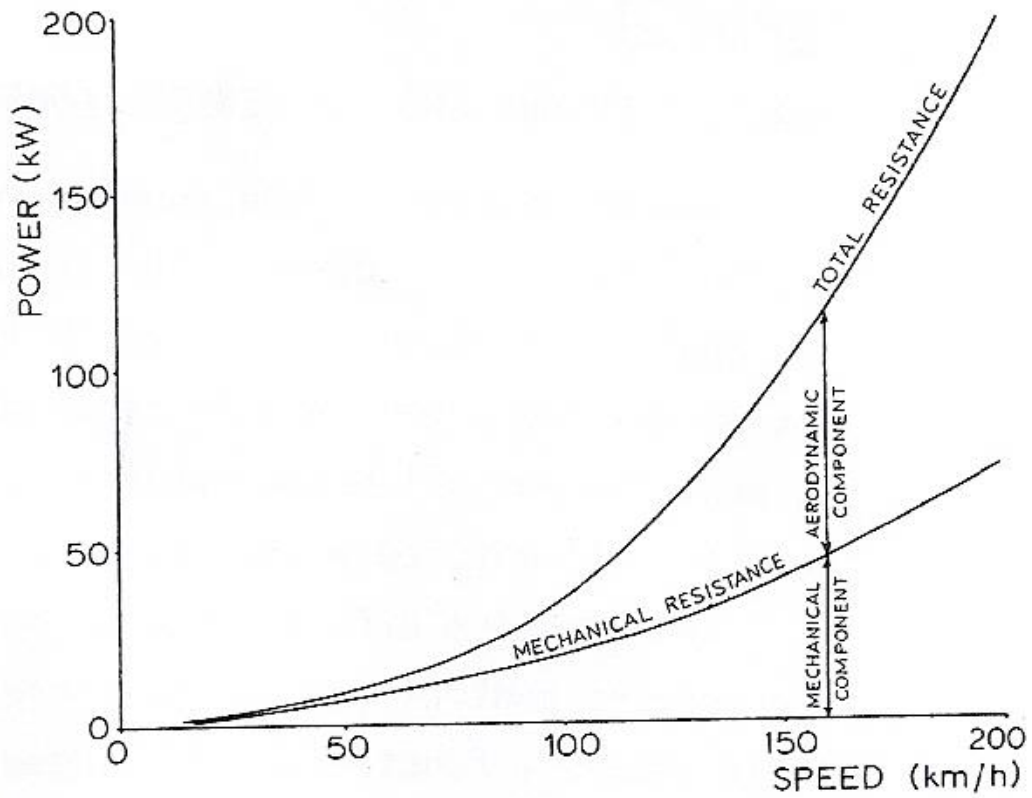


Σχήμα A.9 Επιπλέον αντίσταση λόγω της διαφοράς πίεσης σε εκτεθειμένες άκρες ενός βαγονιού σε σχέση με την σχετική γωνία ανέμου των 100 km/h [4]

Καθώς το έργο που χρειάζεται για την μεταφορά επιβατών ή αγαθών εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης που αντιστοιχεί στην ταχύτητα της διαδρομής, η ισχύς που απαιτείται θα αυξάνεται ραγδαία με την ταχύτητα, ώστε να μπορεί να ξεπεράσει την αεροδυναμική αντίσταση που είναι ανάλογη του κύβου της σχετικής ταχύτητας του ανέμου. Η ισχύς που απαιτείται για να ξεπεράσει τις δύο συνιστώσες της αντίστασης σύμφωνα με την British Railways φαίνεται στο Σχήμα A.10, στο οποίο φαίνεται ότι, ενώ έχει μικρή σημασία σε χαμηλές ταχύτητες, σε υψηλές ταχύτητες η αντίσταση αποκτά μέγιστη σημασία. Συνεπώς σε υψηλές ταχύτητες η συνολική αντίσταση εξαρτάται πολύ από το σχήμα και το μέγεθος του οχήματος, και εφόσον μόνο η μηχανολογική αντίσταση μπορεί να επηρεαστεί, μόνο μια μικρή αναλογία της συνολικής ισχύος μπορούμε να κερδίσουμε με την αποδοχή εναλλακτικών μέσων υποστήριξης και προσανατολισμού.

Θεωρείται συχνά ότι άλλα μέσα υποστήριξης τα οποία έχουν ληφθεί υπόψη, όπως αεροστρώματα ή μαγνητική υπερύψωση, μπορούν να επιτύχουν μια σοβαρή μείωση στην απαίτηση ισχύος σε υψηλές ταχύτητες, αλλά πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι τέτοια συστήματα από μόνα τους συνήθως

χρειάζονται μια σημαντική δόση ισχύος, η οποία γενικά είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας του ανέμου. Μια τέτοια απαίτηση απεικονίζεται στο Σχήμα Α.10.



Σχήμα Α.10 Απαιτούμενη ισχύς για την υπερκάλυψη της μηχανικής και αεροδυναμικής αντίστασης ενός τυπικού βαγονιού της British Railways [4]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Λειτουργία Μανέτας

Η ισχύς εξόδου του κινητήρα diesel της σιδηροδρομικής μηχανής καθορίζεται από την περιστροφική του ταχύτητα και τον λόγο αέρα καυσίμου, τα οποία ρυθμίζονται από έναν ρυθμιστή στροφών ή έναν παρόμοιο μηχανισμό. Ο ρυθμιστής στροφών έχει σχεδιαστεί για να αποκρίνεται τόσο στην ρύθμιση της τροφοδοτικής βαλβίδας, όπως αυτή καθορίζεται από τον οδηγό της μηχανής, όσο και από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα diesel.

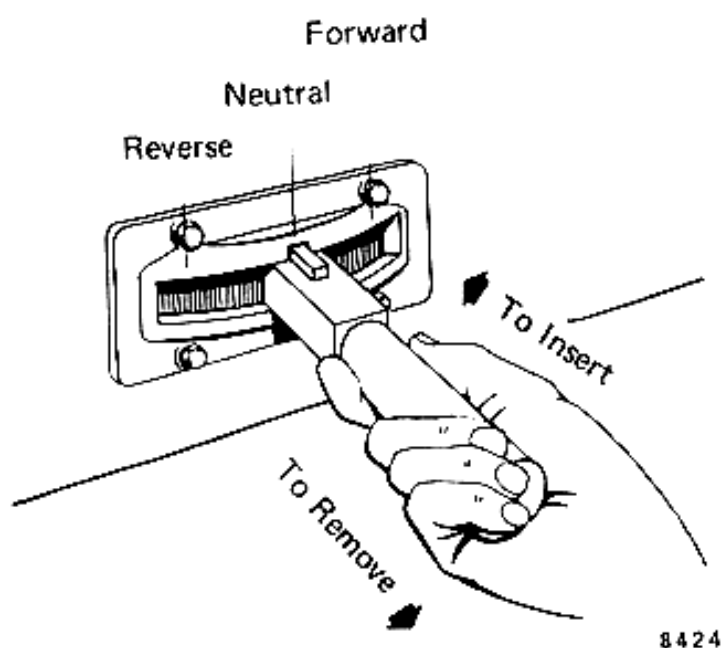
Η ισχύς εξόδου της σιδηροδρομικής μηχανής, και επομένως η ταχύτητα, τυπικά ελέγχεται από τον οδηγό της μηχανής ο οποίος χρησιμοποιεί μια κλιμακωτή ή με εγκοπές μανέτα που παράγει σαν δυαδικό ηλεκτρικό σήμα που αντιστοιχεί στην θέση της μανέτας. Αυτός ο βασικός σχεδιασμός ταιριάζει και στη λειτουργία των MU (βλ. Παράγραφο 1.4) με την παραγωγή διακριτών συνθηκών που εξασφαλίζουν ότι όλες οι μονάδες ανταποκρίνονται το ίδιο στην θέση της μανέτας. Η δυαδική κωδικοποίηση βοηθά επίσης στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των γραμμών αμαξοστοιχιών (ηλεκτρικές συνδέσεις) που απαιτούνται για την μεταφορά του σήματος από μονάδα σε μονάδα. Για παράδειγμα, χρειάζονται μόνο τέσσερις γραμμές αμαξοστοιχιών για την κωδικοποίηση όλων των πιθανών θέσεων της μανέτας.

Οι θέσεις ισχύος αναφέρονται συχνά από το προσωπικό των σιδηροδρομικών μηχανών ως βαθμίδες. Σε παλαιότερες σιδηροδρομικές μηχανές, ο μηχανισμός της μανέτας ρυθμιζόταν έτσι ώστε να μην είναι δυνατόν να προωθεί περισσότερες από μία θέση ισχύος τη φορά. Ο

μηχανοδηγός δεν μπορούσε για παράδειγμα να ρυθμίσει την μανέτα από τη βαθμίδα 2 στη βαθμίδα 4 χωρίς πρώτα να σταματήσει στη βαθμίδα 3. Η λειτουργία αυτή είχε σκοπό την εξασφάλιση ομαλού χειρισμού της αμαξοστοιχίας αποφεύγοντας απότομες μεταβολές στην ισχύ. Οι μοντέρνες σιδηροδρομικές μηχανές δεν έχουν πλέον αυτόν τον περιορισμό, καθώς τα συστήματα ελέγχου που διαθέτουν είναι ικανά να αυξομειώνουν ομαλά την ισχύ και να αποφεύγουν την απότομη μεταβολή φορτίου της αμαξοστοιχίας ανεξάρτητα από το πώς ο μηχανοδηγός χειρίζεται το όχημα.

Όταν η μανέτα βρίσκεται στη θέση άφορτης λειτουργίας, ο κινητήρας diesel της σιδηροδρομικής μηχανής τροφοδοτείται με την ελάχιστη παροχή καυσίμου και λειτουργεί στην άφορτη λειτουργία σε χαμηλές στροφές. Επιπλέον, οι κινητήρες έλξης δεν είναι συνδεδεμένοι με την κύρια γεννήτρια και οι περιελίξεις πεδίου της γεννήτριας δεν θα διεγείρονται, οπότε και η γεννήτρια δεν θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Οπότε θα είναι σαν να έχουμε βάλει «νεκρά» ταχύτητα μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων ενώ η μηχανή θα δουλεύει.

Για να θέσουμε την μηχανή σε κίνηση, βάζουμε τον μοχλό ελέγχου, βλέπε Σχήμα B.1, στην σωστή θέση (προς τα εμπρός ή προς τα πίσω), απελευθερώνεται το φρένο και βάζουμε τη μανέτα στη βαθμίδα 1. Ένας έμπειρος μηχανοδηγός μπορεί να ολοκληρώσει αυτά τα βήματα με καλά συντονισμένο τρόπο που θα δώσει ένα σχεδόν ανεπαίσθητο ξεκίνημα.



Σχήμα B.1 Μοχλός ελέγχου [17]

Τοποθετώντας τη μανέτα στην βαθμίδα 1 θα οδηγήσει τους κινητήρες έλξης στο να συνδεθούν με την κύρια γεννήτρια, οπότε και θα διεγερθούν τα πηνία πεδίου της γεννήτριας. Με την διέγερση αυτή, η κύρια γεννήτρια δίνει ηλεκτρική ενέργεια στους κινητήρες έλξης οι οποίοι με την σειρά τους δίνουν κίνηση στους τροχούς οπότε κινείται και η αμαξοστοιχία. Αν η σιδηροδρομική μηχανή δεν είναι συνδεδεμένη με την υπόλοιπη αμαξοστοιχία και δεν βρίσκεται σε ανηφορική κλίση εδάφους, τότε επιταχύνει εύκολα. Από την άλλη μεριά, αν πρόκειται να δώσει κίνηση σε μια αμαξοστοιχία μεγάλου μήκους, η μηχανή μπορεί πολύ εύκολα να σβήσει με την παραμικρή χαλάρωση στην ισχύ της, καθώς η δύναμη αντίστασης που επιβάλλει η αμαξοστοιχία θα υπερβεί την ελκτική δύναμη που επιβάλλεται από την σιδηροδρομική μηχανή. Ένας έμπειρος μηχανοδηγός θα είναι σε θέση να καταλάβει τότε η μηχανή είναι έτοιμη να σβήσει και θα προωθήσει σταδιακά τη μανέτα, όπως απαιτείται για να διατηρηθεί ο ρυθμός της επιτάχυνσης.

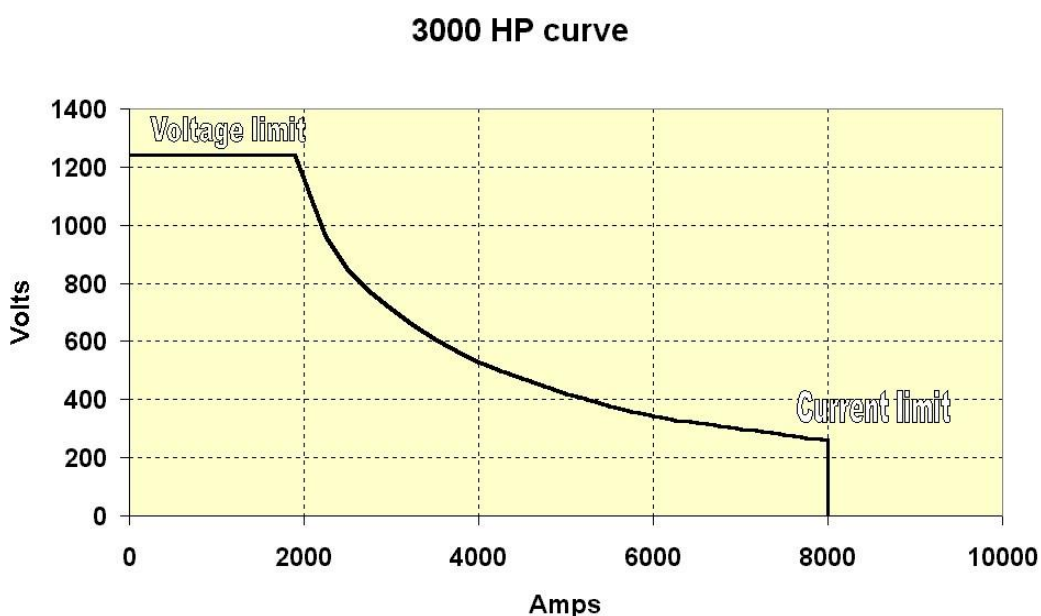
Καθώς η μανέτα μετακινείται σε υψηλότερες βαθμίδες, αυξάνεται και ο λόγος καυσίμου-αέρα (Φ) του κινητήρα diesel, με αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών (rpm) και την ισχύ εξόδου του κινητήρα. Ταυτόχρονα, το πεδίο διέγερσης της κύριας γεννήτριας θα αυξάνεται αναλογικά για να απορροφήσει την μεγαλύτερη ισχύ. Αυτό θα μεταφραστεί ως αύξηση της ηλεκτρικής ισχύς εξόδου στους κινητήρες έλξης, με μια αναλογική αύξηση στην ελκτική δύναμη. Τελικώς, ανάλογα και με τις απαιτήσεις του χρονοδιαγράμματος της αμαξοστοιχίας, ο μηχανοδηγός τοποθετεί τη μανέτα στην θέση μέγιστης ισχύος και θα παραμένει εκεί μέχρι η αμαξοστοιχία να φτάσει την επιθυμητή ταχύτητα.

Το σύστημα πρόωσης έχει σχεδιαστεί για να παράγει τη μέγιστη ροπή του κινητήρα έλξης κατά τη φάση εκκίνησης, γεγονός που εξηγεί γιατί οι σύγχρονες μηχανές είναι σε θέση να ξεκινούν τα τρένα που ζυγίζουν πάνω από 15.000 τόνους, ακόμη και σε ανηφορική κλίση εδάφους. Η σημερινή τεχνολογία επιτρέπει σε μια σιδηροδρομική μηχανή να αναπτύσσει όσο το 30% του βάρους φορτίου του οδηγού σε ελκτική δύναμη, που ανέρχεται σε περίπου 530 kN ελκτικής δύναμης για μια μεγάλη, εξαξονική μονάδα μεταφοράς εμπορευμάτων. Στην πραγματικότητα, μια συστοιχία τέτοιων μονάδων μπορεί να παράγει παραπάνω από αρκετή ελκτική δύναμη ικανή να κάνει ζημιά ή να εκτροχιάσει (αν κινείται πάνω σε στροφή) τα οχήματα ή να

σπάσει η σύνδεση μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, εναπόκειται στον μηχανοδηγό να παρακολουθεί προσεκτικά την ποσότητα της ισχύος που εφαρμόζεται κατά την εκκίνηση για την αποφυγή ζημιών. Συγκεκριμένα, η αποσύνδεση μεταξύ βαγονιών σε ανηφορική κλίση θα μπορούσε να έχει καταστροφικά αποτελέσματα, αν και οι μοντέρνες αμαξοστοιχίες φέρουν αυτόματη πέδηση που ακινητοποιούν το τρένο σε μια τέτοια περίπτωση [15].

Λειτουργία Συστήματος Πρόωσης

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, το σύστημα ελέγχου της σιδηροδρομικής μηχανής έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε η κύρια γεννήτρια να παράγει ηλεκτρική ενέργεια στην έξοδό της που να ταιριάζει σε οποιαδήποτε δεδομένη ταχύτητα κινητήρα. Λαμβάνοντας υπόψη τα εγγενή χαρακτηριστικά των κινητήρων έλξης, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο οι κινητήρες συνδέονται με την κύρια γεννήτρια, η γεννήτρια θα παράγει υψηλό ρεύμα και χαμηλή τάση σε χαμηλές ταχύτητες της σιδηροδρομικής μηχανής, αλλάζοντας σταδιακά σε χαμηλό ρεύμα και υψηλή τάση, καθώς θα επιταχύνεται η σιδηροδρομική μηχανή. Ως εκ τούτου, η καθαρή ενέργεια που παράγεται από τη σιδηροδρομική μηχανή θα παραμείνει σταθερή για κάθε δεδομένη ρύθμιση του γκαζιού, βλέπε Σχήμα B.2.



Σχήμα B.2 Καμπύλη ισχύος για την 8^η βαθμίδα τυπικής γεννήτριας [15]

Σε παλαιότερους σχεδιασμούς, ο ρυθμιστής στροφών (governor) της κινητήριας μηχανής diesel και ο ρυθμιστής φορτίου έπαιζαν κεντρικό ρόλο στο σύστημα ελέγχου. Ο ρυθμιστής στροφών είχε δύο εξωτερικές εισόδους: τις απαιτούμενες στροφές του κινητήρα, όπως αυτές καθορίζονταν από την θέση της μανέτας από τον μηχανοδηγό, και την πραγματική ταχύτητα της μηχανής. Ο ρυθμιστής στροφών έχει δύο εξωτερικές εξόδους ελέγχου: την ρύθμιση μπεκ ψεκασμού καυσίμου, το οποίο καθορίζει και τον λόγο αέρα-καυσίμου, και την ρύθμιση θέσης φορτίου, που επηρεάζει την διέγερση της κύριας γεννήτριας. Ο ρυθμιστής στροφών περιλαμβάνει επίσης ένα ξεχωριστό μηχανισμό που προστατεύει από υπερβολική ταχύτητα, ο οποίος σταματάει αμέσως την παροχή καυσίμου στα μπεκ ψεκασμού και ηχεί συναγερμό στην περίπτωση που ο κινητήρας diesel υπερβεί έναν καθορισμένο αριθμό στροφών. Όλες αυτές οι εισοδοί και έξοδοι δεν είναι απαραίτητα ηλεκτρικές.

Ο ρυθμιστής φορτίου είναι ουσιαστικά ένα μεγάλο ποτενσιόμετρο που ελέγχει την ισχύ εξόδου της κύριας γεννήτριας μεταβάλλοντας την διέγερση πεδίου και ως εκ τούτου τον βαθμό φορτίου που εφαρμόζεται στον κινητήρα. Η δουλειά του ρυθμιστή φορτίου είναι σχετικά περίπλοκη, διότι αν και η ισχύς του κινητήρα diesel της σιδηροδρομικής μηχανής είναι ανάλογη των στροφών και του λόγου αέρα-καυσίμου, η παραγωγή της κύριας γεννήτριας δεν είναι. Αντί αυτού, χρησιμοποιήθηκε ένας αρκετά περίπλοκος ηλεκτρο-υδραυλικός ρυθμιστής στροφών Woodward. Σήμερα, αυτή η σημαντική λειτουργία εκτελείται από την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου κινητήρα, με την ίδια να είναι ένα μέρος της μονάδας ελέγχου της σιδηροδρομικής μηχανής.

Καθώς το φορτίο του κινητήρα αλλάζει, η ταχύτητα περιστροφής του θα αλλάξει επίσης. Αυτό ανιχνεύεται από τον ρυθμιστή στροφών μέσω μιας μεταβολής στο σήμα ανάδρασης των στροφών του κινητήρα. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι να προσαρμοστούν τόσο ο λόγος αέρα-καυσίμου όσο και η θέση του ρυθμιστή φορτίου έτσι ώστε οι στροφές του κινητήρα και η ροπή, και ως εκ τούτου η ισχύς, του κινητήρα θα παραμείνουν σταθερές για κάθε δεδομένη ρύθμιση του «γκαζιού», ανεξάρτητα από την πραγματική ταχύτητα της αμαξοστοιχίας ως προς το έδαφος.

Σε καινούριους σχεδιασμούς που ελέγχονται από «υπολογιστές έλξης», σε κάθε βαθμίδα στροφών του κινητήρα κατανέμεται και μια κατάλληλη ισχύς εξόδου, ή αλλιώς «Καταγραφή των kW», μέσω ενός λογισμικού. Ο

υπολογιστής συγκρίνει την τιμή αυτή με την πραγματική ισχύ εξόδου της κύριας γεννήτριας, ή «ανατροφοδότηση kW», η οποία υπολογίζεται από τις τιμές του ρεύματος του κινητήρα έλξης και της τάσης ανατροφοδότησης της κύριας γεννήτριας. Ο υπολογιστής ρυθμίζει την τιμή ανάδρασης ώστε να ταιριάζει με την τιμή αναφοράς μέσω του ελέγχου διέγερσης της κύριας γεννήτριας, όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Ο ρυθμιστής στροφών έχει ακόμα τον έλεγχο των στροφών του κινητήρα, αλλά ο ρυθμιστής φορτίου δεν παίζει πλέον κάποιο κεντρικό ρόλο σε αυτό το είδος του συστήματος ελέγχου. Ωστόσο, ο ρυθμιστής φορτίου διατηρείται ως «back-up» σε περίπτωση υπερφόρτωσης του κινητήρα. Σύγχρονες μηχανές που είναι εξοπλισμένες με σύστημα ηλεκτρονικής έγχυσης καυσίμου (electronic fuel injection) (EFI) μπορεί να μην έχουν μηχανικό ρυθμιστή στροφών, ωστόσο, μέσω μονάδων ηλεκτρονικών υπολογιστών χρησιμοποιείται «εικονικός» ρυθμιστής φορτίου και ρυθμιστής στροφών.

Η απόδοση των κινητήρων έλξης ελέγχεται είτε μεταβάλλοντας την τάση εξόδου συνεχούς ρεύματος της κύριας γεννήτριας, για κινητήρες συνεχούς ρεύματος, είτε μεταβάλλοντας τη συχνότητα και την τάση εξόδου του VVVF για κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στην ακινησία, η έξοδος της κύριας γεννήτριας είναι αρχικά χαμηλής τάσης και υψηλού ρεύματος, συχνά πάνω από 1000 A (Ampere) ανά κινητήρα σε πλήρη ισχύ. Όταν η μηχανή είναι σε (ή κοντά σε) ακινησία, η ροή ρεύματος θα πρέπει να περιορίζεται μόνο από την αντίσταση συνεχούς ρεύματος των περιελίξεων του κινητήρα και από την διασύνδεση του κυκλώματος, καθώς και από την χωρητικότητα της ίδιας της κύριας γεννήτριας. Η ροπή σε έναν κινητήρα με σειριακή περιέλιξη είναι περίπου ανάλογη με το τετράγωνο του ρεύματος. Ως εκ τούτου, οι κινητήρες έλξης θα παράγουν την μέγιστη ροπή τους, προκαλώντας την σιδηροδρομική μηχανή να αναπτύξει την μέγιστη ελκτική δύναμη, ώστε να ξεπεραστεί η αδράνεια της αμαξοστοιχίας. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ανάλογο με αυτό που συμβαίνει σε ένα αυτοκίνητο με αυτόματο κιβώτιο ταχυτήτων κατά την εκκίνηση, όταν είναι στην πρώτη ταχύτητα και έτσι πρέπει να παράγει μέγιστο πολλαπλασιασμό της ροπής.

Καθώς η σιδηροδρομική μηχανή επιταχύνεται, οι πλέον περιστρεφόμενοι οπλισμοί του κινητήρα θα αρχίσουν να παράγουν μια πίσω ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF, που σημαίνει ότι οι κινητήρες προσπαθούν να δράσουν

ως γεννήτριες), η οποία θα αντιπαχθεί στην έξοδο της κύριας γεννήτριας και θα προκαλέσει την μείωση του ρεύματος του κινητήρα έλξης. Η τάση της κύριας γεννήτριας θα αυξηθεί ανάλογα, σε μια προσπάθεια να διατηρήσει την ισχύ του κινητήρα, αλλά θα φτάσει σε ένα τελικό επίπεδο. Σε αυτό το σημείο, η σιδηροδρομική μηχανή θα πάψει ουσιαστικά να επιταχύνεται, εκτός αν βρεθεί σε κατηφορική κλίση εδάφους. Εφόσον αυτό το επίπεδο συνήθως σημαίνει ότι η σιδηροδρομική μηχανή έχει φτάσει σε κάποια ταχύτητα ουσιαστικά μικρότερη από την επιθυμητή, πρέπει να γίνει επέμβαση στα χαρακτηριστικά οδήγησης για να συνεχιστεί η επιτάχυνση. Η αλλαγή αυτή αναφέρεται ως «εναλλαγή», μια διαδικασία ανάλογη αυτής της αλλαγής ταχυτήτων σε ένα αυτοκίνητο.

Οι μέθοδοι εναλλαγής περιλαμβάνουν:

- **Σειριακή/Παράλληλη ή «Εναλλαγή κινητήρα»**, όπου αρχικά τα ζεύγη των κινητήρων συνδέονται σειριακά κατά μήκος της κύριας γεννήτριας, ενώ σε υψηλότερες ταχύτητες οι κινητήρες επανασυνδέονται παράλληλα κατά μήκος της κύριας γεννήτριας.
- **«Παραλληλισμός πεδίου», «εκτροπή πεδίου» ή «αποδυνάμωση πεδίου»**, όπου η αντίσταση συνδέεται παράλληλα με το πεδίο του κινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος σπλισμού, που παράγει μια αντίστοιχη αύξηση της ροπής του κινητήρα και της ταχύτητα.

Και οι δύο μέθοδοι μπορούν επίσης να συνδυαστούν, ώστε να έχουμε αύξηση του εύρους στροφών λειτουργίας.

- **Εναλλαγή γεννήτριας**, όπου η επανασύνδεση των δύο ξεχωριστών εσωτερικών περιελίξεων των στάτορων των κυρίων γεννητριών από παράλληλη σε σειριακή, αυξάνει την ισχύ στην έξοδο.

Σε παλαιότερες σιδηροδρομικές μηχανές, ήταν απαραίτητο για τον μηχανοδηγό να εκτελεί χειροκίνητα την εναλλαγή με την χρήση ενός ξεχωριστού χειριστηρίου. Ως βοήθεια για την εκτέλεση της εναλλαγής την σωστή χρονική στιγμή, ο μετρητής φορτίου ρυθμιζόταν έτσι ώστε να υποδεικνύει σε ποια σημεία προς τα εμπρός ή προς τα πίσω πρέπει να γίνει η εναλλαγή (ο μετρητής φορτίου είναι ένας δείκτης ο οποίος ενημερώνει τον μηχανοδηγό σχετικά με το πόσο ρεύμα απορροφιέται από τους κινητήρες

έλξης). Στην συνέχεια αναπτύχθηκε η αυτόματη εναλλαγή με σκοπό την καλύτερη απόδοση λειτουργίας και να προστατεύεται η κύρια γεννήτρια και οι κινητήρες έλξης αντικανονικές εναλλαγές.

Οι μοντέρνες σιδηροδρομικές μηχανές έχουν ενσωματωμένους εναλλακτήρες έλξης, από εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα, με την ικανότητα να παραδίδουν 1,200 V, ενώ οι παλαιότερες γεννήτριες έλξης, από συνεχές ρεύμα σε συνεχές ρεύμα, παρέδιδαν μόνο 600 V. Η βελτίωση αυτή επιτεύχθηκε σε μεγάλο βαθμό μέσω βελτιώσεων στην τεχνολογία διόδων πυριτίου. Με την ικανότητα να παραδίδει 1,200 V στους κινητήρες έλξης, η ανάγκη για «εναλλαγή» εξαλείφθηκε [15].

Βιβλιογραφία

Βιβλιογραφία

- 1) Κ. Δ. Ρακόπουλος (1988), «Αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης. Εισαγωγή–Λειτουργία–Θερμοδυναμική», Εκδόσεις «Γρηγ. Φούντας», Αθήνα.
- 2) Ε.Γ.Γιακουμής (2015), «Προδιαγραφές καυσαερίων και κύκλοι δοκιμής εμβολοφόρων ΜΕΚ», Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 3) Κ.Δ. Ρακόπουλος, Ε.Γ. Γιακουμής (2011) «Εναλλαγή αερίων και υπερπλήρωση ΜΕΚ», Εκδόσεις Γρ. Φούντας, Αθήνα.
- 4) H. I Andrews, "Railway Traction - The principles of mechanical and electrical railway traction", Elsevier, 1986
- 5) Φωτογραφία εξωφύλλου <http://wallpaper.com/wallpaper/locomotive-116641>
- 6) Ιστορική Αναδρομή <https://en.wikipedia.org/wiki/Locomotive>
- 7) Σιδηροδρομική Μηχανή Salamanca [https://en.wikipedia.org/wiki/Salamanca_\(locomotive\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Salamanca_(locomotive))
- 8) Σιδηροδρομική Μηχανή Puffing Billy [https://en.wikipedia.org/wiki/Puffing_Billy_\(locomotive\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Puffing_Billy_(locomotive))
- 9) Σχήμα Σιδηροδρομικής Ατμομηχανής <http://trumpetb.net/loco/locoworks.html>
- 10) Σχήμα Σιδηροδρομικής Μηχανής Βενζίνης http://www.irsociety.co.uk/Archives/35/Gas_Locos.htm
- 11) Σχήμα Σιδηροδρομικής Μηχανής diesel <http://www.angelfire.com/mi4/hungryeterbeek2/12eterbeek.html>

- 12) Κινητήρες Έλξης https://en.wikipedia.org/wiki/Traction_motor
- 13) Σχήματα Κινητήρων Έλξης <http://evolution.skf.com/solutions-for-drive-systems/>
- 14) Διάγραμμα Ηλεκτρικής Σιδηροδρομικής Μηχανής <http://www2.hesston.edu/Physics/electricloco/eleclocop.html>
- 15) Σιδηροδρομική Μηχανή diesel-electric https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_locomotive
- 16) Μετάδοση Ισχύος diesel-electric https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel-electric_transmission
- 17) Σχήμα Μοχλού Ελέγχου <http://www.kirara.co.uk/info/SD40%20-%20Operator's%20Manual/>
- 18) Σχήματα Δυναμικής Πέδησης <http://www.xbhp.com/talkies/coffee-lounge-off-topic/22652-intro-locomotives-steam-diesel-electric-electric-7.html>
- 19) Σχήμα Υβριδικής Σιδηροδρομικής Μηχανής General Electric <http://www.deskeng.com/de/comsol-multiphysics-models-hybrid-locomotive/>
- 20) Σχήμα Ατμο-diesel Υβριδικής Σιδηροδρομικής Μηχανής <http://www.2ndmoon.net/pmwiki.php?n=Main.Locomotive>
- 21) Σχήμα Σιδηροδρομικής Μηχανής GTEL <http://www.oil-electric.com/2012/03/big-bold-brash-ups-gtels.html>
- 22) Σχήμα Ηλεκτρικής Σιδηροδρομικής Μηχανής Κυψελών Καυσίμου <http://www.nature.com/news/2008/080827/full/4541036a/box/1.html>
- 23) Σχήμα Πυρηνικής-Ηλεκτρικής Σιδηροδρομικής Μηχανής <http://io9.com/the-days-of-atomic-locomotives-in-america-1564623650>
- 24) Σχήμα Σιδηροδρομικής Μηχανής Ελιγμών <https://en.wikipedia.org/wiki/Switcher>
- 25) Σχήμα Οδοντωτού Σιδηρόδρομου https://en.wikipedia.org/wiki/Rack_railway
- 26) Αμαξοστοιχίες Πολλαπλών Μονάδων (MU) https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple_unit
- 27) Σχήμα Επιβατικής Αμαξοστοιχίας MU http://www.4rail.net/reference_estonia_emus1.php

- 28) Σχήμα Συστήματος Ward-Leonard <http://industrialhistoryhk.org/peak-tram-ward-leonard-installed1926/>
- 29) Σχήμα Γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος σε Τομή
<http://www.ustudy.in/node/3235>
- 30) Κατασκευαστικό Διάγραμμα Γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος
<http://www.tpub.com/neets/book5/15i.htm>
- 31) Σύστημα Powerline και Κινητήρες της Εταιρείας MTU http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/white-papers/3100731_MTU_General_WhitePaper_Powerline_2014.pdf
- 32) Χαρακτηριστικά Κινητήρα 12V 1600 R50 της Εταιρείας MTU
<http://www.mtu-online.com/mtu/products/engine-program/diesel-engines-for-rail-traction/diesel-engines-for-push-pull-trains-and-locomotives/detail/product/4030/cHash/063e300017acd677a2d7b467ea987500/?L=llr%2525B4%2525E5mH%2525EA%2525D8d2>
- 33) Χαρακτηριστικά Κινητήρα 8V 4000 R41 της Εταιρείας MTU
<http://www.mtu-online.com/mtu/products/engine-program/diesel-engines-for-rail-traction/diesel-engines-for-push-pull-trains-and-locomotives/detail/product/393/cHash/334562ff784593a3ec73297beb90ccae/?L=llr%2525B4%2525E5mH%2525EA%2525D8d2>
- 34) Χαρακτηριστικά Κινητήρα 16V 4000 R41L της Εταιρείας MTU
<http://www.mtu-online.com/mtu/products/engine-program/diesel-engines-for-rail-traction/diesel-engines-for-push-pull-trains-and-locomotives/detail/product/400/cHash/fa166de7b1497ebabb13bad4ecd8ca/?L=llr%2525B4%2525E5mH%2525EA%2525D8d2>
- 35) Χαρακτηριστικά Κινητήρα 8V 4000 R43 της Εταιρείας MTU
<http://www.mtu-online.com/mtu/products/engine-program/diesel-engines-for-rail-traction/diesel-engines-for-push-pull-trains-and-locomotives/detail/product/404/cHash/5934943c60609d9902119f8b13a52b2f/?L=llr%2525B4%2525E5mH%2525EA%2525D8d2>
- 36) Χαρακτηριστικά Κινητήρα 20V 4000 R43L της Εταιρείας MTU
<http://www.mtu-online.com/mtu/products/engine-program/diesel-engines-for-rail-traction/diesel-engines-for-push-pull-trains-and-locomotives/detail/product/412/cHash/0ae5e4e00d64662e6b224c7e37374330/?L=llr%2525B4%2525E5mH%2525EA%2525D8d2>

- 37) Πρότυπο ISO 8178
<http://www.dieselnet.com/standards/cycles/iso8178.php>
- 38) Πρότυπα Κινητήρων Μη Οδικής Χρήσης
<http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#rail>
- 39) Σχήμα κινητήρα 4000 Rx4 της Εταιρείας [MTU](http://www.mtu-report.com/Technology/Research-Development/How-does-Exhaust-Gas-Recirculation-work) <http://www.mtu-report.com/Technology/Research-Development/How-does-Exhaust-Gas-Recirculation-work>
- 40) Κινητήρας της Εταιρείας [Cummins](http://cumminsengines.com/qsx15-tier-4-final?Filters=0&Categories=48&Metric=true#specifications) <http://cumminsengines.com/qsx15-tier-4-final?Filters=0&Categories=48&Metric=true#specifications>
- 41) Κινητήρες της Εταιρείας [CSR](http://www.csrgc.com.cn/g3787.aspx) <http://www.csrgc.com.cn/g3787.aspx>
- 42) Κινητήρες της Εταιρείας [MAN](http://www.engines.man.eu/global/en/off-road/rail/product-range/Product-Range.html)
<http://www.engines.man.eu/global/en/off-road/rail/product-range/Product-Range.html>
- 43) Κινητήρες της Εταιρείας [VOITH](http://resource.voith.com/vt/publications/downloads/1915_e_g_2262_e_motor_2012-11_screen.pdf)
http://resource.voith.com/vt/publications/downloads/1915_e_g_2262_e_motor_2012-11_screen.pdf
- 44) Κινητήρες της Εταιρείας [VOITH](http://www.voith.com/en/products-services/power-transmission/diesel-engines-10070.html) <http://www.voith.com/en/products-services/power-transmission/diesel-engines-10070.html>

