

CALCULE SPECIFICE DE PROIECTARE A PARAMETRILOR LOCOMOTIVELOR ELECTRICE DE CURENT CONTINUU

SPECIFIC CALCULATIONS FOR DESIGNING THE PARAMETERS OF ELECTRIC DIRECT CURRENT LOCOMOTIVES

George DUMITRU¹, Mihaela Mirela MĂNTEȘCU AMROLLAHI², Elisabeta CRĂCIUN
BOJE³, Mirel UNGUREANU⁴, Radu Teodor COSTACHE⁵, Silviu BĂDĂRĂU⁶

¹Autoritatea de Siguranță Feroviară Română - ASFR, Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România, e_mail autor: George DUMITRU: george.dumitru.cfr@gmail.com;

²Autoritatea Feroviară Română - AFER, str. „Calea Griviței”, nr. 393, sectorul 1, București, România, e_mail autor: Mihaela Mirela MĂNTEȘCU AMROLLAHI: mirelamantescu@yahoo.com.

³Autoritatea de Siguranță Feroviară Română - ASFR, str. „Calea Griviței”, nr. 393, sectorul 1, București, România, e_mail autor: Elisabeta CRĂCIUN BOJE: elisabetacraciunboje@gmail.com.

⁴Deutsche Bahn Cargo România SRL, str. „Sergent Nuțu Ion”, nr. 44, clădirea „One Cotroceni Park Office”, corpul A, etajul 6, CP 050762, sectorul 5, București, România, e_mail autor: Mirel UNGUREANU: Mirel.Ungureanu@deutschebahn.com;

⁵Rail Cargo Carrier România SRL, str. „Calea Plevnei”, nr. 159, sectorul 6, București, România, e_mail Radu Teodor COSTACHE: radu.teodor.costache@gmail.com;

⁶Autoritatea Feroviară Română - AFER, str. „Calea Griviței”, nr. 393, sectorul 1, București, România, e_mail autor: Silviu BĂDĂRĂU: silviu.badarau95@gmail.com.

Rezumat: În prezentul studiu, am considerat locomotiva electrică norvegiană clasa El 15 (BR 161), produsă de consorțiul ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) la uzinele din Västerås, Suedia, având puterea instalată de 5400 [kW] și formula osiilor Co'Co', cu motoare electrice de tracțiune de curent continuu (cc) și antrenare individuală a celor șase osii motoare, care efectuează mișcări de manevră izolată, pe porțiuni de linie cu declivități nenule și curbe, supusă consecutiv regimurilor de accelerare și frânare pentru oprire la punct fix.

Cuvinte cheie: tensiune electrică, curent continuu, excitație serie, tracțiune, accelerare, frânare dinamică, șuntări, reostatic, motor, generator, cuplu rezistent, drum de frânare, declivitate.

Abstract: In the present study, we considered the Norwegian electric locomotive class El 15 (BR 161), produced by the ASEA consortium (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) at the plants in Västerås, Sweden, with an installed power of 5400 [kW] and the Co'Co' axle formula, with direct current (cc) electric traction motors and individual drive of the six driving axles, which performs isolated maneuvering movements, on sections of line with non-zero gradients and curves, subjected consecutively to acceleration and braking regimes for stopping at a fixed point.

Keywords: electric voltage, direct current, series excitation, traction, acceleration, dynamic braking, shunting, rheostat, motor, generator, resistive torque, braking distance, slope declivity.

1. INTRODUCERE

Locomotiva electrică norvegiană clasa BR 161, seria El 15, cu puterea de 5400 [kW] a fost construită în anul 1967 de consorțiul ASEA, în număr de șase unități, având următoarele

caracteristici constructive: formula osiilor UIC: Co'Co'; ecartamentul: 1435 [mm]; lungimea peste tampon: 19800 [mm]; sarcina dinamică verticală totală: 132 [t]. Aceste locomotive sunt alimentate la o rețea aeriană catenară de curent alternativ cu tensiunea electrică: 15 [kV]; cu frecvența industrială de 16,7 [Hz], ating o viteză maximă de 120 [km/h] și dezvoltă o putere instalată de 5400 [kW], cu un efort dinamic longitudinal de tracțiune la cârlig de 420 [kN]. Locomotiva electrică din clasa EL 15 a fost construită inițial pentru Căile Ferate de Stat Norvegiene (NSB) în anul 1967 pentru a înlocui locomotivele din clasele El 3 El 4 de pe linia Ofoten și ulterior, a fost utilizată în exploatare pentru remorcarea trenurilor de marfă ale operatorului de transport feroviar norvegian Grenland Rail, locomotivele fiind numerotate de la El 15.101 până la El 15.106. Atunci când locomotivele El 15 au fost livrate în anul 1967, unitățile din clasa El 3 și din clasa El 4 au fost scoase din funcțiune. Niciuna dintre aceste locomotive nu a fost păstrată. Un motor electric de tracțiune al uneia dintre aceste clase de locomotive respectiv 42046, este îngropat sub pietriș și sol sub calea ferată de lângă Katterat, unde a ajuns în urma unei deraieri produse în anul 1959. Ploile abundente au provocat inundații care au deripat linia în Sørddalen, iar locomotiva nr. 42046, care remorca un tren de intervenție (care transporta șine de cale), a deraiat după ce terasamentul liniei s-a colapsat și locomotiva s-a răsturnat. Piesele utilizabile au fost scoase din motor înainte ca acesta să fie îngropat la refacerea ulterioară a terasamentului.

Motorul electric de tracțiune care dotează locomotivele electrice norvegiene din clasa NSB El 15 a fost cel mai puternic motor pe care NSB l-a avut vreodată. După electrificarea liniei Ofotbanen în anul 1923, NSB a folosit începând din anul 1960, locomotive din clasa El 12 în paralel cu achiziția locomotivei suedeze clasa Dm3. Dar, spre deosebire de căile ferate de stat suedeze (SJ - Statens Järnvägar), NSB a ales să cumpere în schimb o locomotivă cu tehnologie mai nouă de la firma ASEA, bazată pe proiectul românesc al locomotivei electrice seria 060 EA de la CFR. Locomotivele au fost numerotate de la 15.2191, până la 15.2196. În anul 1996, remorcarea trenurilor de marfă grele care transportau minereu a fost preluată de compania subsidiară Malmtrafik, deținută de operatorii de transport feroviar NSB, SJ și LKAB (proprietarul minelor). Noua companie a comandat 18 locomotive IORE noi de la Bombardier, iar în 2004 locomotivele vechi au fost vândute operatorului de transport feroviar Hector Rail. După livrările locomotivelor către consorțiul Hector Rail în anul 2019, acestea au fost scoase din funcțiune și au fost vândute companiei norvegiene Grenland Rail în anul 2020, unde au fost vopsite în albastru închis și reclassificate ca El 15.

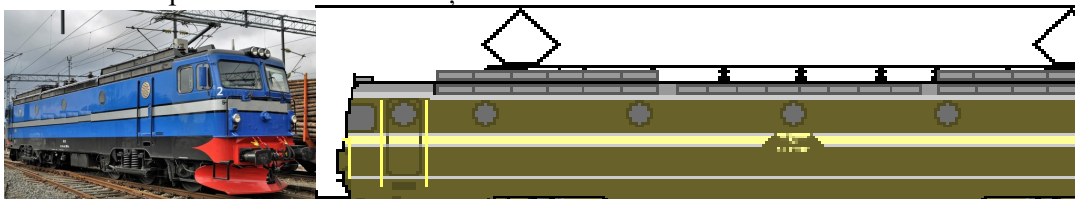


Fig. 1. Imaginea și schema locomotivei electrice norvegiene clasa El 15 (BR 161), ASEA, cu puterea de 5400 [kW] și formulă osii Co'Co'

2. CALCULUL PARAMETRILOR DE PROIECTARE REPREZENTATIVI AI LOCOMOTIVEI

În conformitate cu a doua lege *Newton*, forța dinamică de accelerare F_a a locomotivei reprezintă rezultanta compunerii forței de tracțiune F_t dezvoltată de motoarele electrice de tracțiune (met) pentru antrenarea independentă a osiilor motoare, a forțelor de rezistență care se opun înaintării locomotivei ΣF_r și a forței de frânare mecanică F_{fm} .

CALCULE SPECIFICE DE PROIECTARE A PARAMETRILOR
LOCOMOTIVELOR ELECTRICE DE CURENT CONTINUU

$$\vec{F}_a = \vec{F}_t - (\sum \vec{F}_r + \vec{F}_{fm}) \quad [\text{N}] \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_a = m_r \cdot \vec{a} = m_r \cdot \frac{d(\vec{v})}{dt} \quad [\text{N}] \quad \Rightarrow \quad (1)$$

$$\Rightarrow \quad m_r = m_n + m_{rot} \quad [\text{kg}] \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_t = \vec{F}_a = m_r \cdot \vec{a} \quad [\text{N}] \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_t = \vec{F}_a > \sum \vec{F}_r \quad (2)$$

$$\Rightarrow \quad \vec{F}_t = \sum \vec{F}_r \quad (3)$$

$$\text{Dacă: } \vec{F}_{fm} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_a = -\sum \vec{F}_r \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_a = -\vec{F}_t - \sum \vec{F}_r - \vec{F}_{fm} \quad [\text{N}] \quad \Rightarrow \quad (4)$$

$$\Rightarrow \quad m_{rot} = \gamma \cdot m_n \quad [\text{kg}] \quad \Rightarrow \quad m_r = m_n + \gamma \cdot m_n = (1 + \gamma) \cdot m_n \quad [\text{kg}] \quad (5)$$

De reținut este faptul că în cazul locomotivelor electrice cu șase osii motoare:

$$(1 + \gamma) = 1,2 \div 1,4 \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_t - (\sum \vec{F}_r + \vec{F}_{fm}) = (1 + \gamma) \cdot m_n \cdot \frac{d(\vec{v})}{dt} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

$$\text{De asemenea: } T_f = \mu \cdot G_f \quad [\text{N}] \quad \text{iar: } M_f = T_f \cdot \frac{d}{2} \quad \Rightarrow \quad (7)$$

$$\Rightarrow \quad M_f = \mu \cdot G_f \cdot \frac{d}{2} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad \Rightarrow \quad F_{rp1} \cdot \frac{D}{2} = \mu \cdot G_f \cdot \frac{d}{2} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (8)$$

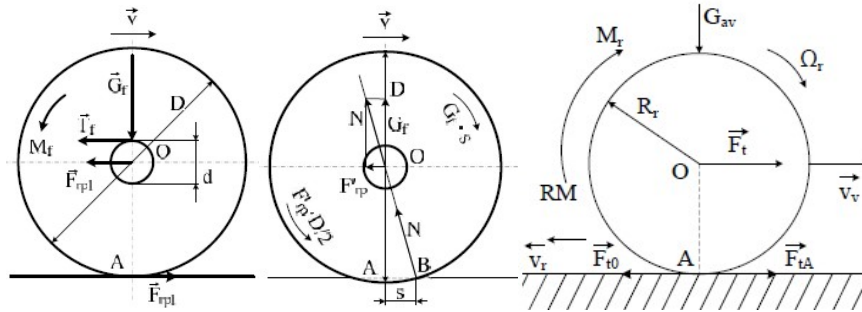


Fig. 2. Schema forțelor și reacțiunilor la nivelul lagărelor cu rostogolire și alunecare din cutia de osie a locomotivei date, având referențialul inerțial al căii de rulare.

$$\text{Dacă: } G = m_n \cdot g \quad \Rightarrow \quad F_{rp1} \cdot \frac{D}{2} = \mu \cdot G_f \cdot \frac{d}{2} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad \Rightarrow \quad (9)$$

$$\Rightarrow \quad F_{rp1} = \mu \cdot \frac{d}{D} \cdot m_n \cdot g \quad [\text{N}] \quad \Rightarrow \quad F_{rp1} \approx 0,001 \cdot m_n \cdot g \quad [\text{N}] \quad (10)$$

$$\text{unde: } \mu \approx 0,01 \quad \Rightarrow \quad G_f \cdot s = F'_{rp} \cdot \frac{D}{2} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad \Rightarrow \quad (11)$$

$$\Rightarrow \quad F'_{rp} = \frac{2 \cdot s \cdot G_f}{D} \quad [\text{N}] \quad \Rightarrow \quad F_{rp2} = \frac{2 \cdot s}{D} \cdot m_n \cdot g \quad [\text{N}] \quad \Rightarrow \quad (12)$$

$$\Rightarrow \quad F_{rp2} = (2 \div 4) \cdot 10^{-4} \cdot m_n \cdot g \quad [\text{N}] \quad (13)$$

$$\text{unde: } S = (0,01 \div 0,2) \quad [\text{mm}] \quad \text{și} \quad D = 1250 \quad [\text{mm}] \quad \text{iar} \quad m_L = 120 \quad [\text{t}] \quad \Rightarrow \quad (14)$$

$$\Rightarrow \quad f_{rp} = 1,5 + 0,011 \cdot v + 0,00025 \cdot v^2 \quad [\text{N/kN}] \quad \Rightarrow \quad (15)$$

$$\Rightarrow \quad f_{rp} = (0,6 \div 1,5) + (0,007 \div 0,022) \cdot \frac{v}{10} + (0,0125 \div 0,017) \cdot \left(\frac{v}{10}\right)^2 \quad [\text{N/kN}] \quad \Rightarrow \quad (16)$$

$$\text{Dacă: } \alpha \ll 1 \Rightarrow \operatorname{tg} \alpha = \sin \alpha \Rightarrow i \cong 1000 \cdot \sin \alpha \quad [\text{‰}] \Rightarrow \quad (17)$$

$$\Rightarrow i = 1000 \frac{h_B - h_A}{AB} = 1000 \cdot \frac{h}{AB} \cong 1000 \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad [\text{‰}] \Rightarrow \quad (18)$$

$$\Rightarrow F_{rs1} = m_r \cdot g \cdot i \quad [\text{N}] \Rightarrow f_{rs1} = \frac{F_{rs1}}{m_r \cdot g} = \pm 1000 \cdot \operatorname{tg} \alpha = \pm i \quad [\text{‰}], [\text{N/kN}] \Rightarrow \quad (19)$$

$$\Rightarrow \bar{F}_{rs2} = m_r \cdot g \cdot \frac{k_1}{R - k_2} \quad [\text{N}] \Rightarrow f_{rs2} = \frac{F_{rs2}}{m_r \cdot g} = \frac{k_1}{R - k_2} \quad [\text{N/kN}] \Rightarrow \quad (20)$$

$$\Rightarrow f_r = (f_{rp} \pm i + f_{rs2}) \quad [\text{N/kN}] \quad (21)$$

unde: α reprezintă unghiul declivității; F_{rp1} reprezintă forțele de rezistență cauzate de frecările din lagărele osiilor; F_{rp2} sunt forțele de rezistență cauzate de rostogolirea roții pe șină; F_{rp3} sunt forțele de rezistență cauzate de alunecările dintre roată și calea de rulare; F_{rp4} reprezintă forțele de rezistență cauzate de șocurile care se produc între roată și calea de rulare; F_{rp5} sunt forțele de rezistență la înaintare a locomotivei, cauzate de aerul dislocat în timpul deplasării; m_L reprezintă masa locomotivei; F_{rs1} sunt forțele de rezistență la înaintare a locomotivei, cauzate de declivitatea i [‰]; F_{rs2} sunt forțele de rezistență la înaintare a locomotivei, cauzate de curbele căii de rulare; f_r reprezintă forța de rezistență totală; D este diametrul roții locomotivei pe cercul nominal de rulare; i_r este raportul de transmitere al angrenajului dintre pinionul de atac și roata dințată calată pe osie prin fretare la cald; η_r este randamentul reductorului semisuspendat al locomotivei; F_{fm} reprezintă forța de frânare mecanică; F_t este forța de tracțiune la cârlig a locomotivei; P reprezintă puterea motorului electric de tracțiune (met) semisuspendat, de curent continuu al locomotivei; M_m este cuplul motor; M_r este cuplul rezistent al met; F_{tA} reprezintă forța de tracțiune la obada locomotivei, denumită și forță de aderență; v_r este viteza ipotetică de deplasare înapoi a șinei de cale la demararea locomotivei; Ω_r este viteza unghiulară a roții care în regim staționar este constantă, adică:

$$\text{Dacă: } \Omega_r = \text{const.} \Rightarrow d\Omega_r/dt = 0 \quad [\text{s}^{-1}] \quad (22)$$

În absența cuplului motor M_m , viteza unghiulară a osiei se determină cu expresia următoare:

$$\Omega_r = \Omega_m / i_r \quad [\text{s}^{-1}] \quad (23)$$

Dacă în activitatea de manevră cu locomotiva izolată, după punerea în mișcare, este necesară dezvoltarea unei accelerații $a=1$ [m/s²] pentru atingerea vitezei de 26 [km/h], în condițiile în care se consideră că declivitatea porțiunii de cale ferată a liniei este $i=70$ ‰, și este necesar ca locomotiva să învingă o forță de rezistență specifică principală la înaintare $f_{rp}=20$ [N/t], atunci calculul puterii și al turației met necesare, se efectuează conform raționamentului următor, considerând de asemenea că $D=2 \cdot R_r$; $i_r=1,41$; $\eta_r=0,9$:

$$\text{Dacă: } \begin{cases} F_{fm}=0 \\ f_{rs2}=0 \end{cases} \Rightarrow F_t = (1 + \gamma) \cdot m_r \cdot a + (f_{rp} + i) \cdot m_r \Rightarrow \quad (24)$$

$$\Rightarrow F_t = 13027 + 13227 [\text{N}] \quad (25)$$

$$\text{De asemenea, dacă: } (1 + \gamma) = 1,15 \quad \text{și} \quad F_t = 13,227 [\text{N}] \Rightarrow \quad (24)$$

$$\Rightarrow P = \frac{F_t \cdot v_{\max}}{\eta_r} = 106109 [\text{W}] \Rightarrow P \cong 106,1 [\text{kW}] \quad (25)$$

CALCULE SPECIFICE DE PROIECTARE A PARAMETRILOR
LOCOMOTIVELOR ELECTRICE DE CURENT CONTINUU

$$\text{Dar: } v_{\max} = 26 \text{ km/h} = 26000/3600 = 7,22 \text{ [m/s]} \Rightarrow \quad (26)$$

$$\Rightarrow n_{\text{mot}} = i_r \cdot n_{\text{roată}} = i_r \cdot \frac{60 \cdot v_{\max}}{2 \cdot \pi \cdot R_r} = 19,11 \cdot i_r \cdot \frac{v_{\max}}{D} \text{ [rot/min]} \Rightarrow \quad (27)$$

$$\Rightarrow n_{\text{mot}} = 19,11 \cdot 11,41 \cdot \frac{7,22}{1,07} = 1471 \text{ [rot/min]} \Rightarrow \quad (28)$$

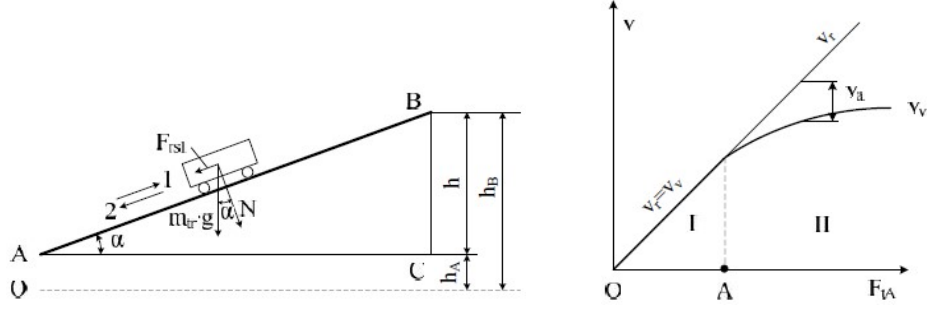


Fig. 3. Schematizarea circulației locomotivei pe o porțiune de linie cu declivitate și diagrama de variație a vitezei de alunecare a locomotivei.

Conform legii a treia *Newton*, forța de tracțiune la obada roții locomotivei denumită în continuare forță de aderență, se determină astfel:

$$\text{Dacă: } \frac{d\Omega_r}{dt} = 0 \text{ [s}^{-1}] \Rightarrow F_{r0} = \frac{M_r}{R_r} \text{ [N]} \Rightarrow \vec{F}_{td} = -\vec{F}_{r0} \text{ [N]} \Rightarrow \quad (29)$$

$$\Rightarrow \vec{F}_t = \vec{F}_{td} \text{ [N]} \quad (30)$$

$$\text{De asemenea, dacă: } \frac{d\Omega_r}{dt} \neq 0 \Rightarrow \vec{F}_t \neq \vec{F}_{td} \Rightarrow \quad (31)$$

$$\Rightarrow \vec{F}_t - \vec{F}_{td} = \frac{J_\Sigma \cdot d\Omega}{R_r \cdot dt} \text{ [N]} \Rightarrow \vec{F}_t \leq \vec{F}_{td\max} \text{ [N]} \quad (32)$$

$$\text{Dacă: } \vec{F}_{td} \geq \vec{F}_{td\max} \Rightarrow v_a = v_r - v_v \text{ [m/s]} \Rightarrow F_{td\max} = 1000 \cdot \varphi \cdot G_{av} \text{ [N]} \Rightarrow \quad (33)$$

$$\Rightarrow \varphi = \frac{F_{td\max}}{G_{av}} \text{ [N/kN]} \Rightarrow \varphi = \frac{\varphi_0}{1 + 0,01 \cdot v_v} \quad (34)$$

unde: J_Σ reprezintă momentul total de inerție al structurilor aflate în mișcare de rotație ale locomotivei considerate, în funcție de care se determină cuplul dinamic al unei osii motoare; φ este coeficientul de aderență; G_{av} reprezintă greutatea de aderență a locomotivei date; F_t este forța de tracțiune a locomotivei date; v_v este viteza liniară a locomotivei; P_0 este puterea mecanică la obada roții, în funcție de viteza liniară v_v de deplasare a locomotivei.

Pentru a evita alunecarea și ruperea aderenței este necesar să se aleagă un astfel de motor, ale cărui putere, turație și cuplu să conducă la satisfacerea condiției date de expresia următoare:

$$F_{t\max} \leq F_{td\max} = \varphi \cdot G_{av} \text{ [N]} \quad (35)$$

Principalele caracteristici ale motorul electric de tracțiune de curent continuu cu excitație serie al locomotivei date, sunt constituite de caracteristica de magnetizare, la mersul în gol, adică dependența fluxului magnetic Φ , de curentul electric de excitație definit de intensitatea I_e și tensiunea U_e , caracteristica electromagnetică, adică dependența cuplului electromagnetic M_m , de curentul electric al indusului I_i , caracteristicile electromecanice la arborele motorului precum dependența turației n a met de curentul electric al indusului I_i la

diferite sarcini, dependența puterii utile P la arborele met de curentul electric al indusului I_i la diferite sarcini, dependența randamentului η de curentul indusului I_i , adică:

$$\begin{cases} \Phi = f(I_e) \\ U_e = f(I_e) \\ M_m = f(I_i) \\ n = f(I_i) \\ P = f(I_i) \\ \eta = f(I_i) \end{cases} \quad (36)$$

Se reține faptul că atât în calculele deterministe cât și la trasarea diagramelor, cu 1 s-a notat caracteristica mecanică naturală, cu 2 și 3 s-au notat caracteristicile mecanice artificiale obținute prin inserierea unui reostat în circuitul indusului, iar cu 4 s-a notat caracteristica mecanică artificială obținută prin slăbire de câmp (adică, șuntarea prin conectarea unui reostat în circuit paralel cu înfășurarea de excitație serie).

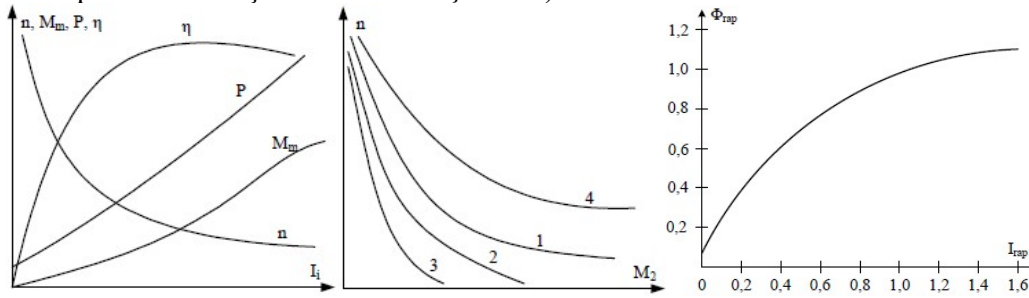


Fig. 4. Diagrame de variație ale caracteristicilor de funcționare (electromagnetice și electromecanice) pentru met de cc cu excitație serie, ale caracteristicilor mecanice ale met de cc cu excitație serie și ale caracteristicii de magnetizare.

Calculul caracteristicilor de tracțiune și de frânare ale locomotivei electrice considerate, depinde de caracteristicile motorului electric de tracțiune (met) de curent continuu (cc), cu excitație serie sau cu excitație mixtă, excitația serie fiind predominantă, aceste caracteristici fiind de natură neliniară, din cauza neliniarității caracteristicii de magnetizare, adică:

$$\Phi = f(I_e) \Rightarrow \Phi_{rap} = \Phi / \Phi_n, I_{rap} = I_i / I_{in} \Rightarrow \Phi_{rap} = f(I_{rap}) \quad (37)$$

Pentru determinarea caracteristicii de magnetizare a motorului de curent continuu cu excitație serie într-un interval de curent electric relativ având intensitatea $I_{rap} = (0,3 \div 2)$ [A] și trasarea diagramei asociate, se utilizează funcții polinomiale de gradul 5, cu coeficienți constanți și precizie de sub 5%, prin rezolvarea următoarei ecuații de calcul aproximativ

$$\Phi_{rap}(I_{rap}) = 0,03 \cdot I_{rap}^5 - 0,37 \cdot I_{rap}^4 + 1,39 \cdot I_{rap}^3 - 2,57 \cdot I_{rap}^2 + 2,56 \cdot I_{rap} - 0,1 \quad (38)$$

La funcționarea în regim staționar a met de cc cu excitație serie, ecuațiile care definesc regimul de funcționare al acestui tip de mașină electrică rotativă, sunt următoarele:

$$\begin{cases} U = U_e + R \cdot I_i \quad [\text{V}] \\ U_e = k_e \cdot n \cdot \Phi(I_i) \quad [\text{V}] \\ M_m = k_m \cdot \Phi(I_i) \cdot I_i \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \end{cases} \quad (39)$$

unde: U este tensiunea de alimentare; U_e este tensiunea electromotoare indusă; R [Ω] este rezistența totală care însumează rezistența înfășurării indusului și rezistențele înseriate cu aceasta din circuitul indusului motorului de curent continuu; M_m este cuplul electromagnetic al met; n [rot/min] este turația; $\Phi(I_i)$ [Wb] reprezintă variația fluxului magnetic de excitație în funcție de intensitatea I_e [A] a curentului electric de excitație, care este aceeași cu intensitatea

CALCULE SPECIFICE DE PROIECTARE A PARAMETRILOR
LOCOMOTIVELOR ELECTRICE DE CURENT CONTINUU

curentului electric al indusului $I_i = I_e$ [A] (conform caracteristicii de magnetizare); k_e și k_m sunt constantele mașinii electrice rotative; p este numărul perechilor de poli; a este numărul căilor de curent (paralele ale înfășurării indusului), N reprezintă numărul de conductoare electrice ale înfășurării indusului.

$$\text{De asemenea, dacă: } I_i = I_e \quad \text{și} \quad \begin{cases} k_e = p \cdot n / 60 \cdot a \\ k_m = p \cdot N / 60 \cdot a \cdot 2\pi \end{cases} \Rightarrow \quad (40)$$

$$\Rightarrow \quad n(I_i) = \frac{U - I_i \cdot R}{k_m \cdot \Phi_n \cdot \Phi(I_{rap})} \cdot \frac{30}{\pi} \Rightarrow \quad v_v(I_{rap}) = \frac{\pi \cdot D \cdot 3,6}{60 \cdot i_r} \cdot n = k_r \cdot n \quad [\text{km/h}] \Rightarrow \quad (41)$$

$$\Rightarrow \quad M_2(I_{rap}) = k_m \cdot \Phi_n \cdot \Phi(I_{rap}) \cdot I_i \cdot \eta(I_{rap}) \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \Rightarrow \quad (42)$$

$$\Rightarrow \quad F_{td}(I_{rap}) = \frac{M_2(I_{rap}) \cdot i_r \cdot \eta_r}{R_r} \quad [\text{N}] \Rightarrow \quad F_{td}(v_v) = F_t(v_v) \quad (43)$$

$$\text{Dacă: } \begin{cases} F_a = F_{amax} \\ F_t = F_{tmax} \end{cases} \Rightarrow \quad P_o = M_2 \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} = F_t \cdot v_v = F_{tmax} \cdot v_v \quad [\text{W}] \Rightarrow \quad (44)$$

$$\Rightarrow \quad P_o = P_{on} = F_t \cdot v_v = \text{const.} \quad [\text{W}] \quad (45)$$

unde: F_{amax} reprezintă forța de accelerație a locomotivei; F_{tmax} este forța de tracțiune maximă; P_o este puterea la obada osiei locomotivei considerate.

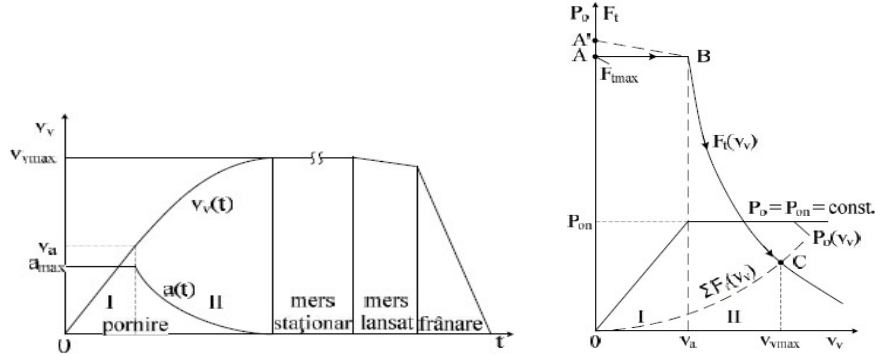


Fig. 5. Diagramele de variație ale vitezei la mers uniform în aliniament și palier, în funcție de timp și ale variației forței de tracțiune și respectiv ale puterii locomotivei în funcție de viteză.

Pentru determinarea forței de frânare mecanică P , se ține cont de coeficientul de frecare μ dintre sabotul de frână și suprafața de rulare a roții.

$$F_\mu = \mu \cdot P \quad [\text{N}] \Rightarrow \quad M_{F\mu} = 2 \cdot F_\mu \cdot R_r = 2 \cdot \mu \cdot P \cdot R_r \quad [\text{Nm}] \Rightarrow \quad (46)$$

$$\Rightarrow \quad M_{F_{fm}} = F_{fm} \cdot R_r \quad [\text{Nm}] \Rightarrow \quad F_{fm} = \frac{2 \cdot \mu \cdot P \cdot R_r}{R_r} = 2 \cdot \mu \cdot P \quad [\text{N}] \Rightarrow \quad (47)$$

$$\Rightarrow \quad F_{fm} = \frac{\mu \cdot P \cdot d}{2 \cdot R_r} = \frac{\mu \cdot P \cdot d}{D} \quad [\text{N}] \quad (48)$$

unde: F_μ reprezintă forța de frecare; $M_{F\mu}$ este cuplul de frecare, orientat în sens invers sensului de rotație al roții; M_{Fm} este cuplul care înlocuiește cuplul de frecare și este determinat de alte două forțe de frânare mecanică F_{fm} , egale și de sens contrar, una aplicată în centrul de rotație, având sensul opus sensului vitezei v_v liniare de deplasare a locomotivei.

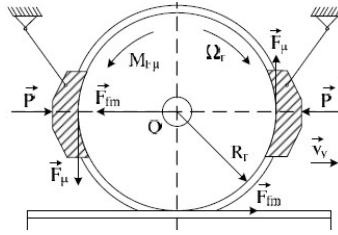


Fig. 6. Schema simplificată a sistemului de frânare mecanică a osiei cu saboți.

Efectuarea frânării reostatice în cazul utilizării motoarelor de curent continuu cu excitație serie, se realizează prin trecerea acestora în regim de generator prin deconectarea met de la sursa de alimentare, conectându-se concomitent în serie cu indusul înfășurarea de excitație și reostatul de frânare, mașina electrică rotativă de curent continuu funcționând în continuare în acest caz, în regim de generator de curent continuu (Gcc) cu excitație serie, sau prin deconectarea de la sursa de alimentare, conectându-se concomitent în serie cu indusul, reostatul de frânare, iar înfășurarea de excitație rămânând alimentată de la o sursă de curent continuu auxiliară, mașina electrică rotativă de curent continuu funcționând în continuare în acest caz, în regim de generator de curent continuu cu excitație separată sau derivație.

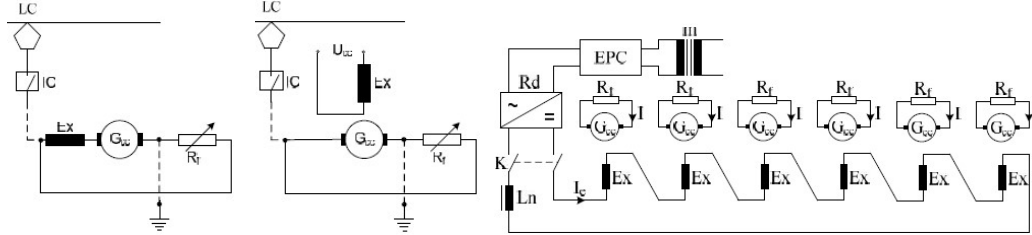


Fig. 7. Schemele simplificate ale sistemului de frânare reostatică a met funcționând în regim de Gcc autoexcitat, cu excitație serie și în regim de Gcc cu excitație separată (în derivație), și respectiv schema circuitului de frânare electrică reostatică.

Se reține că reostatul locomotivei se realizează de regulă cu ploturi, astfel încât reducerea vitezei de circulație a vehiculului motor considerat să se poată realiza în trepte, fără smucituri produse de cupluri mari, utilizând diode în circuitul electric al Gcc, de natură să împiedice apariția unui curent electric de circulație între două generatoare consecutive, precum și prin încrucișarea excitațiilor, de natură să conducă la o funcționare stabilă a mașinilor electrice rotative care funcționează în regim de generator.

Pentru determinarea drumului de frânare al locomotivei izolate date, se consideră constant coeficientul de frecare la frânare și dependent de condițiile de circulație.

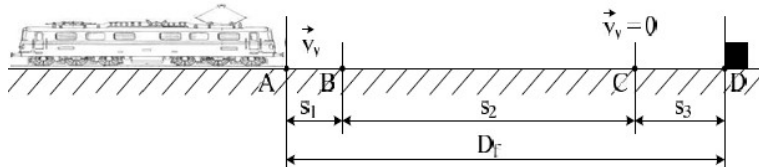


Fig. 8. Schema simplificată de calcul pentru drumul de frânare a locomotivei izolate considerate.

În cazul frânării pentru oprirea locomotivei la punct fix, este necesară cunoașterea distanței totale de frânare $D_f = s_1 + s_2 + s_3$, care se poate determina și din expresia energiei cinetice a locomotivei:

$$E_c = m \cdot v^2 / 2 \quad \Rightarrow \quad D_f = \frac{v}{5} + \frac{v^2}{100} + (5 \div 10) \quad [\text{m}] \quad (49)$$

Frânarea electrică a locomotivei este posibilă prin trecerea fiecărui motor în regim de generator cu excitație separată, care debitează curent electric pe rezistențele de frânare, fiind

astfel o frânare de tip reostatic (dinamică), iar excitațiile celor șase motoare sunt conectate în serie și sunt alimentate prin intermediul unui redresor de la una dintre înfășurările secundare ale transformatorului principal de tracțiune. De asemenea, reglarea cuplului de frânare M_f se face prin modificarea curentului electric de excitație, cu ajutorul graduatorului, iar pentru trasarea diagramelor caracteristice de frânare, se vor determina ecuațiile pentru circuitul indusului în regim de generator de curent continuu cu excitație separată. Totodată, prin explicitarea fluxului magnetic și al curentului electric, rezultă valoarea cuplului de frânare M_f .

$$\begin{cases} U_e = k_e \cdot n \cdot \Phi(I_e) \text{ [V]} \\ M_f = k_m \cdot \Phi(I_e) \cdot I \text{ [N}\cdot\text{m]} \\ U_e = (r + R_f) \cdot I \text{ [V]} \end{cases} \Rightarrow M_f = \frac{k_e \cdot k_m \cdot \Phi^2(I_e) \cdot n}{r + R_f} \text{ [N}\cdot\text{m]} \Rightarrow \quad (50)$$

$$\Rightarrow M_f = \frac{k_m \cdot (r + R_f) \cdot I^2}{k_e \cdot n} \text{ [N}\cdot\text{m]} \quad (51)$$

unde: k_e și k_m sunt constante ale generatorului de curent continuu; n reprezintă turația rotorului met; $\Phi(I_e)$ este fluxul de excitație, determinat de intensitatea I_e a curentului electric de excitație; I este curentul electric prin indusul generatorului; r este rezistența indusului; R_f reprezintă rezistența de frânare din circuitul generatorului de curent continuu cu excitație separată.

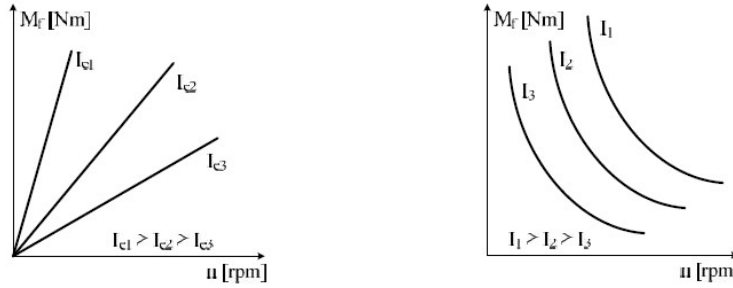


Fig. 9. Diagramele de variație ale caracteristicilor de frânare la flux constant și respectiv la curent electric constant al indusului.

Se reține că la flux de excitație constant $\Phi(I_e)=const.$, rezultă caracteristicile de frânare $M_f=f(n)$ care sunt drepte, a căror înclinație reprezintă funcții de dependență de valoarea intensității curentului electric I_e de excitație, având punctul de pornire în originea axelor de coordonate rectangulare ortogonale ale referențialului stabilit, iar la curent electric constant al indusului, rezultă caracteristicile de frânare $M_f=f(n)$, care sunt hiperbole echilatre, a căror depărtare de originea axelor referențialului rectangular ortogonal ales, variază în funcție de valoarea intensității I a curentului electric al indusului.

3. CONCLUZII

Principalele caracteristici ale motorul electric de tracțiune de curent continuu cu excitație serie al locomotivei electrice clasa BR 161, seria El 15 ASEA, sunt reprezentate de dependența fluxului magnetic Φ de curentul electric de excitație definit de intensitatea I_e și tensiunea U_e , de dependența cuplului electromagnetic M_m de curentul electric al indusului I_i , caracteristicile electromecanice la arborele met (motorului electric de tracțiune pentru antrenarea individuală a osiei motoare), de dependența turației n a met de curentul electric al indusului I_i la diferite sarcini, de dependența puterii utile P la arborele met de curentul electric al indusului I_i la diferite sarcini, precum și de dependența randamentului η de curentul indusului I_i .

Calculul caracteristicilor de tracțiune și de frânare ale locomotivei electrice considerate, depinde de caracteristicile motorului electric de tracțiune (met) de curent continuu (cc), cu excitație serie sau cu excitație mixtă, excitația serie fiind predominantă, aceste caracteristici fiind de natură neliniară, din cauza neliniarității caracteristicii de magnetizare, iar pentru determinarea caracteristicii de magnetizare a motorului de curent continuu cu excitație serie într-un interval de curent electric relativ având intensitatea $I_{rap}=(0,3\div 2)$ [A] și trasarea diagramei asociate, se utilizează funcții polinomiale de gradul 5, cu coeficienți constanți și precizie de sub sub 5%. Totodată, pentru determinarea forței de frânare mecanică P , se ține cont de coeficientul de frecare μ dintre sabotul de frână și suprafața de rulare a roții.

În cazul utilizării mașinilor electrice rotative de curent continuu cu excitație serie, efectuarea frânării electrice reostatice se realizează prin trecerea acestora în regim de generator prin deconectarea met de la sursa de alimentare, conectându-se concomitent în serie cu indusul înfășurarea de excitație și reostatul de frânare, mașina electrică rotativă de curent continuu funcționând în continuare în acest caz, în regim de generator de curent continuu (Gcc) cu excitație serie, sau prin deconectarea de la sursa de alimentare, conectându-se concomitent în serie cu indusul, reostatul de frânare, iar înfășurarea de excitație rămânând alimentată de la o sursă de curent continuu auxiliară, mașina electrică rotativă de curent continuu funcționând în continuare în acest caz, în regim de generator de curent continuu cu excitație separată sau derivație.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Voinea R., Voiculescu D., Ceașu V., „Mecanică“, E.D.P., București 1975.
- [2] Sebeșan Ioan, Mazilu Traian, „Vibrațiile vehiculelor feroviare” („Vibrations Of The Railway Vehicles”), Editura Matrix Rom, București, 2010.
- [3] Gauss Johann Carl Friedrich, „Summatio serierum quarundam singularium”, Göttingen, 1811.
- [4] Germain Sophie, „Memoir on the Vibrations of Elastic Plate - Referat privind vibrațiile plăcilor elastice”, Paris, 1816.
- [5] Hamilton William Rowan, „Theory of Systems of Rays”, 1828.
- [6] Heumann H., „Grundzüge der Führung der Schienenfahrzeuge”, Olandenburg - Verlag, 1954.
- [7] Hilbert David, „Methoden der Mathematischen Physik” - Vol. 1, 1924 / Vol. 2, 1937.
- [8] Lagrange Joseph Louis, „Suite des réflexions sur la résolution algébrique des équations - Reflecții continue asupra rezoluției algebrice a ecuațiilor”, 1771.
- [9] Riemann Georg Friedrich Bernhard, „Ueber die Anzahl der Primzahlen unter einer gegebenen Grösse - Funcții cu numere prime”, Monatsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1859.
- [10] Laplace Pierre Simon, „Philosophical Essay on Probabilities. Sources in the History of Mathematics and Physical Sciences”, 1825.
- [11] Dumitru George, „Mecanica Trenurilor”, ISBN 978-606-25-0484-7, Editura MatrixRom, București, 2019.
- [12] Dumitru George, „Dinamica Locomotivelor”, ISBN 978-606-25-0770-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [3] Dumitru George, „Locomotive Electrice”, ISBN 978-606-25-0769-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [4] Dumitru George, „Locomotive Diesel”, ISBN 978-606-25-0768-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [5] Dumitru George, „Termodinamica Locomotivelor”, ISBN 978-606-25-0922-4, Editura MatrixRom, București, 2024.
- [6] Dumitru George, „Hidrodinamica Locomotivelor”, ISBN 978-606-25-0949-1, Editura MatrixRom, București, 2024.
- [9] Dumitru George et autres, „Caracteristiques dynamiques specifique des locomotives serie BR 182 Siemens 64 U2 ES 1116 Taurus”, Proceedings Of The International Scientific Conference CIBv, Vol. 2, ISSN 1843-6617, pp. 269 - 275, 12-13 November, 2010.
- [10] Dumitru George & others, „The Measuring of the Hunting Oscillations Amplitude for Electric Locomotive 060 EA Class To Speeds Between 120 And 210 [km/h]”, The 11th Youth Symposium On Experimental Solid Mechanics, ISSN: 978-606-19-0079-4, pp. 197–204, 2012, Brașov, Romania.