

Lucrarea 4

TRASAREA CARACTERISTICILOR DE TRACȚIUNE

1. Scopul lucrării

Înțelegerea metodelor de calcul și trasarea practică a caracteristicilor de tracțiune pentru un vehicul de tracțiune electrică. Determinarea rezistențelor opuse mersului și estimarea forței de aderență. Trasarea ansamblului de caracteristici de tracțiune.

2. Raportarea la obadă a caracteristicii mecanice a motorului de tracțiune

Efectuarea calculelor de tracțiune presupune adaptarea caracteristicilor electromecanice ale mașinii electrice la obada roților motoare. Acest lucru este posibil dacă se cunosc caracteristicile motorului de tracțiune (cuplu electromecanic (M_{em}), turația (n_m) și randament funcție (η_m) de curentul (I) prin motor):

$$M_{em} = f(I); n_m = f(I); \text{ și } \eta_m = f(I) \quad (1)$$

sau cuplul (M_m) și turația la arbore funcție de curent:

$$M_m = f(I) \text{ și } n_m = f(I) \quad (2)$$

Aceste caracteristici permit trasarea caracteristicii mecanice adică a dependenței grafice dintre cuplul și turația motorului $M_m = f(n_m)$. Caracteristica mecanică determinată pentru funcționare la tensiune nominală, câmp plin și rezistență suplimentară nulă se numește naturală, iar în oricare alte condiții de funcționare caracteristica mecanică obținută se va numi artificială.

Caracteristica de tracțiune $F_t = f(v)$ reprezintă caracteristica mecanică a motorului de tracțiune transferată la obada roții motoare. În principiu, cuplul

motor va da naștere forței de tracțiune (F_t) la obada roții motoare iar viteza de rotație (n_m) a motorului se va regăsi în viteza tangențială (v_R) a roții motoare.

Se consideră schema de acționare a unei osii motoare acționate de un motor serie de curent continuu semisuspendat (fig. 1) în care pinionul p de pe axul motorului (aflat la viteza de rotație n_m) angrenează coroana dințată CD montată pe osie și solidară cu roata motoare RM (cu viteza de rotație n_R). Scriind egalitatea între cuplul la arborele motorului M_m și cuplul la axul roților motoare M_o , rezultă :

$$M_m \cdot i_{tr} \cdot \eta_{tr} = M_o \quad (3)$$

unde:

$$i_{tr} = \frac{n_m}{n_R} \text{ este raportul de transmisie;}$$

n_R - viteza de rotație a roții motoare;

n_m - viteza de rotație a motorului;

η_{tr} - randamentul transmisiei mecanice.

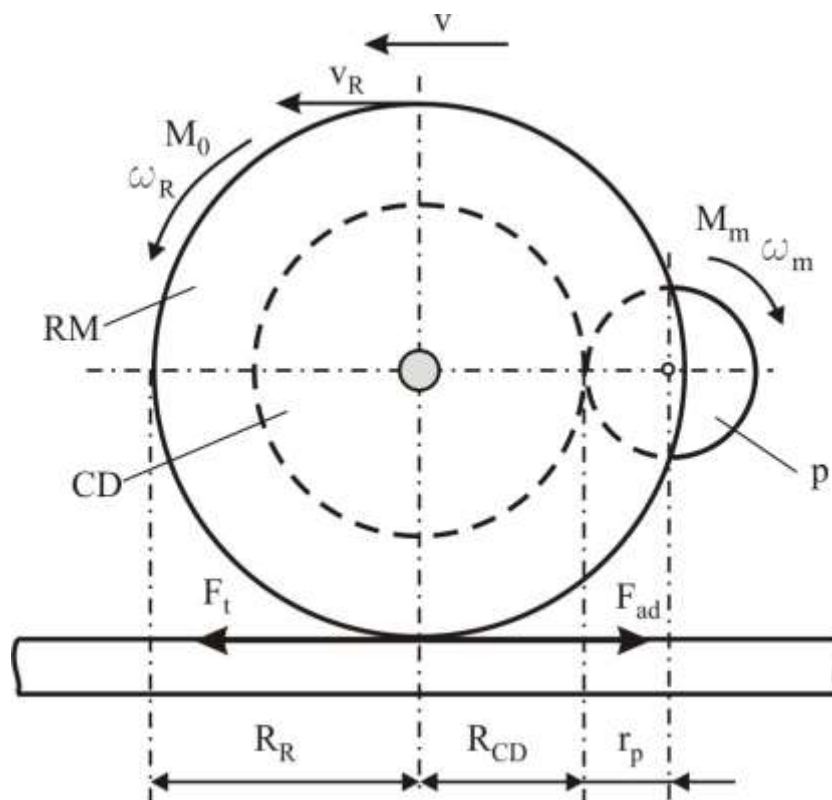


Figura 1. Raportarea cuplului și turației motorului de tracțiune la obada roților motoare.

Forța de tracțiune la obada roților motoare F_t (în punctul de contact între roată și șină) este determinată de cuplul mecanic la obadă, M_o :

$$M_o = F_t \cdot R_R \quad (4)$$

unde R_R este raza roții motoare.

Din egalitatea relațiilor (3) și (4), rezultă forța de tracțiune la obadă F_t , dată de relația :

$$F_t = \frac{i_{tr}}{R_R} \cdot \eta_{tr} \cdot M_m \quad (5)$$

Dacă se consideră randamentul transmisiei η_{tr} constant, rezultă relația pentru forța de tracțiune, relație care reprezintă corespondența între aceasta și cuplul util:

$$F_t = k_f \cdot M_m \quad (6)$$

deci forța de tracțiune la obadă este proporțională cu cuplul util, coeficientul de proporționalitate fiind:

$$k_f = \frac{i_{tr}}{R_R} \cdot \eta_{tr} \quad (7)$$

Relația dintre viteza tangențială a roții motoare v_R și viteza de rotație a motorului n_m rezultă din expresia:

$$v_R = \omega_R R_R = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_R}{60} R_R \quad (8)$$

sau

$$v_R = \frac{\pi \cdot R_R}{30 \cdot i_{tr}} \cdot n_m \quad (9)$$

Dacă se exprimă R_R în [m] iar n_R și n_m în [rot/min], rezultă viteza tangențială a vehiculului v_R în [m/s]. În cazul deplasării vehiculului cu respectarea condiției necesare deplasării ($F_A \geq F_t$), forța de tracțiune F_t fiind cel mult egală cu forța de aderență F_{ad} , (deci vehiculul se deplasează fără patinare), viteza periferică v_R a roții motoare se poate considera egală cu viteza de translație v a centrului roții care corespunde cu viteza vehiculului.

Notând coeficientul de proporționalitate al vitezei

$$k_v = \frac{\pi \cdot R_R}{30 \cdot i_{tr}} \quad (10)$$

rezultă că viteza de translație a vehiculului este proporțională cu viteza de rotație a motorului de tracțiune:

$$v = v_R = k_v \cdot n_m \quad (11)$$

Având în vedere proporționalitățile din relațiile de mai sus, rezultă că, de fapt, caracteristica mecanică a motorului de tracțiune $M_m = f(n_m)$ reprezintă caracteristica de tracțiune $F_t = f(v)$ a unității motoare când aceasta are un singur motor. Diferența constă în modificarea scărilor ce se realizează prin intermediul coeficienților de proporționalitate k_f și k_v .

Observatii asupra caracteristicii mecanice naturale:

- la cuplu rezistent nul ($M_r = 0$) viteza motorului tinde la infinit. Aceasta impune ca motorul serie de c.c. să funcționeze doar în sarcină, și niciodată la gol, pentru a se evita pericolul ambalării.
- caracteristica este moale (la cuplu mare, viteza mică și la cuplu mic, viteza mare) avantaj deosebit la vehicule.
- Cuplul de pornire și curentul de pornire (când $n = 0$) pot lua valori foarte mari, ceea ce impune limitarea curentului prin utilizarea de rezistențe de pornire sau prin scăderea tensiunii de alimentare.
- Este o caracteristică autoreglatoare de viteză, deoarece viteza se autoreglează în funcție de cuplu, păstrând puterea utilă aproximativ constantă.

3. Determinarea rezistențelor opuse mersului

Rezistențele opuse mersului sunt forțe care trebuie învinse de către forța de tracțiune, pentru a se asigura deplasarea vehiculului pe calea de rulare prin cheltuirea unei energii în acest scop. Determinarea acestor forțe are o importanță deosebită atât pentru calculele de tracțiune și energetice, cât și pentru proiectarea noilor vehicule și a noilor căi de rulare. Analiza lor permite determinarea factorilor de care depind și de aici rezultă găsirea mijloacelor de reducere a lor. După importanța pe care o au asupra deplasării vehiculelor, rezistențele opuse mersului se compun din:

- rezistențe principale, care intervin pe toată durata deplasării;
- rezistențe suplimentare, care intervin accidental pe traseu.

Rezistențele opuse mersului sunt proporționale cu masa vehiculului M_v [t], astfel încât ele se pot raporta la unitatea de masă, rezultând rezistențele specifice la înaintare.

Rezistențele principale se calculează cu formule empirice, formule stabilite pe cale experimentală în urma testelor la care este supus vehiculul. Aceste formule dau valorile medii ale sumei rezistențelor principale în funcție de viteză, masă și tipul vehiculului, astfel încât rezultatele pot diferi mult de la un vehicul la altul. Forma generală a acestor formule este:

$$R_p = (a + b \cdot v + c \cdot v^2) M_v \quad [\text{daN}] \quad (12)$$

unde:

- a, b și c sunt coeficienți obținuți experimental, care caracterizează tipul vehiculului și starea tehnică a acestuia și calitatea căii de rulare;

Pentru locomotiva electrică LE060 de 5100 kW rezistența specifică la rulare este:

$$r_{pa060} = 1,475 + 0,0049 \quad v + 0,000275 \quad v^2 \quad [\text{daN/t}] \quad (13)$$

Pentru locomotiva electrică LE040 de 3400 kW rezistența specifică la rulare este:

$$r_{pa040} = 1,347 + 0,0147 \quad v + 0,00036 \quad v^2 \quad [\text{daN/t}] \quad (14)$$

Pentru vagoane de cale ferată termenul b este neglijat, rezultând relația de calcul:

$$r_{pav} = a + c \quad v^2 \quad [\text{daN/t}] \quad (15)$$

Coeficienții a și c sunt prezentați în tabelul 1.

Tabelul 1. Valorile coeficienților a și c pentru diverse vagoane de transport feroviar.

Nr crt	Tip vagon	Coeficient	
		a	c
1	Vagon 4 osii pentru călători	1,618	0,0002452
2	Vagoane etajate pentru călători	1,765	0,0002801
3	Vagoane marfă încărcate, în compunere amestecată	1,765	0,000392
4	Vagoane marfă descărcate, în compunere mestecată	1,765	0,0011
5	Vagoane pentru minereu și cisterne încărcate, pe 4 osii	1,275	0,0003269
6	Vagoane pentru minereu și cisterne goale, pe 4 osii	1,569	0,0011

Formule utilizate pentru tramvaie

În formulele utilizate pentru determinarea rezistențelor la rulare în palier și aliniament pentru tramvaie, se neglijează de cele mai multe ori termenul dependent de viteză, considerându-se că este prea mic și nu intervine cu o pondere semnificativă în cadrul rezistențelor principale. În tabelul 2 se prezintă relații de calcul pentru rezistențele la rulare pentru tramvaie tip V2A, respectiv pentru tramvaiul Tatra T4R.

$$r_{patram} = a + c \cdot v^2 \quad [\text{daN/t}] \quad (16)$$

Tabelul 2. Rezistențele principale pentru tramvaiele.

Tramvai	Relații de calcul	Relații de calcul iarna
V2A	$r = 11 + 0,001v^2$	$r = 11,5 + 0,001v^2$
Tatra T4R (valori experimentale determinate la RATC Iași)	$r = 7 + 0,0061v^2$	$r = 8,2 + 0,0061v^2$

Rezistența datorată declivității

$$R_i = iM_{\text{tot}} \quad [\text{daN}] \quad (17)$$

unde i este declivitatea, egală cu rezistența specifică datorată declivității.

Rezistența totală la rulare este dată de suma rezistențelor principale R_p și a rezistențelor datorate declivității R_i .

$$\Sigma R = R_p + R_i \quad (18)$$

4. Forța de aderență

În cazul vehiculelor clasice, cuplul motoarelor de tracțiune se transformă în forță de tracțiune F_t la obada roților motoare doar dacă există o reacție din partea căii de rulare, reacție manifestată prin forța de aderență F_A . Practic, aderența permite efectuarea de lucru mecanic util, deci permite deplasarea vehiculului, limitând forța de tracțiune posibil a fi dezvoltată precum și viteza vehiculului. Fizic aderența este explicată prin angrenarea datorită rugozităților între șină și roată și prin legăturile interatomice între asperitățile rugozităților dintre șină și roată.

Forța de aderență se exprimă prin relația:

$$F_A = 981 \cdot \varphi \cdot M_{ad} \quad [\text{daN}] \quad (19)$$

unde:

- M_{ad} reprezintă masa aderentă a vehiculului, [t];
- φ reprezintă coeficientul de aderență, subunitar.

Masa aderentă M_{ad} reprezintă acea parte din masa totală M_t a vehiculului, care se sprijină pe calea de rulare prin roțile motoare. Masa aderentă este mai mică sau cel mult egală cu masa totală a vehiculului. Pentru un tren în regim de tracțiune, masa aderentă va fi doar masa locomotivei (la care toate osiile sunt motoare), iar în regim de frânare mecanică (dacă sunt frânate și osiile vagoanelor) masa aderentă va fi chiar masa totală, adică masa locomotivei plus masa vagoanelor.

Valoarea coeficientului de aderență depinde de mai mulți factori și poate diferi de la o zonă de circulație la alta, de la o zi la alta sau de la o oră la alta în cadrul aceleași zile.

Pentru coeficientul de aderență se folosește relația:

$$\varphi = \varphi_0 \frac{8 + 0,1v}{8 + 0,2v} \quad (20)$$

în care: viteza v este în [km/h], iar $\varphi_0 = 0,33$ pentru vehicule cu roți metalice pe șine metalice.

Valoarea astfel obținută pentru forța de aderență este o valoare medie pentru condiții optime de deplasare. În practică se au în vedere și condiții dificile de deplasare (umiditate, gheață), forța de aderență putând fi redusă cu peste 30%.

Pentru evitarea patinării va trebui respectată condiția ca forța de tracțiune dezvoltată să fie mai mică sau cel mult egală cu forța de aderență:

$$F_t \leq F_A \quad (21)$$

Mersul lucrării și conținutul referatului

Se vor trasa caracteristicile de tracțiune, rezistențele opuse mersului și forța de aderență pentru diverse tipuri de vehicule (feroviare și urbane) acționate cu diverse tipuri de motare de tracțiune și în condiții diferite de deplasare (masă, declivitate).

1. Se vor trasa caracteristicile pentru motorul de tracțiune (datele tehnice ale motoarelor de tracțiune din Anexă)

- a. dependenta turatie – curent $n = f(I)$

- b. dependenta cuplu motor – curent $M_m = f(I)$
- c. caracteristica mecanica naturală a motorului $M_m = f(n)$

2. Trecerea la caracteristica de tracțiune $F_t = f(v)$

- a. Forța de tracțiune pentru un motor: $F_{tm} = k_f M_m$

unde $k_f = \frac{i_{tr}}{R_r} \cdot \eta_{tr}$ unde raza este în metri

Pentru vehicul rezultă forța de tracțiune totală:

$F_{tt} = N_m F_{tm}$, unde N_m este numărul de motoare de tracțiune

Se trasează graficele $F_{tm} = f(I)$ și $F_{tt} = f(I)$

- b. Viteza vehiculului: $v = \frac{\pi \cdot R_r}{30 \cdot i_{tr}} \cdot n_m$ [m/s]

unde n_m este turatia din datele tehnice ale motorului.

Se trasează graficul $v = f(I)$.

- c. Se trasează caracteristica de tracțiune naturală (pentru tensiunea nominală U_m și la o rezistență de reglaj suplimentară nulă).

$$F_{tt} = f(v)$$

3. Se vor determina pentru diferite tipuri de vehicule rezistențele principale la rulare R_{pa} și rezistența totală ΣR dată de rezistențele principale și rezistența datorată declivității R_i și se vor trasa caracteristicile $R=f(v)$. Se vor determina grafic vitezele maxime atinse de vehicul pentru diverse rezistențe la rulare în condiții nominale de funcționare.

4. Se va determina forța de aderență F_{ad} (având în vedere masa aderentă și coeficientul de aderență pentru fiecare tip de vehicul) și forța de aderență în condiții dificile de mers, $F_{admin} = 0,7 F_{ad}$. Se va trasa variația $F_{ad} = f(v)$ și $F_{admin} = f(v)$.

5. Se va analiza ansamblul de caracteristici obținut având în vedere vitezele și forțele de tracțiune maxime posibile, zonele de patinare, valorile maxime de declivitate care pot fi urcate de către vehicul.

ANEXĂ

Date tehnice pentru motorul TE 020

Putere mecanică nominală (putere continuă)..... $P_n = 47,5$ kW
Tensiune nominală $U_n = 375$ V_{cc}
Curent nominal $I_n = 150$ A
Viteza de rotație nominală..... $n_n = 2160$ rot/min
Randament nominal..... $\eta_n = 0,85$
Raport de transmisie45/8
Raza roților motoare 0,305 m

Tabelul 3. Curentul de excitație, cuplu motor și turația pentru motorul TE020.

I [A]	75	100	125	150	175	200	225	250
M_m [Nm]	75	115	161	210	257	308	360	414
n_m [rot/min]	3125	2600	2335	2160	2000	1880	1785	1720

Date tehnice pentru motorul TN71

Putere mecanică nominală (putere continuă)..... $P_n = 120$ kW
Tensiune nominală $U_n = 750$ V_{cc}
Curent nominal $I_n = 178$ A
Viteza de rotație nominală..... $n_n = 1425$ rot/min
Randament nominal..... $\eta_n = 0,9$
Raport de transmisie45/7
Raza roților motoare 0,31 m

Tabelul 4. Curentul de excitație, cuplu motor și turația pentru motorul TN71.

I [A]	80	100	150	200	250	300
M_m [Nm]	174	295	617	964	1277	1586
n_m [rpt/min]	2400	2025	1540	1335	1220	1140

Date tehnice pentru motorul GDT

Putere mecanică nominală (putere continuă)..... $P_n = 200 \text{ kW}$
 Tensiune nominală $U_n = 275 \text{ Vcc}$
 Curent nominal $I_n = 820 \text{ A}$
 Viteza de rotație nominală..... $n_n = 495 \text{ rot/min}$
 Randament nominal..... $\eta_n = 0,915$
 Raport de transmisie45/7
 Raza roților motoare0,6 m

Tabelul 5. Curentul de excitație, cuplu motor și turația.

I [A]	n_m [rpm]	M_m [Nm]
200	1140	441
400	700	1422
600	570	2485
700	525	3139
820	495	3875
900	475	4365
1000	458	4960
1200	420	6300
1300	405	6880