

ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ ПРИ БУКСУВАННІ РУХОМИХ ОДИНИЦЬ ЯК ФАКТОР РЕСУРСОВИТРАТНОСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Вступ. Ефективність роботи транспортних засобів в значній мірі визначається рівнем зчеплення коліс з дорожнім покриттям або рейками. На відміну від магістрального транспорту, де питанню зчеплення присвячена велика кількість досліджень [1,2], на міському електротранспорті такі дослідження вкрай обмежені. Справа в тому, що для локомотивів використання максимальної сили тяги на границі за зчепленням є необхідним фактором ефективності перевезень, а на міському електротранспорті процеси надлишкового ковзання не мають суттєвого значення хоча б тому, що сила зчеплення рухомої одиниці є випадковою величиною, а вимоги комфортності та мінливості дорожньої ситуації вимагають реалізації сил тяги та гальмування у дуже широкому діапазоні. У разі виникнення надлишкового ковзання водії рухомої одиниці завжди може скористатись нижчими позиціями контролера управління, тому питання зчеплення має безпосередній стосунок лише до безпеки руху, бо при юзі під час гальмування збільшуються гальмівні шляхи.

Постановка задач дослідження. При буксуванні коліс залишається поза увагою енергетичний аспект цього режиму [3], який для рухомого складу міського електротранспорту у деякі періоди року стає чи не визначальним. Співставлення обсягів транспортної роботи з витратами енергії по районах живлення вказують на те, що в певні дні, коли спостерігається масове попадання вологого листя або суцвіть дерев на колію, що викликає масове буксування вагонів електротранспорту, питомі витрати енергії значно зростають. Таким чином, можна констатувати, що є об'єктивна потреба впливати на причини підвищеної енерговитратності при буксуванні як складової частини ресурсовитратності.

Матеріали дослідження. Загальні витрати електроенергії за час буксування складаються з споживання тяговими приводами колісних пар, що буксують і не буксують. При цьому одна частина енергії йде на надлишкове тертя з-за надмірного обертowego руху колісної пари та пов'язаних з нею обертowych частин, друга - на рух.

Максимальне прирощення швидкості колісної буксуючої пари ΔV_6 в основному визначається максимальною величиною швидкості надлишкового ковзання $V_{\text{ковз, max}}$, після досягнення якої внаслідок поліпшення умов зчеплення з-за очищення бандажів спостерігається зменшення швидкості ковзання аж до нуля. За цей час поступальна швидкість рухомої одиниці зростає на ΔV_6 . Слід також прийняти до уваги, що умови контакту бандажів з рейками змінюються по довжині колії, тому крім ефекту абразивного очищення бандажів припинення буксування обумовлюється збільшенням коефіцієнту сухого тертя.

Отже, визначити втрати енергії при буксуванні можна, якщо буде відома часова функція швидкості ковзання та залежна від неї сила сухого тертя. Розглянемо процес буксування більш детально.

Як це традиційно прийнято в дослідженнях буксування на магістральному транспорті, частота обертання якоря тягового двигуна, обертowych частин редуктора та самої буксуючої колісної пари приводяться до швидкості поступального руху V_6 , так що при русі вагону зі швидкістю V_6 швидкість надлишкового ковзання дорівнює:

$$V_{\text{ei} \hat{a}c} = V_a - V_a.$$

Сумарний момент інерції обертowych частин приводиться до еквівалентної маси m_e , виходячи з рівності кінетичних енергій поступального та обертального руху.

Величина еквівалентної маси визначається через відомий для кожного типу рухомих одиниць коефіцієнт інерції γ , що є відношенням еквівалентних мас обертowych частин до фізичної маси тари вагону вагою G_δ :

$$m_e = \frac{1}{4} \left(\frac{1000}{9,81} \gamma G_\delta \right) = 25,5 \gamma G_\delta.$$

Позначивши через $F_{0(V_a)}$ силу тяги, та через $F_{\text{ei} \hat{a}c(V_{\text{a} \hat{a}c})}$ силу сухого тертя при буксуванні, маємо рівняння:

$$F_{0(V_a)} - F_{\text{ei} \hat{a}c(V_{\text{ei} \hat{a}c})} = m_e \frac{dV_{\text{ei} \hat{a}c}}{dt}. \quad (1)$$

Для визначення функції сили тяги скористаємося запропонованим проф. Д.К. Міновим поняттям групової тягової характеристики, яка встановлює залежність сили тяги від суми поступальних швидкостей колісних пар, двигуни яких з'єднані послідовно [4]. У невеликому діапазоні швидкостей групова тягова характеристика добре апроксимується відрізком прямої, так що можна записати функції сили тяги через початкове значення в момент виникнення буксування F_0 та жорсткість групової тягової характеристики χ :

$$F_{0(V_a)} = F_0 [1 - \chi(V_a + V_a)] = F_0 [1 - \chi(2V_a + V_{\text{ei} \hat{a}c})].$$

Очевидно, що при цьому береться до уваги випадок буксування тільки однієї колісної пари. Функцію сили сухого тертя при надлишковому ковзанні у невеликому діапазоні швидкостей звичайно вважають лінійною і визначають через початкове значення сили тертя спокою T_0 перед початком буксування та кутовий коефіцієнт ρ :

$$F_{\text{ei} \hat{a}c(V_{\text{ei} \hat{a}c})} = T_0 (1 - \rho V_{\text{ei} \hat{a}c}). \quad (2)$$

Таким чином можна встановити усі, крім V_b , величини в основному рівнянні (1).

Для визначення швидкості поступального руху потрібно розв'язати рівняння руху у першій формі, приймаючи до уваги те, що масу вагону поступально рухають дві колісні пари тої групи, де нема буксування, одна колісна пара з другої групи двигунів, де є буксування, та буксуюча колісна пара, причому її силою тяги є сила сухого тертя при буксуванні. Як це робиться у звичайних рівняннях руху, приймається до уваги протилежно спрямована сума сил основного та додаткового опору W . З достатньою точністю можна прийняти силу опору рухові постійною протягом процесу виникнення та припинення буксування, що дає змогу знехтувати квадратичним членом у формулі питомого основного опору. Таким чином, матимемо два диференціальні рівняння першого порядку з двома невідомими $V_{ков.}$ та V_b , які можна розв'язати, об'єднавши в одне рівняння другого порядку.

Оскільки механічна робота є добутком сили на довжину ділянки, де ця сила реалізується, з урахуванням (2)

$$\text{маємо: } A_{ei\acute{a}c} = \int_0^t T_0 [1 - \rho V_{ei\acute{a}c}(t)] \cdot V_{ei\acute{a}c}(t) dt.$$

Прийнявши до уваги к.к.д. електромеханічного перетворення, отримаємо електричні втрати від буксування.

Отже, запишемо систему рівнянь для випадку буксування однієї колісної пари вагону з вагою G та коефіцієнтом інерції обертових частин $1+\gamma$:

$$\begin{cases} \frac{9,81}{10^3 \cdot G(1+\gamma)} \{2F_0(1-2\chi V_{\acute{a}}) + F_0[1-\chi(2V_{\acute{a}} + V_{ei\acute{a}c})]\} + \\ + T_0(1-\rho V_{ei\acute{a}c}) - W \} = \frac{dV_{\acute{a}}}{dt}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_0[1-\chi(2V_{\acute{a}} + V_{ei\acute{a}c})] - T_0(1-\rho V_{ei\acute{a}c}) = m_e \frac{dV_{ei\acute{a}c}}{dt}, \\ T_0 \int_0^t V_{ei\acute{a}c} dt - \rho T_0 \int_0^t V_{ei\acute{a}c}^2 dt = A_{ei\acute{a}c} \end{cases} \quad (4)$$

Вилучивши $V_{\acute{a}}$ з рівняння (3) та підставивши його до рівняння (4), отримаємо диференціальне рівняння другого порядку, якому відповідає характеристичне рівняння з коренями p_1, p_2 :

$$p^2 + (1,5A - B)p + A \left(A \frac{10^3 G(1+\gamma)}{4 \cdot 9,81 \cdot m_e} + B \right) = 0; \quad A = \frac{4 \cdot 9,81 \cdot F_0 \chi}{10^3 G(1+\gamma)}; \quad B = \frac{F_0 \chi - T_0 \rho}{m_e}.$$

Як відомо, розв'язання диференціального рівняння другого порядку, якому відповідає характеристичне рівняння з різними коренями, є сумою експонент. Приймаючи до уваги нульові початкові умови, отримаємо значення коренів:

$$F_0 - T_0 = m_e \left(\frac{dV_{ei\acute{a}c}}{dt} \right)_{t=0}; \quad (5)$$

чення коренів:

$$V_{ei\acute{a}c} = \frac{1}{p_1 - p_2} \left(\frac{dV_{ei\acute{a}c}}{dt} \right)_{t=0} (\exp p_1 t - \exp p_2 t). \quad (6)$$

Спростивши одержаний вираз для $V_{ков.}$ (6), розкладаючи експоненти в ряд та утримуючи перші члени, отримаємо залежність для визначення витрати енергії на надлишкове ковзання:

$$\begin{aligned} A &= T_0 \left(\frac{dV_{ei\acute{a}c}}{dt} \right)_{t=0} \left[\int_0^t \left(t + \frac{p_1 + p_2}{2} t^2 \right) dt - \rho \left(\frac{dV_{ei\acute{a}c}}{dt} \right)_{t=0} \int_0^t \left(t + \frac{p_1 + p_2}{2} t^2 \right)^2 dt \right] = \\ &= T_0 \left(\frac{dV_{ei\acute{a}c}}{dt} \right)_{t=0} \left[\frac{t^2}{2} + \frac{p_1 + p_2}{6} t^3 - \rho \left(\frac{dV_{ei\acute{a}c}}{dt} \right)_{t=0} \left(\frac{t^3}{3} + \frac{p_1 + p_2}{4} t^4 + \frac{(p_1 + p_2)^2}{20} t^5 \right) \right], \end{aligned}$$

де F_0, T_0 - сили тяги та зчеплення в момент початку буксування; χ, ρ - жорсткість групової тягової характеристики та жорсткість характеристики зчеплення; V - швидкість; m_e - еквівалентна маса обертових частин.

Висновки. Таким чином, запропонована методика дає можливість визначити втрати електроенергії під час буксування транспортних засобів, зокрема міського електротранспорту і оцінити ефективність роботи рухомого складу в цілому або окремих спеціальних пристроїв.

Література.

1. Исаев И.П. Случайные факторы и коэффициент сцепления. М.: Транспорт, 1977. – 182 с.
2. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
3. Карпушин Э.И., Далека В.Ф., Зубенко Ю.Ф. Методика анализа составляющих энергопотребления на предприятиях городского электротранспорта. Тезисы XXX научно-техн.конф. Преподавателей, аспирантов и сотр.ХГАГХ. Харьков, ХГАГХ, 2000. – С.11-12.
4. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. М.: Транспорт, 1965. – 268 с.