

Міністерство освіти і науки України

Харківська національна академія міського господарства

**П. М. Пушков,
Ю. В. Мінєєва**

Методичні вказівки
до практичних і самостійних занять з дисципліни

«ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»

*(для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання та слухачів
другої вищої освіти за напрямом підготовки 0922 (6.050702 –
"Електромеханіка"))*

Харків – ХНАМГ – 2009

Методичні вказівки до практичних і самостійних занять з дисципліни «Основи електричної тяги» (для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання та слухачів другої вищої освіти за напрямом підготовки 0922 (6.050702 – "Електромеханіка"))/ Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: доц., к.т.н. П.М. Пушков, доц., к.т.н. Ю. В. Мінеєва– Х.: ХНАМГ, 2009. – 79 с.

Укладачі: П. М.Пушков ,
Ю.В.Мінеєва

Рецензент: В.П. Андрійченко, доц., к.т.н.

Рекомендовано кафедрою ЕТ, протокол № 11 від 28.04.2009 р.

ВСТУП

Навчальною програмою дисципліни “Основи електричної тяги” передбачене проведення зі студентами практичних і самостійних занять. Ці методичні вказівки написані з метою надання допомоги студентам самостійно навчитися використовувати теоретичні положення основ електричної тяги при розв’язанні практичних завдань.

Матеріал методичних вказівок поданий у послідовності вивчення глав (тем) дисципліни. Кожна глава складається з теоретичної частини, завдань із рішеннями й завдань для самостійної роботи та контрольних завдань.

До методичних вказівок включені завдання, складені авторами, і завдання з навчальної літератури, список яких наведений наприкінці цієї роботи.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РУХУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Основні теоретичні положення

Еквівалентна маса обертових частин поїзда

$$m_e = \sum \frac{J_o}{R_o^2} + \sum \frac{J_n}{R_n^2} + \sum \frac{J_y \mu^2}{R_o^2}, \quad (1.1)$$

де J_o – момент інерції рушійної колісної пари або коліс із півосями при застосуванні диференціальної передачі зі зв'язаними з ними елементами механічного передатного пристрою;

J_n – момент інерції підтримуючої колісної пари або коліс;

J_y – момент інерції якоря двигуна, включаючи частини механічної передачі, що укріплені на його валу;

R_o, R_n – радіуси кругів катіння рушійних і підтримуючих коліс;

μ – передаточне число механічної передачі (редуктора).

Замінивши моменти інерції обертових частин поїзда J добутками

$$J = m_e \rho_e^2,$$

де m_e – маса обертаючої частини, ρ_e – її радіус інерції, формулу (1.1) запишемо у вигляді

$$m_e = \sum m_o \frac{\rho_o^2}{R_o^2} + \sum m_n \frac{\rho_n^2}{R_n^2} + \sum m_y \frac{\rho_y^2 \mu^2}{R_o^2}. \quad (1.2)$$

При обчисленні m_e можна виходити із середніх значень відносин радіусів інерції ρ до радіусів R зовнішніх окружностей обертових частин. Для рушійних і підтримуючих колісних пар і коліс $\rho/R = 0,75 - 0,80$, для зубчастих коліс – приблизно 0,8, для якорів тягових двигунів 0,65 – 0,75.

Суму маси поїзда m й еквівалентної маси його обертових частин m_e називають приведеною масою поїзда m_{np} :

$$m_{np} = m + m_e \quad (1.3)$$

або

$$m_{np} = m \left(1 + \frac{m_e}{m} \right) = m(1 + \gamma) = mK_u. \quad (1.4)$$

Тут коефіцієнт $K_u = 1 + \gamma$ називають коефіцієнтом інерції обертових частин поїзда, величину $\gamma = m_e/m$ – коефіцієнтом приведення.

При розрахунках достатню точність дають наступні значення коефіцієнта K_u для рухомого складу різного типу: моторні вагони електропоїздів – 1,08 – 1,12, моторні вагони трамваю – 1,09 – 1,15, причіпні вагони трамваю – 1,05 – 1,08, тролейбуси – 1,15 – 1,20.

Значення K_u для поїзда, що складається з рухомого складу різного типу, визначають як середньо виважене значення

$$K_u = 1 + \gamma = 1 + \frac{\sum_{i=1}^k m_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^k m_i}, \quad (1.5)$$

де m_i – маса частини поїзда з однотипного рухомого складу, що має відношення $m_{ei}/m_i = \gamma_i$; K – кількість типів рухомого складу.

Рівняння руху поїзда

$$(1 + \gamma)m \frac{dV}{dt} = \zeta F_D; \quad (1.6)$$

$$(1 + \gamma)mV \frac{dV}{dl} = \zeta' F_D, \quad (1.7)$$

де V – швидкість руху; t – час руху; l – пройдений шлях; F_D – рівнодіюча сил, що діють на поїзд; ζ і ζ' – переводні коефіцієнти, що забезпечують узгодження одиниць виміру величин у рівняннях (1.6), (1.7).

Якщо одиницями виміру величин, що входять до рівняння (1.6), (1.7), є одиниці Міжнародної системи одиниць (СІ) (кг, м, с, Н), то $\zeta = \zeta' = 1$. При вимірі швидкості V в км/год коефіцієнти $\zeta = 3,6$; $\zeta' = 3,6^2 = 12,96$; $1/\zeta = 0,278$; $1/\zeta' = 0,07716$.

Тягові розрахунки зручніше виконувати, користуючись питомими значеннями рівнодіючої сили і її складових, для чого рівняння (1.6), (1.7) ділять на вагу поїзда $G, \kappa H$. Виразимо масу поїзда $m, \kappa g$, через його вагу $G, \kappa H$: $m = 10^3 G/g = 10^3 G/9,81 = 102G$, тоді рівняння руху поїзда, в так званій питомій формі, наберуть вигляду

$$102(1 + \gamma) \frac{dV}{dt} = \zeta f_D; \quad (1.8)$$

$$102(1 + \gamma)V \frac{dV}{dl} = \zeta' f_D, \quad (1.9)$$

де $f_D = F_D/G$ – питома рівнодіюча сила, $H/\kappa H$.

При вимірі швидкості V у км/год рівняння (1.8), (1.9) мають вигляд

$$28,3(1 + \gamma) \frac{dV}{dt} = f_{\delta}; \quad (1.10)$$

$$7,87(1 + \gamma)V \frac{dV}{dl} = f_{\delta}, \quad (1.11)$$

де коефіцієнти $28,3 = 102/\zeta = 102/3,6$; $7,87 = 102/\zeta' = 102/3,6^2$.

У будь-якому режимі руху поїзда (тяги, вибігу, гальмування) при рівнодіючій (динамічній) силі F_{δ} , рівній нулю, поїзд рухається зі сталою швидкістю ($V_y = const$). Якщо ж $F_{\delta} \neq 0$, рух поїзда буде відбуватися зі збільшенням швидкості при $F_{\delta} > 0$ й зі зменшенням її при $F_{\delta} < 0$.

За позитивний напрямок сил, прикладених до поїзда, приймається напрямок його руху. Тоді сила тяги F позитивна, гальмова сила B – негативна. Рівнодіюча сил опору руху поїзда W , яку називають повним опором руху, у більшості випадків спрямована проти руху поїзда, але на крутих спусках W може діяти в позитивний бік. Тому її варто розглядати як алгебраїчну величину, причому вважають W позитивною, якщо вона спрямована проти руху поїзда.

При русі в режимі тяги рівнодіюча сила $F_{\delta} = F - W$, у режимі вибігу $F_{\delta} = -W$, у режимі гальмування $F_{\delta} = -(B + W)$.

ЗАДАЧІ

1.1. Визначити час руху й шлях, пройдений трамвайним вагоном масою $m = 18$ т у режимі вибігу, якщо швидкості на початку й кінці вибігу відповідно дорівнюють $V_{e1} = 50$ км/ч й $V_{e2} = 30$ км/ч. Опір руху $W = 3$ кН, коефіцієнт інерції обертових частин вагона $K_u = 1 + \gamma = 1,12$.

Рішення. Для розв'язання завдання використовуємо рівняння руху вагона в режимі вибігу:

$$(1 + \gamma)m \frac{dV}{dt} = -\zeta W; \quad (1.12)$$

$$(1 + \gamma)mV \frac{dV}{dl} = -\zeta W, \quad (1.13)$$

За умовою завдання опір руху $W = 3$ кН = const, отже, вагон рухається уповільнено (уповільнення $a_{ym} = dV/dt = const$). Час руху й пройдений вагоном шлях можна визначити декількома способами.

а) З рівняння (1.12), з огляду на те, що при вимірі швидкості V в м/с коефіцієнт $\zeta = 1$, знаходимо значення вповільнення

$$a_{\epsilon} = \frac{dV}{dt} = -\frac{\zeta W}{(1+\gamma)m} = -\frac{1 \cdot 3}{1,12 \cdot 18} = -0,149 \text{ м/с}^2.$$

Час руху

$$t_{\epsilon} = \frac{V_{\epsilon 2} - V_{\epsilon 1}}{3,6 a_{\epsilon}} = \frac{30 - 50}{3,6(-0,149)} = 37,3 \text{ с}.$$

Тут $1/3,6 = 0,278$ – коефіцієнт перерахунку км/ч у м/с

Пройдений шлях

$$l_{\epsilon} = \frac{V_{\epsilon, \text{ср}}}{3,6} \cdot t_{\epsilon} = \frac{V_{\epsilon 1} + V_{\epsilon 2}}{2 \cdot 3,6} \cdot t_{\epsilon} = \frac{50 + 30}{2 \cdot 3,6} \cdot 37,3 = 415 \text{ м}.$$

Тут $V_{\epsilon, \text{ср}}$ – середня швидкість руху вагона в режимі вибігу.

б) Час руху знаходимо шляхом інтегрування рівняння (1.12):

$$\begin{aligned} t_{\epsilon} &= \int_0^{t_{\epsilon}} dt = \frac{(1+\gamma)m}{-\zeta W} \int_{V_{\epsilon 1}}^{V_{\epsilon 2}} dV = \frac{(1+\gamma)m}{\zeta W} \int_{V_{\epsilon 2}}^{V_{\epsilon 1}} dV = \frac{(1+\gamma)m}{\zeta W} V \Big|_{V_{\epsilon 2}}^{V_{\epsilon 1}} = \\ &= \frac{(1+\gamma)m(V_{\epsilon 1} - V_{\epsilon 2})}{\zeta W} = \frac{1,12 \cdot 18(50 - 30)}{3,6 \cdot 3} = 37,3 \text{ с}. \end{aligned}$$

Пройдений шлях l_{ϵ} розраховуємо так само, як і в попередньому прикладі.

в) Пройдений шлях визначаємо шляхом інтегрування рівняння (1.13):

$$\begin{aligned} l_{\epsilon} &= \int_0^{l_{\epsilon}} dl = \frac{(1+\gamma)m}{-\zeta W} \int_{V_{\epsilon 1}}^{V_{\epsilon 2}} V dV = \frac{(1+\gamma)m}{\zeta W} \int_{V_{\epsilon 2}}^{V_{\epsilon 1}} V dV = \frac{(1+\gamma)m}{\zeta W} \cdot \frac{V^2}{2} \Big|_{V_{\epsilon 2}}^{V_{\epsilon 1}} = \\ &= \frac{(1+\gamma)m}{\zeta W} \cdot \frac{V_{\epsilon 1}^2 - V_{\epsilon 2}^2}{2} = \frac{1,12 \cdot 18(50^2 - 30^2)}{3,6^2 \cdot 3 \cdot 2} = 415 \text{ м}. \end{aligned}$$

Час руху

$$t_{\epsilon} = \frac{l_{\epsilon}}{V_{\epsilon, \text{ср}}} \cdot 3,6 = \frac{415 \cdot 3,6}{40} = 37,3 \text{ с}.$$

Тут $V_{\epsilon, \text{ср}} = (V_{\epsilon 1} + V_{\epsilon 2})/2 = (50 + 30)/2 = 40 \text{ км/год}$.

г) Виразити опір руху W у питомих одиницях виміру: $w = W/G = W/mg$, $H/\kappa H$, для визначення t_{ϵ} й l_{ϵ} використовувати рівняння (1.10), (1.11).

1.2. Для випадку незмінної динамічної сили одержати загальні вираження для зміни в часі швидкості поїзда $V(t)$ й пройденого шляху $l(t)$; оцінити вид цих залежностей.

Рішення. Рівняння руху (1.6), (1.10) при $F_\delta = const$ й $f_\delta = const$ розв'язуємо методом розподілення змінних, їхнє розв'язання має вигляд

$$V = \frac{\zeta F_\delta}{m(1+\gamma)}t + V_{нач}; \quad (1.14)$$

$$V = \frac{f_\delta}{28,3(1+\gamma)}t + V_{нач}, \quad (1.15)$$

де $V_{нач}$ – значення швидкості при $t = 0$.

Отримані формули показують, що швидкість лінійно залежить від часу: за умови $F_\delta > 0$, $f_\delta > 0$ вона збільшується, а при $F_\delta < 0$, $f_\delta < 0$ знижується.

З рівняння $V = dl/dt$ отримуємо

$$dl = Vdt = \frac{\zeta F_\delta}{m(1+\gamma)}tdt + V_{нач}dt; \quad (1.16)$$

$$dl = Vdt = \frac{f_\delta}{28,3(1+\gamma)}tdt + V_{нач}dt, \quad (1.17)$$

звідки після інтегрування

$$l = \frac{\zeta F_\delta}{m(1+\gamma)} \cdot \frac{t^2}{2} + V_{нач}t + l_{нач}; \quad (1.18)$$

$$l = \frac{f_\delta}{28,3(1+\gamma)} \cdot \frac{t^2}{2} + V_{нач}t + l_{нач}, \quad (1.19)$$

де $l_{нач}$ – значення шляху при $t = 0$.

Таким чином, пройдений шлях залежить квадратично від часу руху.

1.3. Для випадку незмінної динамічної сили одержати загальні вирази для визначення часу руху Δt й пройденого шляху Δl при зміні швидкості на деякому інтервалі $\Delta V = V_{кін} - V_{нач}$.

Рішення. Час руху Δt , за який швидкість зміниться від деякого початкового значення $V_{нач}$ до кінцевого $V_{кін}$, визначимо з (1.14), (1.15) при підстановці $t = \Delta t$ й $V = V_{кін}$:

$$\Delta t = \frac{m(1+\gamma)(V_{кін} - V_{нач})}{\zeta F_\delta} = \frac{m(1+\gamma)\Delta V}{\zeta F_\delta}; \quad (1.20)$$

$$\Delta t = \frac{28,3(1+\gamma)(V_{кин} - V_{ноч})}{f_{\delta}} = \frac{28,3(1+\gamma)\Delta V}{f_{\delta}}. \quad (1.21)$$

Пройдений шлях Δl , що відповідає зміні швидкості від $V_{ноч}$ до $V_{кин}$, визначимо за допомогою інтегрування рівнянь (1.7), (1.11):

$$\Delta l = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'F_{\delta}} \cdot \frac{V_{кин}^2 - V_{ноч}^2}{2} = \frac{m(1+\gamma)V_{cp}\Delta V}{\zeta'F_{\delta}}; \quad (1.22)$$

$$\Delta l = \frac{7,87(1+\gamma)}{f_{\delta}} \cdot \frac{V_{кин}^2 - V_{ноч}^2}{2} = \frac{7,87(1+\gamma)V_{cp}\Delta V}{f_{\delta}}, \quad (1.23)$$

де $V_{cp} = (V_{кин} + V_{ноч})/2$ – середня швидкість в інтервалі зміни швидкості ΔV .

З урахуванням виразів (1.20), (1.21) одержуємо

$$\Delta l = \frac{\zeta}{\zeta'} V_{cp} \Delta t = \frac{1}{3,6} V_{cp} \Delta t; \quad (1.24)$$

$$\Delta l = \frac{1}{3,6} V_{cp} \Delta t. \quad (1.25)$$

1.4. Визначити динамічну силу F_{δ} , що забезпечить збільшення швидкості тролейбуса, що має приведену масу $m_{np} = 18\text{т}$, на 18км/год за час 7с .

1.5. Визначити час руху й шлях, пройдений тролейбусом масою 15т у режимі тяги під дією динамічної сили $F_D = 15\text{кН}$ за зміни швидкості від $V_{ноч} = 0$ до $V_{кин} = 20\text{км/год}$ й коефіцієнті $K_i = 1 + \gamma = 1,12$.

1.6. Визначити час руху й шлях, пройдений трамвайним вагоном масою $m = 25\text{т}$ у режимі гальмування під дією динамічної сили $F_{\delta} = -(B+W) = -30\text{кН}$ за зміни швидкості від $V_{ноч} = 30\text{км/ч}$ до $V_{кин} = 0$. Коефіцієнт $K_i = 1 + \gamma = 1,1$.

1.7. Тролейбус масою $m = 9,5\text{т}$ під дією динамічної (прискорювальної) сили $F_{\delta} = 11\text{кН}$ рухається із прискоренням $a = dV/dt = 1\text{м/с}^2$. Визначити коефіцієнт інерції $K_i = 1 + \gamma$ й еквівалентну масу m_e обертових частин тролейбуса, а також його приведену масу m_{np} .

Рішення. З рівняння руху (1.6) при $\zeta = 1$ визначимо

$$K_i = 1 + \gamma = F_{\delta}/(ma) = 11/(9,5 \cdot 1) = 1,16.$$

Приведена маса тролейбуса

$$m_{np} = m(1 + \gamma) = 9,5 \cdot 1,16 = 11\text{т}.$$

Еквівалентна маса обертових частин

$$m_e = m_{np} - m = 11 - 9,5 = 1,5\text{т}$$

або

$$m_e = m \cdot \gamma = 9,5 \cdot 0,16 = 1,5\text{т}.$$

1.8. Визначити приведену масу m_{np} , фізичну масу m , вагу G й коефіцієнт інерції обертових частин K_i трамвайного вагона, що рухається під дією динамічної (прискорювальної) сили $F_d = 30\text{кН}$ із прискоренням $a = dV/dt = 1,2\text{м/с}^2$. Еквівалентна маса обертових частин вагона $m_e = 2,5\text{т}$.

1.9. Визначити коефіцієнт інерції K_i й еквівалентну масу m_e обертових частин трамвайного поїзда, що складає з моторного вагона масою $m_m = 16\text{т}$ та двох причіпних вагонів, кожний з яких має масу $m_n = 10\text{т}$. Коефіцієнти інерції обертових частин моторного й причіпного вагонів відповідно дорівнюють 1,12 й 1,08.

1.10. Визначити коефіцієнт інерції обертових частин причіпного чотириосьового вагона, якщо його маса $m = 14\text{т}$, а маса однієї колісної пари $m_g = 0,45\text{т}$. Відношення радіуса інерції колісної пари до радіуса коліс $\rho_g/R_g = 0,75$.

1.11. Визначити передаточне число μ редуктора моторного трамвайного вагона, якщо його маса $m = 28\text{т}$, коефіцієнт $K_i = 1 + \gamma = 1,14$, маса однієї колісної пари $m_k = 0,45\text{т}$, маса якоря тягового двигуна й пов'язаних з ним елементів редуктора $m_j = 0,1\text{т}$, середні значення відношень радіусів інерції колісної пари ρ_k і якоря ρ_j до радіуса коліс R_k дорівнюють відповідно $\rho_k/R_k = 0,75$, $\rho_j/R_k = 0,4$.

2. РЕАЛІЗАЦІЯ СИЛ ТЯГИ Й ГАЛЬМУВАННЯ

Основні теоретичні положення

Сила тяги реалізується рушійними колісними парами моторного вагона трамваю та метро або рушійними колесами тролейбуса. Вона виникає при зчепленні коліс із рейками (дорожнім покриттям) під дією сили ваги. Зовнішня стосовно рухомого складу сила зчеплення $F_{зч}$ є тією силою, завдяки якій обертаючі моменти тягових двигунів реалізуються у вигляді сили тяги F , що забезпечує поступальний рух поїзда.

Сила зчеплення має природу сили тертя. Для окремого колеса вона дорівнює в першому наближенні добутку сили натискання G_k , кН колеса на

рейку (дорожнє покриття) і коефіцієнта зчеплення ψ_{κ} колеса з рейкою (дорожнім покриттям):

$$F_{\text{ци}} = 10^3 G_{\kappa} \psi_{\kappa}, H. \quad (2.1)$$

Для забезпечення нормального кочення колеса в режимах тяги й гальмування сили тяги F_{κ} й гальмування B_{κ} не повинні перевищувати силу зчеплення:

$$F_{\kappa} \leq 10^3 G_{\kappa} \psi_{\kappa}; \quad (2.2)$$

$$B_{\kappa} \leq 10^3 G_{\kappa} \psi_{\kappa}. \quad (2.3)$$

За дотримання цих умов прослизання коліс щодо рейки (дорожнього покриття) не відбувається.

Умова нормальної реалізації сили тяги поїзда має вигляд

$$F \leq 10^3 G_{\text{зч}} \psi \quad (2.4)$$

і сили гальмування

$$B \leq 10^3 G_{\text{г}} \psi, \quad (2.5)$$

де F – сила тяги поїзда (електрорухомого складу), реалізована без буксування коліс, H ;

$G_{\text{ци}}$ – сума сил натискання на рейки (дорожнє покриття) усіх рушійних осей (колів) у поїзді (зчіпна вага поїзда), κH ;

ψ – коефіцієнт зчеплення;

B – найбільша гальмова сила поїзда, реалізована без юза, H ;

$G_{\text{г}}$ – сума сил натискання всіх гальмових колів поїзда на шлях (гальмова вага поїзда), κH .

Коефіцієнт зчеплення ψ_{κ} колеса визначаємо як відношення найбільшої сили тяги, що діє на нього на момент початку буксування (найбільшої гальмової сили на момент початку юза), до сили натискання колеса на шлях.

Коефіцієнт зчеплення поїзда ψ трохи менше ψ_{κ} , тому що не можна допускати буксування або юза жодного з колів або колісної пари поїзда.

Чисельні значення коефіцієнта зчеплення визначені дослідним шляхом. Для трамваю без індивідуального полотна на підставі досвіду отримані для чистих рейок значення $\psi = 0,16 - 0,18$, для забруднених рейок $\psi = 0,12 - 0,14$. На трамвайних лініях з індивідуальним (окремим) полотном $\psi = 0,18 - 0,20$. Під час падіння листя коефіцієнт зчеплення вагонів трамваю різко зменшується до $\psi = 0,06 - 0,08$. У середньому, за винятком днів листопаду й ожеледі, з огляду на можливість застосування піску, приймають коефіцієнт зчеплення трамваю без окремого полотна $\psi = 0,15$.

Коефіцієнт зчеплення тролейбуса коливається в широких межах залежно від метеорологічних умов і стану дороги. У середніх умовах можна приймати для тягових розрахунків тролейбусів $\psi = 0,30 - 0,35$. За умови забрудненої поверхні дороги, особливо під час ожеледі, коефіцієнт зчеплення різко зменшується й може знизитися до 0,15 й навіть до 0,1.

На підставі експлуатаційних даних розрахункові значення коефіцієнта зчеплення електропоїздів метрополітену можуть бути прийняті в межах 0,20 – 0,22.

З огляду на те, що порушення зчеплення під час гальмування (юз) у всіх випадках значно небезпечніше, ніж буксування при тязі, доцільно вибирати значення коефіцієнта зчеплення у процесі розрахунків гальмування приблизно на 15 – 20% меншим, ніж при тязі.

ЗАДАЧІ

- 2.1. Визначити найбільшу силу тяги тролейбуса ЗИУ-9Б з пасажирами й без пасажирів, реалізовану без буксування коліс. Передня осьова маса порожнього (облаштованного) тролейбуса – 4,563т, за номінальної місткості (91 чіл.) – 6,215т, за граничної місткості (126 чіл.) – 6,33т. Задня осьова маса порожнього тролейбуса – 5,487т, при номінальної місткості – 10,275т, за граничної – 12,61т. Коефіцієнт зчеплення тролейбуса $\psi = 0,3$.

Рішення. У тролейбуса ЗИУ-9Б ведучим є тільки задній міст, отже, зчїпна маса відповідає задній осьовій масі тролейбуса.

Зчїпна вага, κH ,

$$G_{зч} = m_{зч} g, \quad (2.6)$$

де $m_{зч}$ – зчїпна маса, т; $g = 9,81 м/с^2$ – прискорення вільного падіння.

Відповідно до виразів (2.4) і (2.6) найбільше значення сили тяги по зчепленню порожнього тролейбуса

$$F_{\max} = 10^3 \cdot 5,487 \cdot 9,81 \cdot 0,3 = 16148H = 16,148\kappa H,$$

за номінальної місткості

$$F_{\max} = 10^3 \cdot 10,275 \cdot 9,81 \cdot 0,3 = 30240H = 30,24\kappa H,$$

за граничної місткості

$$F_{\max} = 10^3 \cdot 12,61 \cdot 9,81 \cdot 0,3 = 37110H = 37,11\kappa H.$$

- 2.2. Використовуючи дані попереднього завдання, визначити найбільшу припустиму за зчепленням гальмову силу тролейбуса ЗИУ-9Б с пасажирами й без пасажирів при електричному й механічному гальмуванні.

Рішення. Вибираємо значення коефіцієнта зчеплення на 20% менше, ніж при тязі: $\psi = 0,8 \cdot 0,3 = 0,24$. При електричному гальмуванні гальмова маса відповідає зчипний: $m_T = m_{cy}$, отже, $B_{\max} = 0,8F_{\max}$.

Механічним гальмом обладнані всі чотири колеса тролейбуса, отже, гальмова маса m_T дорівнює повній масі m тролейбуса: за відсутності пасажирів $m = 4,563 + 5,487 = 10,05$ т, за номінальної місткості $m = 6,215 + 10,275 = 16,49$ т, при граничній місткості $m = 6,33 + 12,61 = 18,94$ т.

Відповідно до виразу (2.5) найбільша припустима за зчепленням гальмова сила механічного гальмування порожнього тролейбуса

$$B_{\max} = 10^3 \cdot 10,05 \cdot 9,81 \cdot 0,24 = 23660H = 23,66кН,$$

за номінальної місткості

$$B_{\max} = 10^3 \cdot 16,49 \cdot 9,81 \cdot 0,24 = 38824H = 38,824кН,$$

за граничної місткості

$$B_{\max} = 10^3 \cdot 18,94 \cdot 9,81 \cdot 0,24 = 44590H = 44,59кН.$$

2.3. Визначити найбільші припустимі за зчепленням сили тяги й гальмування трамвайного вагона типу КТМ-5М із пасажирами й без пасажирів. Маса вагона без пасажирів дорівнює 18т, місткість за заповнення $5 \text{ люд}/\text{м}^2 - 123 \text{ люд}$, середня маса одного пасажирів – 75кг, коефіцієнт зчеплення вагона $\psi = 0,15$.

2.4. Під час руху трамвайного вагона КТМ-5М без пасажирів на зтяжному підйомі сила тяги вагона зросла до $F = 25кН$, а коефіцієнт зчеплення на цій ділянці шляху $\psi = 0,1$. Визначити, за якого значення коефіцієнта зчеплення можливий поступальний рух вагона?

Рішення. Зчипна маса дорівнює масі вагона $m_{зч} = m = 18$ т. Граничне значення сили зчеплення в цьому випадку

$$F_{зч-пр} = 10^3 m_{зч} g \psi = 10^3 \cdot 18 \cdot 9,81 \cdot 0,1 = 17658H$$

буде меншим сили тяги $F = 25000H$. Отже, відбудеться буксування колісних пар. Для того, щоб поступальний рух трамвая був можливим, необхідно збільшити коефіцієнт зчеплення, посипаючи рейки піском.

Користуючись виразами (2.4), (2.6), визначимо значення коефіцієнта зчеплення, за якого буксування припиниться й можливим буде поступальний рух вагона:

$$\psi = \frac{F}{10^3 m_{зч} g} = \frac{25000}{1000 \cdot 18 \cdot 9,81} = 0,142.$$

3. ОПІР РУХУ ПОЇЗДА

Основні теоретичні положення

Опір руху поїзда умовно поділяють на основний й додатковий:

$$W = W_0 + W_{\text{доп}}. \quad (3.1)$$

Основний опір руху W_0 , що залежить від типу рухомого складу й швидкості його руху, являє собою опір руху на прямолінійній і горизонтальній відкритій ділянці шляху за відсутності вітру. Він зумовлений внутрішнім тертям у рухомому складі, опором, що виникає у процесі взаємодії рухомого складу й колії, а також опором повітряного середовища.

Додатковий опір руху $W_{\text{доп}}$ при нормальній температурі навколишнього повітря й відсутності вітру являє собою опір руху від уклонів W_i і від кривих $W_{\text{кр}}$:

$$W_{\text{доп}} = W_i + W_{\text{кр}}. \quad (3.2)$$

Для зручності виконання тягових розрахунків опір руху виражають у питомих одиницях, $H/\kappa H$:

$$w = \frac{W}{G} = \frac{W_0 + W_i + W_{\text{кр}}}{G} = w_0 + w_i + w_{\text{кр}}, \quad (3.3)$$

де G – вага поїзда, κH .

Для електрорухомого складу умовно розрізняють опір руху в режимі тяги або електричного гальмування, коли тягові машини є двигунами або генераторами (рух під струмом), і в режимі вибігу й механічного гальмування (рух без струму). Різниця у значеннях опору руху викликана тільки тим, що під час руху під струмом механічні втрати енергії в тягових двигунах, тяговій передачі й моторно-осьових підшипниках, що враховуються в характеристиці двигунів, покриваються енергією, споживаної з контактної мережі; при русі на вибігу ці ж втрати, що покриваються кінетичною енергією рухомого складу, ураховують збільшенням опору руху на ΔW . Значення ΔW визначають, прирівнюючи потужність втрат холостого ходу $P_{\text{хх}}$, Вт, у тягових двигунах і передачах добутку ΔW_0 на швидкість V , м/с, руху електрорухомого складу. Звідси, H :

$$\Delta W_0 = \frac{P_{\text{хх}}}{V}. \quad (3.4)$$

При виконанні тягових розрахунків основний питомий опір руху обчислюють за емпіричними формулами. На підставі експериментальних робіт запропонована значна кількість формул для рухомого складу різних типів всіх видів транспорту. Для рухомого складу міського електричного транспорту розрахункові формули наведені в табл. 3.1[1,2,3,4].

Таблиця 3.1 - Розрахункові формули основного питомого опору руху рухливого складу ГЭТ

Тип рухомого складу	Основний питомий опір руху $H/\kappa H$	
	Рух під струмом	Рух без струму
Вагони трамваю: Типу КТМ-5М Типу РВЗ Типу МТВ	$w_0 = 5 + 0,005 \cdot V^2$ (3.5)	$w_{0x} = 9 + 0,005 \cdot V^2$ (3.6)
	$w_0 = 0,45 + 0,0028 \cdot V^2$ (3.7)	$w_{0x} = 5 + 0,0031 \cdot V^2$ (3.8)
	$w_0 = 0,9(5 + 0,0031 \cdot V^2)$ (3.9)	$w_{0x} = 5 + 0,0031 \cdot V^2$ (3.10)
	$w_0 = 1,5 + \frac{8 + 0,038 \cdot V^2}{m}$ (3.11)	$w_{0x} = 1,5 + \frac{45 + 0,062 \cdot V^2}{m}$ (3.12)
Одновагонний поїзд трамваю Поїзд трамваю із двох моторних вагонів Поїзд трамваю з одного моторного й одного причіпного вагонів	$w_0 = 2,5 + \frac{30 + 0,04 \cdot V^2}{m}$ (3.13)	$w_{0x} = 3,0 + \frac{40 + 0,05 \cdot V^2}{m}$ (3.14)
	$w_0 = 2,5 + \frac{30 + 0,03 \cdot V^2}{m}$ (3.15)	$w_{0x} = 3,0 + \frac{40 + 0,04 \cdot V^2}{m}$ (3.16)
	$w_0 = 2,0 + \frac{20 + 0,03 \cdot V^2}{m}$ (3.17)	$w_{0x} = 2,25 + \frac{30 + 0,035 \cdot V^2}{m}$ (3.18)
Тролейбус: на асфальтових і бетонних дорогах на бруківках і гравійних дорогах	$w_0 = 12 + 0,004 \cdot V^2$ (3.19)	$w_{0x} = 16 + 0,004 \cdot V^2$ (3.20)
	$w_0 = 16 + 0,004 \cdot V^2$ (3.21)	$w_{0x} = 20 + 0,004 \cdot V^2$ (3.22)
Тролейбус	$w_0 = 0,9(12 + 0,004 \cdot V^2)$ (3.23)	$w_{0x} = 12 + 0,004 \cdot V^2$ (3.24)
Вагони метрополітену	$w_0 = 1,1 + \frac{(0,09 + 0,022 \cdot n_g) V^2}{m}$ (3.25)	$w_{0x} = 1,0 + \frac{52 \cdot n_g}{m} + 0,025 V + \frac{(0,09 + 0,022 \cdot n_g) V^2}{m}$ (3.26)

Примітка: m – загальна маса поїзда, т; n_g – кількість вагонів у поїзді; V – швидкість, км/ч.

Сила опору руху від уклону W_i не залежить ні від швидкості руху, ні від типу рухомого складу. Питоме її значення, $H/\kappa H$ чисельно дорівнює крутості уклону в тисячних частках, ‰:

$$w_i = i. \quad (3.27)$$

Ця сила спрямована вбік спуску. Це враховують у формулі (3.27) таким чином, що на підйомах величину i приймають позитивною, а на спусках негативною, тобто в цій формулі під i розуміють не абсолютне, а алгебраїчне значення крутості уклону.

Опір руху від уклону, H

$$W_i = Gw_i = mgi, \quad (3.28)$$

де m – маса поїзда, т; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

На рейковому транспорті виникає додатковий опір руху на кривих ділянках шляху.

У результаті експериментальних досліджень були складені емпіричні вирази, які враховують основні фактори, що впливають на значення питомого опору руху в кривих. Наведімо один з таких виразів:

$$w_{кр} = \frac{1000 \cdot \varphi}{2R_{кр}} \left(h_{к} + \sqrt{h_{к}^2 + l_{б}^2} \right), H/\kappa H, \quad (3.29)$$

де φ – коефіцієнт тертя ковзання між колесом і рейкою, що у середньому дорівнює 0,2–0,22 для чистих сухих рейок; $R_{кр}$ – радіус кривої, м; $h_{к}$ – ширина колії, м; $l_{б}$ – довжина твердої бази візка, м.

Через складність обліку впливу всіх діючих факторів зазвичай користуються емпіричною формулою, у якій ураховується тільки основний фактор - радіус кривої. Вплив швидкості не враховують, вважаючи, що поїзда проходять криві з обмеженням швидкості. Для трамвайних чотириосьових вагонів приблизно

$$w_{кр} = 450/R_{кр}, H/\kappa H, \quad (3.30)$$

де $R_{кр}$ – радіус кривої, м.

Величина додаткового опору на повороті у тролейбуса набагато менша, ніж у рейкового транспорту на кривій, і при розрахунках нею в більшості випадків зневажають.

ЗАДАЧІ

3.1. Визначити основний опір руху W_0 для вагонів трамваю типів КТМ-5М, РВЗ, МТВ масою 25т при русі під струмом і без струму зі швидкістю 30км/год, а також потужність механічних втрат у електроприводі вагонів.

Рішення. Основний опір руху вагонів визначаємо відповідно до формул (3.5) - (3.8), (3.11), (3.12) за табл. 3.1.

$$\text{КТМ-5М: } W_0 = mg(5 + 0,005 \cdot V^2) = 25 \cdot 9,81(5 + 0,005 \cdot 30^2) = 2330H ;$$

$$W_{0x} = mg(9 + 0,005 \cdot V^2) = 25 \cdot 9,81(9 + 0,005 \cdot 30^2) = 3311H .$$

$$\text{РВЗ: } W_0 = mg(0,45 + 0,0028 \cdot V^2) = 25 \cdot 9,81(0,45 + 0,0028 \cdot 30^2) = 728H ;$$

$$W_{0x} = mg(5 + 0,0031 \cdot V^2) = 25 \cdot 9,81(5 + 0,0031 \cdot 30^2) = 1910H .$$

$$\text{МТВ: } W_0 = mg\left(1,5 + \frac{8 + 0,038 \cdot V^2}{m}\right) = 25 \cdot 9,81\left(1,5 + \frac{8 + 0,038 \cdot 30^2}{25}\right) = 782H ;$$

$$W_{0x} = mg\left(1,5 + \frac{45 + 0,062 \cdot V^2}{m}\right) = 25 \cdot 9,81\left(1,5 + \frac{45 + 0,062 \cdot 30^2}{25}\right) = 1357H .$$

Потужність механічних утрат в електроприводі вагонів визначаємо як добуток різниці $\Delta W_0 = W_{0x} - W_0$ і швидкості руху.

$$\text{КТМ-5М: } \Delta P_{\text{мх}} = \frac{(W_{0x} - W_0)V}{3,6} = \frac{(3311 - 2330)30}{3,6} = 8175Bт .$$

$$\text{РВЗ: } \Delta P_{\text{мх}} = \frac{(W_{0x} - W_0)V}{3,6} = \frac{(1910 - 728)30}{3,6} = 9850Bт .$$

$$\text{МТВ: } \Delta P_{\text{мх}} = \frac{(W_{0x} - W_0)V}{3,6} = \frac{(1357 - 782)30}{3,6} = 4792Bт .$$

3.2 Визначити повний опір руху W трамвайного вагона. КТМ-5М та тролейбуса ЗиУ-9Б при русі під струмом на підйомі з уклоном $i = 30\%$ по кривій радіусом $R_{кр} = 75м$ зі швидкістю $V = 20км/год$. Масу вагона й тролейбуса прийняти рівною 18т.

Рішення. Для вагона КТМ-5М у відповідності до формул (3.3), (3.5), (3.27), (3.30) одержуємо

$$W = mg(w_0 + w_i + w_{кр}) = mg\left(5 + 0,005V^2 + i + \frac{450}{R_{кр}}\right) = 18 \cdot 9,81\left(5 + 0,005 \cdot 20^2 + 30 + \frac{450}{75}\right) = 7593H .$$

Для тролейбуса додатковий опір руху у кривих не враховуємо й відповідно до формул (3.19), (3.27) одержуємо

$$W = mg(w_0 + w_i) = mg(12 + 0,004V^2 + i) = 18 \cdot 9,81(12 + 0,004 \cdot 20^2 + 30) = 7699 \text{ Н} .$$

3.3. Визначити додатковий опір руху для вагона трамвая МТВ вагою $G = 235 \text{ кН}$ при русі по кривій радіуса $R_{кр} = 50 \text{ м}$. База візка $l_0 = 1,75 \text{ м}$, ширина колії $h_k = 1,524 \text{ м}$, коефіцієнт тертя ковзання $\varphi = 0,22$.

Рішення. Відповідно до формули (3.29) питомий опір руху по кривій

$$w_{кр} = \frac{1000\varphi}{2R_{кр}} \left(h_k + \sqrt{h_k^2 + l_0^2} \right) = \frac{1000 \cdot 0,22}{2 \cdot 50} \left(1,524 + \sqrt{1,524^2 + 1,75^2} \right) = 8,458 \text{ Н/кН} .$$

Опір руху від кривої

$$W_{кр} = Gw_{кр} = 235 \cdot 8,458 = 1988 \text{ Н} .$$

При визначенні $w_{кр}$ за формулою (3.30) одержуємо

$$W_{кр} = Gw_{кр} = 235 \frac{450}{50} = 2115 \text{ Н} .$$

Різниця в значеннях $W_{кр}$ дорівнює приблизно 6%.

3.4. Визначити швидкість рівномірного руху трамвайного вагона КТМ-5М у режимі вибігу на прямолінійному спуску з ухлоном $i = -10\%$.

Рішення. При рівномірному русі вагона алгебраїчна сума діючих на нього сил дорівнює нулю:

$$F_D = W_{0x} + W_i = 0$$

або $w_{0x} + w_i = 0,$

звідки $w_{0x} = -w_i .$

Для вагона КТМ-5М $w_{0x} = 9 + 0,005V^2$, $w_i = i = -10 \text{ Н/кН} .$

Тоді $9 + 0,005V^2 = 10,$

звідки $V = \sqrt{200} = 14,14 \text{ км/год} .$

3.5. Визначити швидкість руху тролейбуса ЗиУ-9Б у режимі вибігу на спуску з уклоном $i = -10\%$.

Рішення. Відповідно до формул (3.20), (3.22), (3.24) за табл. 3.1. при $V = 0$ основний питомий опір тролейбуса $w_{0,x} > |w_i| = |i| = 10H/\kappa H$, тому на цьому спуску при відключених двигунах нерухомий тролейбус не зможе зрушити з місця, а тролейбус, що рухається, уповільнить свій рух і зупиниться.

3.6. Визначити гальмову силу B , за якої трамвайний вагон КТМ-5М масою $m = 20\text{т}$ на спуску з уклоном $i = -20\%$ буде рухатися з постійною швидкістю $V = 20\text{км/год}$.

3.7. Визначити крутість спуску, яким трамвайний вагон КТМ-5М масою $m = 25\text{т}$ буде рухатися з постійною швидкістю $V = 15\text{км/год}$, якщо гальмова сила $B = 2000H$.

3.8. Визначити питому силу електричного гальмування, за якої трамвайний вагон КТМ-5М при русі криволінійним спуском з уклоном $i = -15\%$ і радіусом кривизни $R_{кр} = 150\text{м}$ не перевищить швидкість руху $V = 20\text{км/год}$.

3.9. Визначити пускову силу тяги F_n трамвайного вагона КТМ-5М та тролейбуса ЗиУ-9 на момент руху ($V = 0$) прямолінійним спуском з ухилом $i = -2\%$, якщо пускове прискорення $a_n = 0,4\text{м/с}^2$. Вага трамвая $250\kappa H$, приведена маса $28,6\text{т}$. Вага тролейбуса $150\kappa H$, приведена маса 17т .

3.10. Визначити силу тяги тролейбуса ЗиУ-9Б із номінальною масою $m = 16490\text{кг}$, що рухається горизонтальною ділянкою шляху зі сталою швидкістю $V_c = 55\text{км/год}$.

3.11. Визначити значення гальмового вповільнення a_T на момент початку гальмування трамвайного вагона КТМ-5М на прямолінійному спуску з уклоном $i = -5\%$, якщо гальмова сила $B = 20\kappa H$, вага вагона $G = 235\kappa H$, коефіцієнт $K_i = 1 + \gamma = 1,12$, швидкість початку гальмування $V_T = 30\text{км/год}$.

3.12. Визначити, чи можливо зупинити трамвайний вагон КТМ-5М на прямолінійному спуску з уклоном $i = -30\%$, якщо гальмова сила вагона $B = 3\kappa H$, швидкість початку гальмування $V_T = 30\text{км/год}$. Вага вагона $G = 240\kappa H$, коефіцієнт $K_i = 1 + \gamma = 1,12$.

3.13. Визначити припустиму за зчепленням крутість прямолінійного підйому, що може подолати трамвайний вагон КТМ-5М зі швидкістю $V = 30\text{км/год}$ та коефіцієнті зчеплення коліс із рейками $\psi = 0,15$.

Рішення. Крутість підйому визначаємо з рівняння рівномірного руху вагона зі швидкістю $V = 30 \text{ км/год}$. Силу тяги приймаємо рівній граничній силі зчеплення $F = 10^3 G \psi, H$. Рівняння рівномірного руху

$$F - W_0 - W_i = 0,$$

звідки

$$W_i = F - W_0$$

або

$$Gi = 10^3 G \psi - Gw_0,$$

$$i = 10^3 \psi - w_0 = 10^3 \cdot 0,15 - 9,5 = 140,5\%,$$

де $w_0 = 5 + 0,005 \cdot V^2 = 5 + 0,005 \cdot 30^2 = 9,5 \text{ Н/кН}$.

3.14. Визначити припустиму за зчепленням крутість прямолінійного підйому, на якому можливо рушити з місця ($V = 0$) трамвайному вагону КТМ-5М з прискоренням $a = 0,4 \text{ м/с}^2$, якщо коефіцієнт зчеплення коліс із рейками $\psi = 0,15$, коефіцієнт $K_H = 1 + \gamma = 1,14$.

Рішення. Крутість підйому визначаємо з рівняння руху на момент, коли вагон рушить з місця ($V = 0$) на підйомі із прискоренням $a = 0,4 \text{ м/с}^2$. Силу тяги вагона приймаємо рівній граничній силі зчеплення $F = 10^3 G \psi, H$.

Рівняння руху

$$F - W_0 - W_i = m(1 + \gamma)a,$$

звідки

$$W_i = F - W_0 - m(1 + \gamma)a$$

або

$$Gi = 10^3 G \psi - Gw_0 - 102G(1 + \gamma)a,$$

$$i = 10^3 \psi - w_0 - 102(1 + \gamma)a = 10^3 \cdot 0,15 - 5 - 102 \cdot 1,14 \cdot 0,4 = 150 - 5 - 46,5 = 98,5\%,$$

де при $V = 0$ питомий основний опір $w_0 = 5 + 0,005V^2 = 5 \text{ Н/кН}$.

3.15. Визначити припустиму за зчепленням крутість підйому, що може подолати тролейбус ЗІУ-9Б зі швидкістю $V = 30 \text{ км/год}$ та коефіцієнтом зчеплення $\psi = 0,3$.

3.16. Визначити припустиму за зчепленням крутість підйому, на якому можливо тролейбус ЗІУ-9 рушить з місця ($V = 0$) із прискоренням $a = 0,3 \text{ м/с}^2$, якщо коефіцієнт зчеплення $\psi = 0,3$ та коефіцієнт $K_i = 1 + \gamma = 1,15$.

3.17. Визначити припустиму за зчепленням крутість прямолінійного спуску, на якому трамвайний вагон КТМ-5М буде рухатися при електричному гальмуванні з уповільненням $a = -1 \text{ м/с}^2$, якщо коефіцієнти $\psi = 0,15$ та $K_H = 1 + \gamma = 1,12$.

Рішення. Гальмову силу приймаємо рівній граничній силі зчеплення $B = 10^3 G \psi$. Рівняння руху вагона в режимі гальмування

$$-(B + W_0 + W_i) = m(1 + \gamma)a,$$

звідки

$$W_i = -[B + W_0 + m(1 + \gamma)a]$$

або

$$Gi = -[10^3 G \psi + Gw_0 + 102G(1 + \gamma)a],$$

$$i = -[10^3 \psi + w_0 + 102(1 + \gamma)a] = -[10^3 \cdot 0,15 + 5 + 102 \cdot 1,12(-1)] = -150 - 5 + 114 = -41\%,$$

де значення $w_0 = 5 \text{ Н/кН}$ прийняте відповідно до значення швидкості $V = 0$.

3.18. Визначити припустиму за зчепленням крутість криволінійного спуску, на якому трамвайний вагон КТМ-5М у режимі електричного гальмування буде рухатися з постійною швидкістю $V = 10 \text{ км/год}$, якщо коефіцієнт $\psi = 0,15$, радіус кривої $R_{кр} = 150 \text{ м}$.

Рішення. Гальмову силу приймаємо рівній граничній силі зчеплення $B = 10^3 G \psi$. Рівняння сил, що діють на вагон,

$$B + W_0 + W_{кр} + W_i = 0$$

звідки

$$W_i = -(B + W_0 + W_{кр})$$

або

$$Gi = -(10^3 G \psi + Gw_0 + Gw_{кр}),$$

$$i = -(10^3 \psi + w_0 + w_{кр}) = -(10^3 \cdot 0,15 + 5,5 + 3,0) = -158,5\%,$$

$$\text{де } w_{кр} = \frac{450}{R_{кр}} = \frac{450}{150} = 3 \text{ Н/кН};$$

$$w_0 = 5 + 0,005V^2 = 5 + 0,005 \cdot 10^2 = 5,5 \text{ Н/кН}.$$

3.19. Визначити припустиму за зчепленням крутість спуску, на якому тролейбус ЗІУ-9 буде рухатися при електричному гальмуванні з уповільненням $a = -1 \text{ м/с}^2$, якщо коефіцієнти $\psi = 0,3$ й $K_{II} = 1 + \gamma = 1,12$.

3.20. Визначити припустиму за зчепленням крутість спуску, на якому тролейбус ЗІУ-9 у режимі електричного гальмування буде рухатися рівномірно зі швидкістю $V = 10 \text{ км/год}$, якщо коефіцієнт зчеплення $\psi = 0,3$.

3.21. Визначити шлях, який пройшов трамвайним вагон КТМ-5М у режимі вибігу на горизонтальному й прямолінійному шляху за умови зміни швидкості від $V_1 = 50 \text{ км/год}$ до $V_2 = 30 \text{ км/год}$. Коефіцієнт $K_{II} = 1 + \gamma = 1,12$.

Рішення. Рівняння руху вагона на вибігу в питомій формі за умови вимірювання швидкості в км/год

$$7,87(1+\gamma)V \frac{dV}{dl} = -w_{0x},$$

де w_{0x} – питомий основний опір руху вагона на вибігу

$$w_{0x} = 9 + 0,005V^2, H/кН.$$

Розділяємо в рівнянні руху змінні й потім інтегруємо:

$$l_g = 7,87(1+\gamma) \int_{V_1}^{V_2} \frac{VdV}{-w_{0x}} = 7,87 \cdot 1,12 \int_{V_2}^{V_1} \frac{VdV}{9 + 0,005V^2} = \frac{7,87 \cdot 1,12}{2 \cdot 0,005} \ln(9 + 0,005V^2) \Big|_{30}^{50} = 408 м.$$

3.22. Визначити шлях, що пройшов трамвайний вагон КТМ-5М у режимі вибігу на прямолінійному підйомі з ухилом $i = 5\%$ при зміні швидкості від $V_1 = 50 км/год$ до $V_2 = 30 км/год$. Коефіцієнт $K_H = 1 + \gamma = 1,12$.

Відповідь: $l_g = 315 м$.

3.23. Визначити шлях, пройдений трамвайним вагоном КТМ-5М у режимі електричного гальмування на горизонтальному прямолінійному шляху при зміні швидкості від $V_1 = 30 км/год$ до $V_2 = 5 км/год$. Маса вагона 18т, гальмова сила $B = 20 кН$, коефіцієнт $K_H = 1,12$.

Відповідь: $l_r = 30,4 м$.

3.24. Визначити час руху трамвайного вагона КТМ-5М у режимі вибігу на горизонтальному прямолінійному шляху при зміні швидкості від $V_1 = 50 км/год$ до $V_2 = 30 км/год$. Коефіцієнт $K_H = 1,12$.

Рішення. Рівняння руху вагона на вибігу в питомій формі при

вимірюванні швидкості в км/год

$$28,3(1+\gamma) \frac{dV}{dt} = -w_{0x} = -(9 + 0,005V^2).$$

Розділяємо в рівнянні руху змінні й інтегруємо:

$$t_e = 28,3(1 + \gamma) \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V - w_{0x}} = 28,3 \cdot 1,12 \int_{V_2}^{V_1} \frac{dV}{9 + 0,005V^2} =$$

$$= \frac{28,3 \cdot 1,12}{0,005} \int_{V_2}^{V_1} \frac{dV}{1800 + V^2} = \frac{6339}{\sqrt{1800}} \operatorname{arctg} \frac{V}{\sqrt{1800}} \Big|_{30}^{50} = 37,6 \text{ с.}$$

3.25. Визначити час руху трамвайного вагона КТМ-5М у режимі електричного гальмування на горизонтальному прямолінійному шляху при зміні швидкості від $V_1 = 30 \text{ км/год}$ до $V_2 = 5 \text{ км/год}$. Маса вагона 18т, гальмова сила $B = 20 \text{ кН}$, коефіцієнт $K_H = 1 + \gamma = 1,12$.

Відповідь: $t_r = 7,3 \text{ с}$.

3.26. Визначити швидкість рівномірного руху трамвайного вагона КТМ-5М у режимі вибігу на спуску з уклоном $i = -15\%$ кривою радіусом $R_{кр} = 150 \text{ м}$.

Відповідь: $V = 24,5 \text{ км/год}$.

3.27. Визначити швидкість рівномірного руху тролейбуса ЗІУ-9 у режимі вибігу на спуску з уклоном $i = -25\%$.

Відповідь: $V = 47,4 \text{ км/год}$.

3.28. Трамвайний вагон у режимі вибігу на прямолінійному горизонтальному шляху за час $t_e = 60 \text{ с}$ пройшов шлях $l_e = 200 \text{ м}$. Коефіцієнт $K_H = 1 + \gamma = 1,15$. Визначити основний питомий опір руху вагона.

Рішення. При рівноуповільненому русі уповільнення

$$a_e = \frac{V_{cp}}{\frac{t_e}{2}} = \frac{2l_e}{t_e^2}.$$

Питомий основний опір руху

$$w_{0x} = 102(1 + \gamma)a_e = 102(1 + \gamma) \frac{2l_e}{t_e^2} = 102 \cdot 1,15 \frac{2 \cdot 200}{60^2} = 13 \text{ Н/кН}.$$

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основні теоретичні положення

Електромеханічними характеристиками (ЕМХ) на валу двигуна називають наступні залежності від струму I якоря: частоту обертання $n(I)$ або кутову швидкість $\omega(I)$, обертаючий момент $M(I)$, потужність $P_2(I)$ та коефіцієнт корисної дії (ККД) $\eta_d(I)$ при постійній напрузі U й незмінних схемах електричних кіл двигуна й опірах їхніх елементів.

ЕМХ, віднесеними до ободу рушійних коліс, або електротяговими, називають залежності від струму якоря швидкості $V(I)$, сили тяги $F_k(I)$, потужності $P(I)$ й ККД $\eta(I)$, які одержують перерахуванням електромеханічних характеристик, віднесених до вала двигуна, за формулами:

$$V = 1,8 \frac{D}{\mu} \omega = 0,1884 \frac{D}{\mu} n; \quad (4.1)$$

$$F_k = \frac{2\mu}{D} M \eta_s = \frac{3,6UI\eta}{V} = \frac{3,6P_1\eta}{V}; \quad (4.2)$$

$$P = \omega M \eta_s = \frac{F_k V}{3,6} = P_1 \eta = P_2 \eta_s; \quad (4.3)$$

$$\eta = \eta_d \eta_s = \eta_d - \frac{\Delta P_{3\%}}{100}, \quad (4.4)$$

де D – діаметр рушійних коліс, m ;

n – частота обертання валу двигуна, $об/мин$;

$\omega = \pi n / 30$ – кутова швидкість валу двигуна, $рад/с$;

M – обертаючий момент на валові двигуна, $H \cdot m$;

F_k – сила тяги, створена одним двигуном, H ;

V – швидкість, $км/ч$;

μ – передаточне число механічної передачі (рушійного механізму);

$P_1 = UI$ – підведена до якоря двигуна електрична потужність, $Вт$;

$P_2 = P_1 \eta_d = \omega M$ – потужність на валові двигуна, $Вт$;

P – потужність на ободі рушійних коліс, $Вт$;

η_s – ККД рушійного механізму;

$\Delta P_{3\%} = 100 \Delta P_s / P_1$ – втрати потужності в механічній передачі, виражені у відсотках від потужності P_1 .

Механічні характеристики на валові двигуна $M(\omega)$ й на ободі рушійних коліс (тягові характеристики) $F_k(V)$ будують відповідно за залежностями $\omega(I)$, $M(I)$ і $V(I)$, $F_k(I)$ шляхом виключення струму I .

Властивості електричних машин описують рівняннями напруг, моментів і потужностей, а також виразами ЕРС обмотки якоря E й електромагнітного обертаючого моменту M_{em} , що утворюється в результаті взаємодії струму в провідниках обмотки якоря з магнітним потоком головних полюсів.

Рівняння напруг у сталому режимі, вираження ЕРС і електромагнітного моменту записують в наступному вигляді:

$$U = E + rI; \quad (4.5)$$

$$E = C_e n \phi = C_m \omega \phi; \quad (4.6)$$

$$M_{em} = C_m \phi I, \quad (4.7)$$

де U – напруга, що підведена до якоря, B ;

$r = r_{оя} + r_{en} + r_{он}$ – сума опорів послідовно з'єднаних обмоток якоря, головних і додаткових полюсів, Om ;

ϕ – магнітний потік головного полюса, $B\delta$;

I – струм якоря, A ; C_e і C_m – конструктивні коефіцієнти двигуна:

$$C_e = \frac{Np}{60a}; \quad (4.8)$$

$$C_m = \frac{30}{\pi} C_e = \frac{Np}{2\pi a}, \quad (4.9)$$

де N й a – кількість активних провідників і кількість пар паралельних віток обмотки якоря; p – кількість пар головних полюсів.

Виражаючи на підставі формули (4.1) кутову швидкість ω у формулі (4.6) через поступальну швидкість V , $км/ч$, для поїзда, одержимо

$$E = CV\phi, \quad (4.10)$$

де коефіцієнт

$$C = C_m \frac{\mu}{1,8D} = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{Np}{\pi a} \cdot \frac{\mu}{D}, 1/м. \quad (4.11)$$

Момент M на валові менше моменту $M_{эм}$ на втрату моменту ΔM , викликану механічними $\Delta P_{мх}$ й магнітними $\Delta P_{м}$ втратами у двигуні:

$$M = M_{эм} - \Delta M = M_{эм} - \frac{(\Delta P_{мх} + \Delta P_{м})}{\omega}. \quad (4.12)$$

Потужність на валові двигуна

$$P_2 = P_1 - rI^2 - (\Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{м}}) = P_{\text{эм}} - (\Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{м}}), \quad (4.13)$$

Де

$$P_{\text{эм}} = P_1 - rI^2 = EI = \omega M_{\text{эм}} \quad (4.14)$$

- електромагнітна потужність якоря двигуна;
- rI^2 - електричні втрати потужності на якорі.

Потужність P на ободі рушійних коліс менша потужності P_2 на величину втрати потужності ΔP_3 на механічній передачі:

$$P = P_2 - \Delta P_3 = P_{\text{эм}} - (\Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_3). \quad (4.15)$$

Силу тяги створену одним двигуном, H , визначаємо на підставі виразів (4.3), (4.10), (4.14), (4.15):

$$F_{\text{к}} = \frac{3,6P}{V} = 3,6C\phi I - \frac{3,6(\Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_3)}{V} = F_{\text{эм}} - \Delta F_{\text{к}}. \quad (4.16)$$

Тут

$$F_{\text{эм}} = \frac{3,6P_{\text{эм}}}{V} = 3,6C\phi I \quad (4.17)$$

- електромагнітна сила тяги;

$$\Delta F_{\text{к}} = \frac{3,6(\Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_3)}{V} \quad (4.18)$$

- втрата сили тяги, викликана магнітними й механічними втратами потужності у двигуні й механічній передачі.

Для двигунів паралельного й незалежного збудження підведена до двигуна потужність

$$P_0 = P_1 + \Delta P_6, \quad (4.19)$$

де P_1 - потужність, підведена до якоря двигуна;

ΔP_6 - втрати потужності в ланцюгах паралельного й незалежного збудження.

ККД двигуна на якорі $\eta_{\text{эм}}$ (електромагнітний ККД), на валу $\eta_{\text{д}}$ й на ободі рушійних коліс η розраховуємо за виразами

$$\eta_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{P_1} = 1 - \frac{rI^2}{UI} = 1 - \frac{rI}{U}; \quad (4.20)$$

$$\eta_D = \frac{P_2}{P_0} = 1 - \frac{\Delta P_g + rI^2 + \Delta P_M + \Delta P_{MX}}{P_0}; \quad (4.21)$$

$$\eta = \frac{P}{P_0} = 1 - \frac{\Delta P_g + rI^2 + \Delta P_M + \Delta P_{MX} + \Delta P_3}{P_0}. \quad (4.22)$$

ЕМХ на валові двигуна визначаються експериментально на заводі, що виготовляє двигуни або розраховують за формулами

$$\omega = \frac{E}{(E/\omega)} = \frac{U - rI}{C_M \phi}; \quad (4.23)$$

$$\eta_D = \frac{P_2}{P_0} = 1 - \frac{\Delta P_g + rI^2 + \Delta P_M + \Delta P_{MX}}{P_0}; \quad (4.24)$$

$$M = \frac{UI\eta_D}{\omega} = C_M \phi I - \frac{(\Delta P_M + \Delta P_{MX})}{\omega}. \quad (4.25)$$

ЕМХ на ободі коліс одержують перерахуванням ЕМХ на валові або безпосередньо розраховують за формулами

$$V = \frac{(U - rI)}{C \phi}, \quad (4.26)$$

F_k – за (4.16) і η – за (4.22).

Залежності $C_M \phi(I)$, $C \phi(I)$ визначають за навантажувальними характеристиками $\phi(F_M)$, де F_M – магніторушійна сила (МРС) магнітного ланцюга машини. Навантажувальні характеристики $\phi(F_M)$ при різних значеннях струму $I = const$ якоря визначають шляхом розрахунку або експериментально. Залежності $F_M(I)$ встановлюють за відомими схемами збудження і їхніми параметрами.

Суму механічних і магнітних втрат у двигуні визначають за знайденими досвідним шляхом кривими втрат холостого струму $(\Delta P_{MX} + \Delta P_M)(\omega)$ при різних значеннях МРС F_M .

Втрати на механічній передачі ΔP_3 встановлюють на основі значень відсотках утрат $\Delta P_{3\%}$, що наведені у довідковій літературі для різних типів передач.

ЗАДАЧІ

4.1. Тяговий двигун послідовного збудження ДК-211А, встановлений на тролейбусі, має наступні номінальні дані: $U = 550\text{В}$, $I = 300\text{А}$, $n = 1750\text{об/хв}$, $P_2 = 150\text{кВт}$, $r = 0,11\text{Ом}$. Діаметр рушійного колеса тролейбуса $D = 1,07\text{м}$, передаточне число механічної передачі $\mu = 11,4$, втрати потужності $\Delta P_{3\%} = 6$.

Визначити номінальні значення η_d , η , η_3 , E , $P_{эм}$, $M_{эм}$, M , rI^2 , $\Delta P_{мх} + \Delta P_{м}$, ΔM , V , $F_{к}$, P .

Рішення.

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} = \frac{150 \cdot 10^3}{550 \cdot 300} = \frac{150 \cdot 10^3}{165 \cdot 10^3} = 0,909;$$

$$\eta = \eta_d - \frac{\Delta P_{3\%}}{100} = 0,909 - \frac{6}{100} = 0,849;$$

$$\eta_3 = \frac{\eta}{\eta_d} = \frac{0,849}{0,909} = 0,934;$$

$$E = U - rI = 550 - 0,11 \cdot 300 = 550 - 33 = 517\text{В};$$

$$P_{эм} = EI = 517 \cdot 300 = 155,1 \cdot 10^3 \text{Вт} = 155,1\text{кВт};$$

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{P_{эм}}{\pi n/30} = \frac{155,1 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 1750/30} = 846,8\text{Н} \cdot \text{м};$$

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{\pi n/30} = \frac{150 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 1750/30} = 818,9\text{Н} \cdot \text{м};$$

$$rI^2 = 0,11 \cdot 300^2 = 9900\text{Вт} = 9,9\text{кВт};$$

$$\Delta P_{мх} + \Delta P_{м} = P_{эм} - P_2 = 155,1 - 150 = 5,1\text{кВт};$$

$$\Delta M = M_{эм} - M = 846,8 - 818,9 = 27,9\text{Н} \cdot \text{м};$$

$$V = 0,1884 \cdot \frac{nD}{\mu} = \frac{0,1884 \cdot 1750 \cdot 1,07}{11,4} = 30,9\text{км/год};$$

$$F_{к} = \frac{2\mu M \eta_3}{D} = \frac{2 \cdot 11,4 \cdot 818,9 \cdot 0,934}{1,07} = 16298\text{Н} = 16,298\text{кН};$$

$$P = P_2 \eta_3 = 150 \cdot 0,934 = 140,1\text{кВт}.$$

4.2. Тяговий двигун послідовного збудження ТЕ-022, що встановлений на вагоні трамваю Т-3, має наступні номінальні дані: $U = 300B$, $n = 1750об/хв$, $\eta_d = 0,911$, $P_2 = 41кВт$. Опір кола якоря $r = 0,152Ом$, кількість пар паралельних витків обмотки якоря $a = 1$, кількість проводів обмотки якоря $N = 290$, кількість пар головних полюсів $p = 2$. Діаметр рушійного колеса вагона $D = 0,7м$, передаточне число редуктора $\mu = 7,36$, ККД механічної передачі $\eta_3 = 0,94$.

Визначити номінальні значення V , I , E , ϕ , P_1 , $P_{эм}$, P , $\Delta P_{мх} + \Delta P_{м}$, $M_{эм}$, M , ΔM , $F_{эм}$, $F_{к}$, $\Delta F_{к}$.

Рішення.

$$V = \frac{0,1884nD}{\mu} = \frac{0,1884 \cdot 1750 \cdot 0,7}{7,36} = 31,4 км/год;$$

$$I = \frac{P_2}{U\eta_d} = \frac{41 \cdot 10^3}{300 \cdot 0,911} = 150A;$$

$$E = U - rI = 300 - 0,152 \cdot 150 = 277,2B$$

$$\phi = \frac{E}{C_e n} = \frac{E}{Npn/60a} = \frac{277,2}{290 \cdot 2 \cdot 1750/60 \cdot 1} = 0,0164Bб;$$

$$P_1 = UI = 300 \cdot 150 = 45000Bт = 45кВт;$$

$$P_{эм} = EI = 277,2 \cdot 150 = 41580Bт = 41,58кВт;$$

$$P = P_1 \cdot \eta_d \cdot \eta_3 = 45 \cdot 0,911 \cdot 0,94 = 38,535кВт;$$

$$\Delta P_{мх} + \Delta P_{м} = P_{эм} - P_2 = 41580 - 41000 = 580Bт;$$

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega} = \frac{P_{эм}}{\pi n/30} = \frac{41580}{3,14 \cdot 1750/30} = 227H \cdot м;$$

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{41000}{3,14 \cdot 1750/30} = 224H \cdot м;$$

$$\Delta M = M_{эм} - M = 227 - 224 = 3H \cdot м;$$

$$F_{эм} = \frac{3,6P_{эм}}{V} = \frac{3,6 \cdot 41580}{31,4} = 4767H;$$

$$F_{к} = \frac{3,6P}{V} = \frac{3,6 \cdot 38535}{31,4} = 4418H;$$

$$\Delta F_{к} = F_{эм} - F_{к} = 4767 - 4418 = 349H.$$

4.3. Для тягового двигуна ТЕ-022, номінальні дані якого наведені в задачі 4.2, визначити струм і ЕРС якоря, магнітний потік головного полюса, потужність і ККД на валу, частоту обертання, якщо електромагнітний момент зменшиться у два рази, сумарні механічні й магнітні втрати на двигуні не зміняться, сталь магнітної системи ненасичена.

Рішення. За умовою завдання сталь машини ненасичена, отже, електромагнітний момент пропорційний квадрату струму якоря. Тоді струм якоря

$$I_1 = I \sqrt{\frac{M_{эм1}}{M_{эм}}} = I \sqrt{0,5} = 150 \cdot 0,707 = 106 \text{ A};$$

$$E_1 = U - rI_1 = 300 - 0,152 \cdot 106 = 284 \text{ В};$$

$$n_1 = n \frac{E_1 \phi}{E \phi_1} = n \frac{E_1 I}{E I_1} = 1750 \frac{284 \cdot 150}{277,2 \cdot 106} = 2537 \text{ об/хв};$$

$$\phi_1 = \frac{\phi I_1}{I} = \frac{0,0164 \cdot 106}{150} = 0,0116 \text{ Вб};$$

$$P_{эм1} = E_1 I_1 = 284 \cdot 106 = 30104 \text{ Вт};$$

$$\eta_{д1} = 1 - \frac{rI_1^2 + \Delta P_{мх} + \Delta P_{м}}{UI_1} = 1 - \frac{0,152 \cdot 106^2 + 580}{300 \cdot 106} = 1 - 0,072 = 0,928.$$

4.4. Тяговий двигун за швидкості $V = 36 \text{ км/год}$, розвиває силу тяги $F_k = 10 \text{ кН}$. Визначити потужність, спожиту двигуном з мережі, потужність на валові й на ободі коліс, якщо ККД на валові двигуна $\eta_d = 0,91$, потужність втрат у механічній передачі тягового приводу $\Delta P_{6\%} = 5$.

4.5. Визначити силу тяги моторного трамвайного вагона, якщо потужність на валові одного тягового двигуна $P_2 = 40 \text{ кВт}$, частота обертання $n = 1200 \text{ об/хв}$, передаточне число редуктора $\mu = 7,17$, ККД механічної передачі $\eta_s = 0,96$, діаметр рушійних коліс $D = 0,7 \text{ м}$.

4.6. Тяговий двигун послідовного збудження ДК-261А має наступні номінальні дані: $U_{ном} = 275 \text{ В}$; $I_{ном} = 250 \text{ А}$; $n_{ном} = 1460 \text{ об/хв}$; $r = 0,11 \text{ Ом}$. Визначити, як зміниться частота обертання й електромагнітний момент за струму якоря $I = 0,5 I_{ном}$, якщо двигун має наступну криву намагнічування:

$I, \text{ А}$	62,5	83,3	125	250
$\phi, \text{ Вб}$	0,0060	0,0116	0,0162	0,0200

4.7. Для двигуна ДК-261А, номінальні дані якого наведені в задачі 4.6, визначити частоту обертання й електромагнітний момент за струму $I = 0,5I_{ном}$ і ненасиченій магнітній системі машини.

4.8. За наведеними у вигляді таблиці характеристиками двигуна ДК-259Г трамвая КТМ-5М при діаметрі коліс $D = 0,7м$, і передаточному числі механічної передачі $\mu = 7,143$.

I, A	100	200	250	300
F_k, H	3500	8000	10250	12500
$V, км/год$	56,0	33,5	28,5	26,5

Розрахувати й побудувати характеристики цього двигуна при діаметрі коліс $D = 0,68м$ і передаточному числі механічної передачі $\mu = 6,71$

4.9. За даними табл. 4.1 побудувати універсальні відсоткові характеристики двигунів послідовного збудження міського електричного транспорту.

Таблиця 4.1 - Універсальні відсоткові характеристики двигунів послідовного збудження ЕРС МЕТ

Двигуни	Показники	Значення показників при різному відношенні $(I/I_q)100\%$									
		30	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Рухомого складу міського транспорту	$(V/V_q)100\%$	180,0	147,5	121,0	108,5	100,0	93,5	88,5	84,5	81,0	78,5
	$(F/F_q)100\%$	14,8	25,9	49,7	74,3	100,0	126,8	154,3	182,0	210,8	238,0
	$(\eta/\eta_q)100\%$	88,7	95,6	100,1	100,8	100,0	98,8	97,6	96,2	94,8	93,5
Рухомого складу метрополітену	$(V/V_q)100\%$	–	180,3	134,0	112,3	100,0	91,2	84,9	80,3	76,6	73,8
	$(F/F_q)100\%$	–	19,2	43,6	71,0	100,0	130,8	162,6	194,7	226,2	257,0
	$(\eta/\eta_q)100\%$	–	86,4	97,4	99,7	100,0	99,4		97,7	96,3	94,8

4.10. За даними табл. 4.1 розрахувати й побудувати характеристики $V(I)$, $F(I)$, $\eta(I)$ двигунів ДК-261А ($V_q = 31,27км/год$, $F_q = 6670Н$, $\eta_q = 0,843$) і ДК-117А ($V_q = 40,8км/год$, $F_q = 9380Н$, $\eta_q = 0,859$) для номінального режиму роботи.

5. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основні теоретичні положення

Регулювання швидкості руху електрорухомого складу (ЕРС) здійснюється шляхом регулювання кутової швидкості валу тягового двигуна, тому що передаточне число механічної передачі (редуктора) не змінюється.

Регулювання кутової швидкості (частоти обертання) двигуна можливо зміною опору додаткового резистора в колі якоря R , магнітного потоку ϕ й підведеної до якоря напруги U .

Характеристики за зміни підведеної напруги можна розрахувати за навантажувальними характеристиками двигуна й даними про його механічні й магнітні втрати або визначити приблизно шляхом перерахувань на основі заданих характеристик для будь-якого одного з режимів роботи двигуна.

Перерахування швидкості за зміни напруги, підведеної до тягового двигуна послідовного, незалежного або змішаного збудження з незалежною обмоткою, у якого магнітний потік не залежить від напруги, здійснюється за формулою

$$V_1 = V \frac{U_1 - rI}{U - rI}. \quad (5.1)$$

При регулюванні швидкості зміною напруги на двигуні за допомогою ввімкненого послідовно з якорем резистора швидкість

$$V_R = V \frac{U - rI - RI}{U - rI}, \quad (5.2)$$

де U – загальна напруга на двигуні й резисторі.

Характеристика електромагнітної сили тяги $F_{эм}(I)$ двигуна послідовного й незалежного збудження не змінюється при зміні напруги, тому що магнітний потік не залежить від напруги. Характеристику $F_{к}(I)$, приймають звичайно не залежною від напруги, тому що зміна втрати сили тяги $\Delta F_{к}$, незначна порівняно з $F_{ем}$. Вона не змінюється й при введенні до ланцюга якоря резистора.

Зміни напруги впливають на ККД тягового двигуна. При зниженні напруги ККД збільшується на ділянці малих навантажень, внаслідок зменшення механічних і магнітних втрат, і знижується при середніх і особливо великих навантаженнях через збільшення питомого значення електричних втрат, які при певному струмі не залежать від напруги.

Характеристику ККД $\eta_1(I)$ при зміні напруги від значення U , до значення U_1 , можна розрахувати за виразом

$$\eta_1 = 1 - (1 - \eta) \frac{U_1}{U} - \frac{rI}{U_1} \left(1 - \frac{U_1^2}{U^2} \right), \quad (5.3)$$

якщо вважати, що за однакових струмів магнітні й механічні втрати у двигуні й передачі пропорційні квадрату швидкості, а отже, і квадрату напруги.

Викладені методи перерахування характеристик можуть бути застосовні й до двигунів змішаного збудження з паралельними обмотками, якщо зміна напруги здійснюється перегрупуванням двигунів або введенням у їхній якірний ланцюг резисторів.

Для врахування впливу на швидкість коливань напруги контактної мережі, коли одночасно змінюється напруга, підведена до якорів і обмоток паралельного збудження, роблять перерахунок характеристик у два етапи. Їх перераховують на змінену напругу при незмінній МРС за рівнянням

$$V_2 = V_1 \frac{U_2 - (r_a + \alpha r_e)I}{U_1 - (r_a + \alpha r_e)I}, \quad (5.4)$$

де $r_a = r_{oa} + r_{on}$ – сумарний опір обмоток якоря й додаткових полюсів; r_e – опір послідовної обмотки збудження; α – коефіцієнт регулювання МДС послідовної обмотки збудження, і далі на змінений струм паралельного збудження, що змінюється пропорційно напрузі контактної мережі,

$$I_{u2} = I_{u1} \frac{U_2}{U_1}. \quad (5.5)$$

Наближений метод побудови характеристик двигуна змішаного збудження показаний на рис. 5.1. Електромеханічні характеристики цих двигунів зазвичай задають для ряду струмів $I_u = const$. МРС порушення визначають за виразом

$$F_m = I_u w_u + I w_c, \quad (5.6)$$

де I – струм якоря;

I_u – струм у паралельній обмотці збудження;

w_u , w_c – кількість витків на один головний полюс відповідно для обмоток паралельного й послідовного збудження.

Якщо потрібно побудувати характеристику для нового проміжного значення I_u , то за вихідну характеристику беруть найближчу до шуканого при більшому струмі I_u .

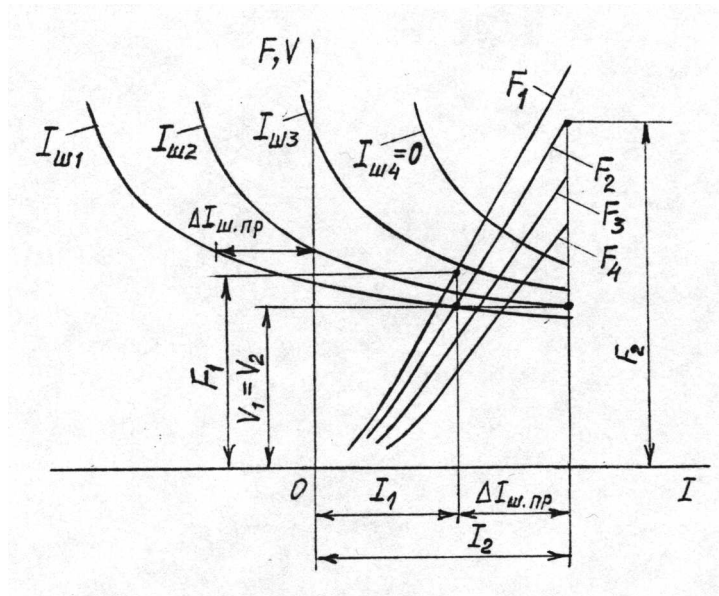


Рис. 5.1 - Наближений метод побудови електромеханічних характеристик двигуна змішаного збудження

Позначивши індексом 2 значення шуканої, а індексом 1 – вихідної характеристики з умови рівності МРС $F_{m1} = F_{m2}$ і швидкостей $V_1 = V_2$, одержимо для тягового режиму

$$I_{w1}w_w + I_1w_c = I_{w2}w_w + I_2w_c,$$

звідки
$$I_2 = I_1 + (I_{w1} - I_{w2})(w_w/w_c) = I_1 + \Delta I_{w.np}, \quad (5.7)$$

де
$$\Delta I_{w.np} = (I_{w1} - I_{w2})(w_w/w_c) = const \quad (5.8)$$

– приведена до кількості витків w_c різниця струмів у паралельній обмотці.

Отже, при побудові шуканої швидкісної характеристики досить при однаковій швидкості збільшити струм вихідної характеристики на $\Delta I_{w.np}$.

Характеристику сили тяги можна побудувати наступним наближеним способом: при $V_2 = V_1$ прийемо $C\phi_2 \approx C\phi_1$ й $\Delta F_2 \approx \Delta F_1 \approx \Delta F$, далі відповідно до формули $F = F_{эм} - \Delta F = 3,6C\phi I - 3,6(\Delta P_m + \Delta P_{мх} + \Delta P_3)/V$ одержуємо $(F_1 + \Delta F)/(F_2 + \Delta F) = I_1/I_2$, звідки

$$F_2 = (I_2/I_1)F_1 + \Delta F(\Delta I_{w.np}/I_1). \quad (5.9)$$

При побудові характеристик наближеним методом неточність виходить тим більшою, чим більше різниця між точками вихідної характеристики й характеристики, яка буде побудована, тобто чим більше $\Delta I_{w.np}$.

Спрощені способи перерахування характеристик при зміні магнітного потоку припустимі тільки для двигунів послідовного збудження. Для регулювання швидкості магнітний потік звичайно зменшується порівнянно з номінальним за рахунок зниження струму збудження, що пояснюється

наступними чинниками. Збільшення магнітного потоку вимагає підвищення струму збудження вище номінального, що викличе додаткове нагрівання обмотки збудження. Крім того, двигун розрахований і сконструйований таким чином, що його магнітна система близька до насичення, тому збільшення струму збудження не призведе до помітного збільшення магнітного потоку.

Посилення збудження застосовують у деяких випадках, в основному на моторних вагонах під час пуску, для збільшення пускової сили тяги, а, отже, і прискорення. У цьому випадку тягові двигуни розраховують на нормальний режим не при максимальному, а при меншому струмі збудження, тобто при шунтованій обмотці збудження.

Ступінь зміни магніторушійної сили (МРС) оцінюють коефіцієнтом регулювання збудження α . Для обмоток послідовного збудження α дорівнює відношенню зміненої МРС до МРС, створюваної струмом збудження I_e , яке дорівнює струму якоря I . У випадку шунтування обмотки збудження

$$\alpha = \frac{W_c I_e}{W_c I} = \frac{I_e}{I} = \frac{R_{ш}}{R_{ш} + r_e}, \quad (5.10)$$

де W_c – кількість витків обмотки збудження; r_e і $R_{ш}$ – опір обмотки збудження й опір шунта.

Для наближеного перерахування й побудови швидкісної характеристики $V(I)$ двигуна послідовного збудження, що відповідає ослабленому збудженню ($\alpha < 1$), необхідно абсциси кожної точки характеристики $V(I)$, що відповідає повному збудженню ($\alpha = 1$), збільшити в $1/\alpha$ разів.

Для наближеного перерахування й побудови характеристики сили тяги $F_k(I)$, що відповідає ослабленому збудженню, необхідно абсциси й ординати кожної точки характеристики, що відповідає повному збудженню, збільшити в $1/\alpha$ раз.

Тягову характеристику $F_k(V)$, що відповідає ослабленому збудженню, будують за допомогою збільшення в $1/\alpha$ раз ординат усіх точок характеристики, що відповідає повному збудженню.

Якщо вихідними є характеристики двигуна при коефіцієнті регулювання збудження $\alpha_0 \neq 1$, для перерахування їх на коефіцієнт регулювання α , використовують викладену методику, але замість коефіцієнта α підставляють до усіх формул відношення α/α_0 .

Розрахунок ККД двигуна при різних значеннях α проводять на підставі даних стосовно його магнітних та механічних втрат та стосовно втрат на механічній передачі, а також з урахуванням того, що електричні втрати $r_e I^2$ на обмотці збудження при $\alpha = 1$ й струмі I , стають рівними $\alpha r_e I^2$.

Зі зменшенням α при тому ж струмі якоря зростає швидкість і відповідно зменшується сила тяги. ККД при малих навантаженнях (струмах) знижується з ослабленням збудження через більшу швидкість і, отже, збільшенням механічних втрат. Відповідно до збільшення навантаження при $\alpha < 1$ усе більшого значення набуває зниження електричних втрат, внаслідок чого при середніх і більших навантаженнях ККД збільшується зі зменшенням α .

Регулювання сили тяги F_k робимо зміною струму якоря двигуна за допомогою зміни напруги, що підведена до двигуна, або ослаблення його поля збудження. Відзначимо, що регулювання струму й сили тяги (моменту) може здійснюватися тільки в динамічному (перехідному) режимі електропривода, оскільки у сталому режимі струм і сила тяги (момент) двигунів визначаються їхнім механічним навантаженням.

За умовами нагрівання, двигун не може бути навантажений на характеристиках, що відповідають ослабленому збудженню ($\alpha < 1$), номінальним моментом, тому що при $I = I_{ном}$ змінений потік $\phi_{II} < \phi_{ном}$ і $M_{доп} = C_M \phi_{II} I_{ном} < M_{ном} = C_M \phi_{ном} I_{ном}$. Оскільки нагрівання двигуна визначається головним чином втратами енергії у ньому, пропорційними квадрату струму, його нормативне нагрівання буде відбуватись при протіканні струму $I = I_{ном}$.

При роботі двигуна на характеристиках, що відповідають ослабленому збудженню, він може бути навантажений на свою номінальну потужність, тому що при зниженні моменту за рахунок зменшення магнітного потоку одночасно підвищується швидкість двигуна, а їхній добуток залишається незмінним і дорівнює номінальній потужності. Таким чином, цим способом доцільно регулювати швидкість при постійній механічній потужності навантаження, що забезпечить повне використання двигуна при роботі на всіх штучних характеристиках.

ЗАДАЧІ

5.1. Тяговий двигун послідовного збудження ДК-211Б має наступні номінальні показники: $U = 550В$, $P_2 = 150кВт$, $n = 1860об/хв$, $\eta_d = 0,91$, $r = 0,12Ом$. Визначити струм і ЕРС якоря, потужність на валові, частоту обертання й ККД, якщо напруга, що підведена до двигуна, знизиться на 20%, а моменти на валові і якорі (електромагнітний момент) не зміняться.

Рішення. Визначаємо номінальні значення струму й ЕРС якоря, моменту на валові:

$$I = \frac{P_2}{U \eta_d} = \frac{150 \cdot 10^3}{550 \cdot 0,91} = 300 А ;$$

$$E = U - rI = 550 - 0,12 \cdot 300 = 514 В ;$$

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{\pi/30} = \frac{150 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 1860/30} = 770 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За умовою завдання $M_{зм} = C_m \phi I$ не змінився, отже, струм якоря I й магнітний потік ϕ не змінилися.

Розраховуємо значення параметрів після зниження напруги:

$$U_1 = 0,8U = 0,8 \cdot 550 = 440 \text{ В};$$

$$E_1 = U_1 - rI = 440 - 0,12 \cdot 300 = 404 \text{ В};$$

$$P'_1 = U_1 I = 440 \cdot 300 = 132000 \text{ Вт} = 132 \text{ кВт};$$

$$n_1 = \frac{nE_1}{E} = \frac{1860 \cdot 404}{514} = 1462 \text{ об/хв};$$

$$P'_2 = M\omega_1 = \frac{M\pi n_1}{30} = \frac{770 \cdot 3,14 \cdot 1462}{30} = 117827 \text{ Вт};$$

$$\eta_{д1} = \frac{P'_2}{P'_1} = \frac{117827}{132000} = 0,893.$$

Таким чином, при зниженні напруги на 20% й незмінному моменті на валові і якорі двигуна частота обертання знизилася на 21,4%, потужність на валу зменшилася пропорційно зниженню частоти обертання, тому що момент на валові не змінився, КПД зменшився на 1,87% за рахунок відносного зростання втрат на обмотках:

$$\frac{rI^2}{P'_1} = \frac{0,12 \cdot 300^2}{132 \cdot 10^3} = 0,0818 > \frac{rI^2}{P_1} = \frac{rI^2}{UI} = \frac{0,12 \cdot 300^2}{550 \cdot 300} = 0,0655.$$

5.2. Тяговий двигун послідовного збудження ТЕ-022 має наступні номінальні дані: $U = 300 \text{ В}$, $n = 1750 \text{ об/хв}$, $\eta_{д} = 0,911$, $P_2 = 41 \text{ кВт}$, $r = 0,152 \text{ Ом}$, кількість пар паралельних ділянок обмотки якоря $a = 1$, кількість проводів обмотки якоря $N = 290$, кількість пар головних полюсів $p = 2$. Визначити струм і ЕРС якорі, магнітний потік, потужність на валові, частоту обертання й ККД, якщо напруга, що підведена до двигуна, знизиться на 25%, а моменти на валові і якорі (електромагнітний момент) не зміняться.

5.3. Тяговий двигун послідовного збудження ДК-261А має наступні номінальні дані: $U = 275 \text{ В}$, $n = 1460 \text{ об/хв}$, $\eta_{д} = 0,872$, $P_2 = 60 \text{ кВт}$, $r = 0,11 \text{ Ом}$. Діаметр колеса вагона трамваю, на якому встановлений двигун, $D = 0,7 \text{ м}$, передаточне число редуктора $\mu = 7,17$.

Визначити струм і ЕРС якоря; потужність, частоту обертання й ККД на валові двигуна; швидкість V , потужність P і ККД η на ободі коліс за

зниження напруги, що підведена до двигуна на 10% , незмінному опорі руху $W = const$ й незмінній втраті сили тяги $\Delta F_k = const$.

5.4. Задачу 5.3 вирішити за умови підвищення напруги, що підведена до двигуна, на 10% .

5.5. Характеристики на валові тягового двигуна послідовного збудження ТЕ-022 при напрузі $U_{ном} = 300V$, представлені у вигляді табл. 5.1, перерахувати на обід рушійних коліс і потім на напругу $U_1 = 275V$. Побудувати електротягові $V(I)$, $F_k(I)$, $\eta(I)$ і тягові $F_k(V)$ характеристики двигуна при $U_{ном} = 300V$ й $U_1 = 275V$. Номінальний струм якоря $I_{ном} = 150A$, опір обмотки якоря $r_{оя} = 0,079\Omega$, обмотки головних полюсів $r_{zn} = 0,0376\Omega$, обмотки додаткових полюсів $r_{dn} = 0,0354\Omega$, діаметр ведучих коліс $D = 0,7m$, передаточне число редуктора $\mu = 7,36$. Значення втрат потужності $\Delta P_{3\%}$ на механічній передачі залежно від відсоткового відношення спожитого двигуном струму до номінального $100I/I_{ном}$, наведені в табл.5.2.

Таблиця 5.1 - Характеристики на валові двигуна ТЕ-022 при $U_{ном} = 300V$

I, A	$\alpha = 100\%$			$\alpha = 50\%$		
	$n, об/мин$	$M, Н \cdot м$	$\eta_D, \%$	$n, об/хв$	$M, Н \cdot м$	$\eta_D, \%$
50	—	39	—	—	—	—
75	2480	82	90,5	—	39	—
100	2170	128	91,2	4140	69	88,8
150	1780	222	90,1	3010	137	89,5
200	1570	329	88,3	2540	206	88,4
250	1430	436	86,2	2250	284	86,8
300	1320	559	84,2	2040	363	85,4
350	1230		82,5	1870	451	83,8

Таблиця 5.2 - Відносні втрати потужності на механічній передачі

$I_{\%} = \frac{I}{I_{ном}} 100$	200	150	125	100	75	60	50	40	30	25
$\Delta P_{3\%} = \frac{100\Delta P_3}{U_{ном} I}$	6,6	6,3	6,1	6,0	6,1	6,4	6,9	7,6	10,0	11,6

Методичні вказівки. Для перерахування характеристик з вала двигуна на обід коліс необхідно використовувати формули(4.1), (4.2), (4.4),а для перерахування на змінену напругу - (5.1), (5.3).

Опір кола якоря при ослабленні поля

$$r = r_{оя} + r_{dn} + \alpha r_{zn} = r_{оя} + r_{dn} + 0,5r_{zn} .$$

Для визначення втрат потужності $\Delta P_{3\%}$ для значень струму якоря I , наведених у табл.5.1, необхідно за даними табл.5.2 побудувати криву залежності $\Delta P_{3\%}(I)$. Струм якоря

$$I = \frac{I_{\%}}{100} I_{ном} = \frac{I_{\%}}{100} 150 = 1,5I_{\%}, A.$$

5.6. Характеристики $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ тягового двигуна послідовного збудження ДК-211А при $U_{ном} = 550V$ й коефіцієнті регулювання збудження $\alpha_1 = 1$ (повне збудження), задані у вигляді табл.5.3, приблизно перерахувати на коефіцієнт $\alpha_2 = 0,5$. Побудувати криві $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ при повному й ослабленому збудженні.

Таблиця 5.3 - Характеристики двигуна ДК-211А при $U_{ном} = 550V$, $\alpha_1 = 1$

I, A	100	200	300	400
F_k, H	4100	13500	23500	34000
$V, км/ч$	40	27	22,5	20

Рішення. Відповідно до викладеної вище методики перерахування характеристик на ослаблене збудження швидкість не змінюємо, а струм і силу тяги збільшуємо в $1/\alpha_2 = 1/0,5 = 2$ разів; складаємо таблицю нових даних і будуємо за точками характеристики.

Таблиця 5.4 - Характеристики двигуна ДК-211А при $U_{ном} = 550V$, $\alpha_2 = 0,5$

I, A	200	400	600	800
F_k, H	8200	27000	47000	68000
$V, км/ч$	40	27	22,5	20

Характеристики двигуна ДК-211А, задані у вигляді табл.5.3, перерахувати на напругу $U_1 = 440V$. Опір ланцюга якоря двигуна $r = 0,12 Ом$.

Побудувати криві $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ при $U_{ном} = 550V$ й $U_1 = 440V$.

Рішення. Відповідно до викладеного вище методикою перерахування характеристик на змінену напругу силу тяги не змінюємо, а швидкість перераховуємо за виразом (5.1); складаємо таблицю нових даних і будуємо за точками характеристики.

Таблиця 5.5 - Характеристики двигуна ДК-211А при $U_1 = 440V$, $\alpha_1 = 1$

I, A	100	200	300	400
F_k, H	4100	13500	23500	34000
$V, км/год$	31,8	21,4	17,7	15,6

5.8. Характеристики двигуна ДК-211А, задані у вигляді табл. 5.3, перерахувати для випадку включення до кола якоря резистора $R = 10\text{М}$. Опір обмоток двигуна $r = 0,12\text{Ом}$.

Побудувати криві $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ при $R = 0$ й $R = 10\text{М}$.

Рішення. Силу тяги залишити без зміни, швидкість перерахувати за формулою (5.2), скласти таблицю нових даних і за точками побудувати характеристики.

5.9. Задані у вигляді табл. 5.6. характеристики $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ двигуна ТЕ-022 при $U = 300\text{В}$ й коефіцієнті регулювання збудження $\alpha_0 = 0,5$. Ці характеристики приблизно перерахувати на повне збудження ($\alpha = 1$) й побудувати разом із заданими характеристиками.

Таблиця 5.6 - Характеристики двигуна ТЕ-022 за $U = 300\text{В}$, $\alpha_0 = 0,5$

I, A	100	200	300	350
F_k, H	1400	4400	7700	9600
$V, \text{км/год}$	73	45	36	33

5.10. Характеристики $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ тягового двигуна змішаного збудження ДК-210А-3, що відповідають номінальній напрузі $U_{\text{ном}} = 550\text{В}$ й номінальному збудженню та задані у вигляді табл.5.7, приблизно перерахувати на знижену напругу $U_1 = 460\text{В}$ за незмінного значення струму в паралельній обмотці збудження. Побудувати графіки залежностей $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ за $U_{\text{ном}} = 550\text{В}$ й $U_1 = 460\text{В}$.

Таблиця 5.7 - Характеристики двигуна ДК-210А-3 при $U_{\text{ном}} = 550\text{В}$

I, A	100	200	300	400
F_k, H	7500	17000	28000	40000
$V, \text{км/год}$	27,5	22	18,5	16,9

5.11. Завдання 5.10 вирішити за умови підвищення напруги на затискачах двигуна до значення $U_2 = 600\text{В}$.

5.12. Задані у вигляді табл.5.8 характеристики $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ тягового двигуна послідовного збудження ДК-211Б при $U_{\text{ном}} = 550\text{В}$ та коефіцієнті регулювання збудження $\alpha_0 = 0,29$ наближено перерахувати на значення $\alpha = 0,58$. Побудувати криві $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ за $\alpha_0 = 0,29$ та $\alpha = 0,58$.

Таблиця 5.8 - Характеристики двигуна ДК-211Б при $U_{ном} = 550В$ та $\alpha_0 = 0,29$

I, A	100	200	300	400
F_k, H	1300	6000	11500	22700
$V, км/год$	100	66	48	40

5.13 Задані у вигляді табл. 5.9 характеристики $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ тягового двигуна послідовного збудження ДК-261А при $U_{ном} = 275В$ та коефіцієнті регулювання збудження $\alpha_0 = 0,3$ приблизно перерахувати на значення $\alpha = 0,6$. Побудувати спільно криві $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ за $\alpha_0 = 0,3$ та $\alpha = 0,6$.

Таблиця 5.9 - Характеристики двигуна ДК-261А за $U_{ном} = 275В$ та $\alpha_0 = 0,3$

I, A	100	200	300	350
F_k, H	950	3800	7000	8800
$V, км/год$	100	55	40	36

5.14. У номінальному режимі роботи ЕРС якоря тягового двигуна $E_{ном} = 0,9U_{ном}$. Визначити зміни струму якоря I й електромагнітного моменту $M_{эм}$ стосовно їхніх номінальних значень $I_{ном}$ і $M_{эм.ном}$, якщо магнітний потік зменшиться до значення $\phi = 0,8\phi_{ном}$, а частота обертання не зміниться ($n = n_{ном} = const$).

5.15. ЕРС якоря тягового двигуна в певному сталому режимі роботи $E_1 = 0,8U_{ном}$. Визначити зміни струму якоря I й електромагнітного моменту $M_{эм}$ стосовно їхніх сталих значень I_1 і $M_{эм1}$, якщо магнітний потік збільшиться до значення $\phi = 1,2\phi_1$, а частота обертання якоря не зміниться ($n = n_1 = const$).

5.16. У сталому режимі роботи ЕРС якоря двигуна $E_1 = 0,2U$, тобто становить 20% від напруги U на затискачах двигуна. Визначити зміни струму якоря I й електромагнітного моменту $M_{эм}$ стосовно їхніх сталих значень I_1 і $M_{эм1}$, якщо магнітний потік збільшиться до значення $\phi = 2\phi_1$, а частота обертання якоря не зміниться ($n = n_1 = const$).

5.17. Задані у вигляді табл.5.10 характеристики $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ тягового двигуна змішаного збудження ДК-210А-3 приблизно перерахувати на знижену на 20% напругу, тобто на напругу $U_2 = 0,8U_1 = 0,8 \cdot 550 = 440В$. Побудувати спільно криві $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ за $U_1 = 550В$ та $U_2 = 440В$.

Таблиця 5.10 - Електротягові характеристики двигуна ДК-210А-3 за $U_1 = U_{ном} = 550В$, $D = 1,07м$, $\mu = 11,3$

I, A	$\alpha = 100\%$, $I_{ш} = 2,7A$		$\alpha = 50\%$, $I_{ш} = 1,7A$		$\alpha = 31\%$, $I_{ш} = 0,5A$	
	$V, км/год$	F_k, H	$V, км/год$	F_k, H	$V, км/год$	F_k, H
50	32,25	2550	38,0	1960	—	—
75	29,25	4500	34,5	3720	—	—
100	27,0	6660	32,25	5390	—	—
150	24,0	11650	29,0	9200	63,0	—
200	21,5	16650	26,75	13000	54,0	6560
250	20,0	21600	25,2	17000	48,0	9100
300	18,6	27000	24,0	21600	43,25	11950
350	17,5	33100	22,75	26200	40,0	15000
400	16,75	39500	22,0	31400	38,0	18000

Сумарний опір обмоток якоря й додаткових полюсів при температурі $115^\circ C$ $r_{\Sigma} = r_{оя} + r_{дн} = 0,0865 + 0,0493 = 0,1358 Ом$; опір послідовної обмотки збудження при температурі $115^\circ C$ $r_g = 0,0668 Ом$; α – коефіцієнт регулювання МРС послідовної обмотки збудження.

Рішення. Перераховуємо характеристики швидкості $V(I)$ на знижену напругу при незмінній МДС за формулою (5.4), залишаючи силу тяги без зміни.

Наприклад, при $I = 200A$ й $\alpha = 1; 0,5; 0,31$ одержуємо наступні значення швидкості:

$$V_{2(\alpha=1)} = V_1 \frac{U_2 - (r_{\Sigma} + r_g)I}{U_1 - (r_{\Sigma} + r_g)I} = 21,5 \frac{440 - (0,1358 + 0,0668)200}{550 - (0,1358 + 0,0668)200} = 16,86 км/год ;$$

$$V_{2(\alpha=0,5)} = V_1 \frac{U_2 - (r_{\Sigma} + 0,5r_g)I}{U_1 - (r_{\Sigma} + 0,5r_g)I} = 26,75 \frac{440 - (0,1358 + 0,5 \cdot 0,0668)200}{550 - (0,1358 + 0,5 \cdot 0,0668)200} = 21,05 км/год ;$$

$$V_{2(\alpha=0,31)} = V_1 \frac{U_2 - (r_{\Sigma} + 0,31r_g)I}{U_1 - (r_{\Sigma} + 0,31r_g)I} = 54 \frac{440 - (0,1358 + 0,31 \cdot 0,0668)200}{550 - (0,1358 + 0,31 \cdot 0,0668)200} = 42,55 км/год .$$

Перераховані на знижену напругу характеристики представлені в табл. 5.11.

Таблиця 5.11 - Електротягові характеристики двигуна ДК-210А-3 за $U_2 = 440В$ й незмінної МРС

I, A	$\alpha = 100\% , I_{u1} = 2,7A$		$\alpha = 50\% , I_{u1} = 1,7A$		$\alpha = 31\% , I_{u1} = 0,5A$	
	$V_2, км/ год$	F_k, H	$V_2, км/ год$	F_k, H	$V_2, км/ год$	F_k, H
50	25,68	2550	30,28	1960	—	—
75	23,23	4500	27,41	3720	—	—
100	21,4	6660	25,59	5390	—	—
150	18,92	11650	22,92	9200	49,64	—
200	16,86	16650	21,05	13000	42,55	6560
250	15,59	21600	19,74	17000	37,49	9100
300	14,42	27000	18,71	21600	33,6	11950
350	13,48	33100	17,65	26200	30,9	15000
400	12,82	39500	16,98	31400	29,18	18000

За формулою (5.5) розраховуємо значення струму в паралельній обмотці збудження при $U_2 = 440В$:

$$I_{u2(\alpha=1)} = I_{u1(\alpha=1)} \frac{U_2}{U_1} = 2,7 \frac{440}{550} = 2,16A;$$

$$I_{u2(\alpha=0,5)} = I_{u1(\alpha=0,5)} \frac{U_2}{U_1} = 1,7 \frac{440}{550} = 1,36A;$$

$$I_{u2(\alpha=0,31)} = I_{u1(\alpha=0,31)} \frac{U_2}{U_1} = 0,5 \frac{440}{550} = 0,4A.$$

За незмінних значень перерахованої швидкості (див. табл. 5.11) за формулами (5.8), (5.7), (5.9) розраховуємо відповідно приведену різницю струмів у паралельній обмотці збудження $\Delta I_{u,np}$, значення зміненого струму якоря I_2 й зміненої сили тяги F_2 за $\Delta F = 0$.

$$\Delta I_{u,np(\alpha=1)} = (I_{u1} - I_{u2}) \frac{w_u}{w_c} = (2,7 - 2,16) \frac{930}{24} = 20,9A;$$

$$\Delta I_{u,np(\alpha=0,5)} = (1,7 - 1,36) \frac{930}{24} = 13,2A;$$

$$\Delta I_{u,np(\alpha=0,31)} = (0,5 - 0,4) \frac{930}{24} = 3,9A.$$

Тут $w_u = 930$ і $w_c = 24$ – кількість витків на один полюс паралельної й послідовної обмоток збудження.

Значення струму якоря I_2 й сили тяги F_2 за струму якоря $I_1 = 200A$:

$$I_{2(\alpha=1)} = I_1 + \Delta I_{u,np} = 200 + 20,9 = 220,9A;$$

$$I_{2(\alpha=0,5)} = 200 + 13,2 = 213,2A;$$

$$I_{2(\alpha=0,31)} = 200 + 3,9 = 203,9A;$$

$$F_{2(\alpha=1)} = F_1 \frac{I_2}{I_1} = 16650 \frac{220,9}{200} = 18390H;$$

$$F_{2(\alpha=0,5)} = 13000 \frac{213,2}{200} = 13858H;$$

$$F_{2(\alpha=0,5)} = 6560 \frac{203,9}{200} = 6688H.$$

Результати всіх розрахунків подані в табл. 5.12.

Таблиця 5.12 - Електротягові характеристики двигуна ДК-210А-3 за $U_2 = 440V$ й зміненої МДС

I, A	$\alpha = 100\% , I_{ш} = 2,16A$			$\alpha = 50\% , I_{ш} = 1,36A$			$\alpha = 31\% , I_{ш} = 0,4A$		
	I_2, A	$V_2, км/год$	$F_{к2}, H$	I_2, A	$V_2, км/год$	$F_{к2}, H$	I_2, A	$V_2, км/год$	$F_{к2}, H$
50	70,9	25,68	3621	63,2	30,28	2470	53,9	—	—
75	95,9	23,23	5760	88,2	27,41	4365	78,9	—	—
100	120,9	21,4	8059	113,2	25,59	6091	103,9	—	—
150	170,9	18,92	13281	163,2	22,92	9997	153,9	49,64	—
200	220,9	16,86	18390	213,2	21,05	13858	203,9	42,55	6688
250	270,9	15,59	23314	263,2	19,74	17884	253,9	37,49	9246
300	320,9	14,42	28890	313,2	18,71	22536	303,9	33,6	12109
350	370,9	13,48	35086	363,2	17,65	27173	353,9	30,9	15171
400	420,9	12,82	41574	413,2	16,98	32421	403,9	29,18	18180

5.18. Електротягові характеристики двигуна ДК-210А-3, наведені у вигляді табл.5.10, приблизно перерахувати на підвищену на 20% напругу, тобто на напругу $U_2 = 1,2U_1 = 1,2 \cdot 550 = 660V$. Побудувати спільно криві залежностей $V(I)$, $F_k(I)$, $F_k(V)$ за $U_1 = 550V$ й $U_2 = 660V$.

6. ПОРІВНЯННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ РІЗНИХ СИСТЕМ ЗБУДЖЕННЯ

Основні теоретичні положення

До тягових двигунів постійного струму ставляться наступні основні вимоги: електрична й механічна стійкість роботи; рівномірний розподіл навантажень між декількома спільно працюючими двигунами; якомога менша чутливість до коливань підведеної напруги; рівномірне навантаження двигуна й живлючої його системи електропостачання; можливість простого й зручного регулювання швидкості в широких межах; простий перехід на електричне, особливо рекуперативне, гальмування; якомога більш повне використання в умовах експлуатації потужності двигунів; найкраще використання зчпної маси; надійність і простота двигуна й системи керування.

Найважливіші властивості тягових двигунів і ступінь їхньої відповідності переліченим вимогам визначаються формою їхніх характеристик, що, у свою чергу, визначається головним чином способом збудження в них магнітного поля й формою їхніх магнітних характеристик.

Робота тягового двигуна електрично та механічно стійка за дотримання умов

$$\frac{dU_c}{dI} < \frac{dU_k}{dI}; \quad (6.1)$$

$$\frac{dF_k}{dV} < \frac{dW}{dV}, \quad (6.2)$$

де U_c – напруга живильної мережі; $U_k = E + rI$ – напруга на затискачах двигуна; F_k – сила тяги двигуна; W – повний опір руху.

Стійку електричну й механічну рівновагу в усьому діапазоні навантажень і швидкостей мають двигуни послідовного й узгоджено-змішаного збудження. Двигуни паралельного або незалежного збудження електрично й механічно стійкі в діапазонах робочих струмів і швидкостей.

Різниця в діаметрах бандажів колісних пар і розбіжність характеристик на валові тягових двигунів призводить до нерівномірного розподілу навантажень між тяговими двигунами. Нерівномірність у навантаженнях викликає зниження загальної сили тяги моторного вагона (неповне використання зчпної ваги), перегрів найбільш завантажених двигунів і буксування їхніх колісних пар.

Різниця частот обертання двигунів, установлених на даний моторний вагон, при струмі годинного режиму допускається в межах $\pm 4\%$. Різниця в діаметрах бандажів колісних пар одного візка моторного вагона не повинна перевищувати 5мм при випуску із заводського й 8мм - з підйомного ремонтів, а в колісних пар різних візків – відповідно 10 й 15мм.

Ступінь нерівномірності розподілу навантажень між двигунами моторного вагона залежить також від схеми їхнього електричного з'єднання й від жорсткості (форми) їхніх характеристик.

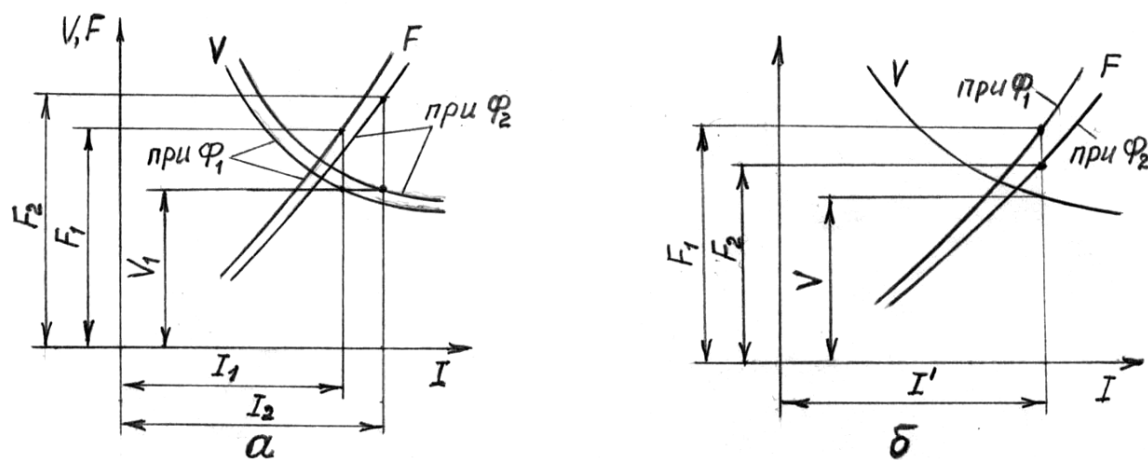


Рис.6.1 - Розподіл навантажень за різних параметрів тягових двигунів у випадку їх паралельного (а) і послідовного (б) з'єднання

Наприклад, якщо два паралельно з'єднані двигуни моторного вагона мають однакові діаметри бандажів колісних пар ($D_1 = D_2$), але різні магнітні потоки головних полюсів ($\phi_1 > \phi_2$), їхньої характеристики швидкості $V(I)$ й сили тяги $F(I)$ мають вигляд, як показано на мал.6.1,а. Як бачимо, значення струмів і тягових зусиль для них за однієї і тієї ж швидкості будуть різними. При цьому найбільш навантаженим виявляється двигун з більшою частотою обертання. Ступінь нерівномірності розподілу навантажень залежить від жорсткості характеристик двигунів.

Розходження струмів і сил тяги паралельно включених двигунів тим більше, чим більша жорсткість їхніх характеристик. Найменші ці розходження якщо двигуни будуть послідовного збудження (рис.6.1), трохи більші - у двигунів узгоджено-змішаного збудження й найбільші - у двигунів паралельного й незалежного збудження.

Якщо у двох паралельно з'єднаних двигунів магнітні потоки головних полюсів однакові ($\phi_1 = \phi_2$), але різні діаметри бандажів їхніх колісних пар (наприклад, $D_1 > D_2$), то характеристика $V(I)$ першого двигуна буде проходити вище, а характеристика $F(I)$ – нижче, ніж другого двигуна. Підбором колісних пар з відповідними діаметрами можна компенсувати різницю характеристик двигунів і усунути нерівномірний розподіл навантажень паралельно з'єднаних двигунів. Для цього повинна бути дотримана умова $n_1 D_1 = n_2 D_2$.

Якщо два тягових двигуни з однаковими діаметрами бандажів колісних пар ($D_1 = D_2$), але з різними характеристиками $n(I)$ з'єднати послідовно, то за певного струму через обидва двигуни різниця в характеристиках викличе

перерозподіл напруги між ними. Двигун з більшим магнітним потоком буде (за однакового струму для обох двигунів) мати більші ЕРС, напругу й тягове зусилля. На рис.6.1,б показана різниця $F_1 - F_2$ в тягових зусиллях для випадку, коли магнітний потік першого двигуна більше магнітного потоку другого ($\phi_1 > \phi_2$). Швидкісна характеристика моторного вагона $V(I)$ однакова для обох двигунів.

При послідовному з'єднанні двигунів розходження в електромагнітних моментах, що розвиваються ними, і силах тяги значно менше, ніж при паралельному; воно залежить не від жорсткості характеристик, а тільки від відхилень швидкісних характеристик. При цьому на відміну від паралельного з'єднання найбільш навантаженими виявляються двигуни з меншою частотою обертання.

Якщо до напруги контактної мережі U_κ підключено Z_c послідовно з'єднаних двигунів, які мають однакові опори якірних ланцюгів і обертають колісні пари з однаковими діаметрами бандажів, вони будуть обертатися із частотою

$$n = \frac{1}{\frac{1}{Z_c} \sum_{i=1}^{Z_c} \frac{1}{n_i}}, \quad (6.3)$$

Відповідною до швидкості на ободі коліс

$$V = \frac{1}{\frac{1}{Z_c} \sum_{i=1}^{Z_c} \frac{1}{V_i}}, \quad (6.4)$$

і їх ЕРС, електромагнітні моменти й сили тяги обернено пропорційні частотам обертання n_i (швидкості V_i) i -го двигуна при струмі I й нарузі на затискачах U_κ / Z_c :

$$\begin{aligned} E_1 : E_2 : \dots : E_{Z_c} &= M_{\text{эм1}} : M_{\text{эм2}} : \dots : M_{\text{эм}Z_c} = F_{\text{эм1}} : F_{\text{эм2}} : \dots : F_{\text{эм}Z_c} = \\ &= \frac{1}{n_1} : \frac{1}{n_2} : \dots : \frac{1}{n_{Z_c}} = \frac{1}{V_1} : \frac{1}{V_2} : \dots : \frac{1}{V_{Z_c}}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

В умовах експлуатації рухомого складу напруга в контактній мережі коливається. Коливання напруги в контактній мережі, викликані переміщенням поїздів і зміною їхніх навантажень, безпосередньо впливають на напругу, що підведена до тягових двигунів. Варто розрізняти тривалу поступову зміну напруги, за якої швидкість поїзда встигає досягти значень, близьких до сталих, і різкі короткочасні зміни напруги.

У випадку тривалого зниження напруги, викликаного, наприклад, перебудуванням поїзда на великій відстані від пунктів живлення, при двигунах послідовного й незалежного збудження швидкість поїзда знижується приблизно пропорційно напрузі, тому що не змінюється магнітний потік ϕ . Тому для підтримки необхідної сили тяги не потрібне збільшення струму. У двигунів же паралельного збудження й менше у двигуна змішаного збудження з паралельною обмоткою зниження напруги викликає зменшення струму збудження, а разом з ним - і магнітного потоку. Тому швидкість руху знизиться менше, але для збереження тієї ж сили тяги повинен збільшуватися струм якоря. Зростання навантаження при зниженні напруги погіршує умови роботи тягових двигунів, а також системи електропостачання, тому що призводить до збільшення втрати напруги в ній.

Значно небезпечніші різкі короточасні зміни напруги, за яких швидкість поїзда не встигає помітно змінитися.

При практично миттєвому підвищенні напруги на двигуні, що споживає струм I , з U до $U + \Delta U$ відносно значення сплеску струму якоря після закінчення електричного перехідного процесу

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{U}{rI} \left(\frac{\Delta U}{U} - \frac{\Delta \phi}{\phi} \right) + \frac{\Delta \phi}{\phi}, \quad (6.6)$$

де $\Delta \phi$ – зміна магнітного потоку двигуна, викликана збільшенням струму при послідовному збудженні або підвищенням напруги при паралельному.

У двигуні незалежного збудження з компенсаційною обмоткою $\Delta \phi = 0$, без компенсаційної обмотки – $\Delta \phi < 0$, тому навіть невеликі коливання напруги можуть викликати неприпустимо більші коливання струму (за $\Delta U/U = 0,2$ стрибок струму ΔI перевищить струм I у 5–6 раз).

У двигуні паралельного збудження кидок струму трохи менший, тому що зі зростанням напруги зростає струм в обмотці збудження й магнітний потік. Однак внаслідок того, що коло паралельної обмотки має набагато більшу постійну часу, ніж коло якоря, наростання магнітного потоку відстає за часом від зростання напруги й кидок струму встигає досягти значень, близьких до величини у двигуні незалежного збудження.

У двигуні послідовного збудження збільшення магнітного потоку, зумовлене різким підвищенням напруги, набагато більше, ніж у двигуні паралельного збудження, тому що воно визначається збільшенням струму якоря ΔI , а не напруги ΔU (при $\Delta U/U = 0,2$, $U/rI = 20$ і $\Delta \phi/\phi = (1/3)(\Delta I/I)$ по виразом (6.6) отримаємо $\Delta I/I = 0,54$).

Більш сприятливо протікає у двигуні послідовного збудження й перехідний процес, тому що відставання магнітного потоку від струму тут зумовлене тільки дією вихрових струмів.

Регулювання швидкості тягового двигуна в тяговому режимі проводять відповідно до формули $V = (U - rI) / C\phi$. Способи зміни підведеного до тягового двигуна напруги практично однакові при всіх системах збудження.

У двигунах паралельного й змішаного збудження регулювання магнітного потоку значно простіше, ніж у двигунах послідовного збудження, тому що воно здійснюється в колах з невеликими струмами шляхом зміни опору резистора, включеного послідовно з обмоткою паралельного збудження.

Найбільш досконалим є регулювання магнітного потоку при незалежному збудженні, тому що струм збудження не залежить від напруги на двигуні й може бути автоматично змінений за заданим законом у функції напруги.

Істотною перевагою паралельного збудження є можливість автоматичного переходу з тягового режиму до генераторного при підвищенні швидкості або збільшенні струму збудження.

М'які характеристики тягового двигуна послідовного збудження сприятливі з погляду навантаження, як самого двигуна, так і системи електропостачання. Оскільки при збільшенні сили тяги в цих двигунів знижується швидкість, потужність, що розвивається ними, FV зростає не пропорційно силі тяги, як у двигунів паралельного й незалежного збудження при їх майже постійній швидкості, а в значно менше. Чим рівномірніше навантаження, тим менш ефективний струм двигуна, а, отже, і необхідна його потужність, а також менше втрати енергії й втрати напруги в системі електропостачання.

Жорсткі характеристики тягових двигунів незалежного збудження сприяють більш повному використанню потужності й тягових властивостей електрорухомого складу, ніж м'які характеристики двигунів послідовного збудження, за яких трудніше відновити пошкоджене зчеплення.

Зіставляючи переваги й недоліки тягових двигунів різних систем збудження, можна дійти висновку, що для ЕРС постійного струму з реостатно - контакторним і імпульсивним керуванням найбільш прийнятними є тягові двигуни послідовного збудження й двигуни змішаного збудження.

ЗАДАЧІ

6.1. Графічно визначити зовнішню електричну стійкість роботи тягових двигунів постійного струму різних систем збудження при сталій напрузі, що до них підведена.

6.2. Графічно визначити механічну стійкість роботи тягових двигунів постійного струму різних систем збудження, що працюють у режимі тяги, при сталій напрузі, що до них підведена.

6.3. Різниця частот обертання двох тягових двигунів послідовного збудження при струмі часового (номінального) режиму становить 4%. Яке буде розходження в силах тяги, що розвиваються ними, при їхньому послідовному з'єднанні, якщо:

1) діаметри бандажів колісних пар однакові;

2) діаметри бандажів колісних пар відрізняються на 1% ?

6.4. Два тягових двигуна послідовного збудження Дк-261А при $U_{ном} = 275V$ й $I_{ном} = 250A$ мають частоти обертання $n_1 = 1430 об/мин$ й $n_2 = 1480 об/мин$. Якою буде частота обертання двигунів при їхньому послідовному включенні на напругу контактної мережі $U_k = 550V$, якщо струм навантаження двигунів $I = I_{ном} = 250A$ і діаметри бандажів колісних пар однакові? У якому співвідношенні будуть перебувати їх ЕРС, електромагнітні моменти й електромагнітні сили тяги, якщо опори якірних кіл двигунів однакові?

7. ПУСК ПОЇЗДА

Основні теоретичні положення

Пусковий період дуже впливає на процес руху поїзда. Для досягнення високих середніх швидкостей на порівняно коротких перегонах і зниження витрати енергії поїзда під час пуску забезпечують велике прискорення за рахунок якомога більших пускових струмів. Однак пусковий струм і пускова сила тяги обмежені найбільшим припустимим струмом тягових двигунів і умовами зчеплення, а в деяких випадках і потужністю системи електропостачання. Тому пуск поїзда доцільно здійснювати при найбільш припустимому за цих обмежень струмі двигунів, підтримуючи цей струм з потреби незмінним протягом пускового періоду. Незмінному пусковому струму I_n відповідає незмінний магнітний потік ϕ_n , а отже, незмінна пускова сила тяги F_n й приблизно постійне пускове прискорення a_n .

Регулювання швидкості руху поїзда й сили тяги тягових машин у процесі пуску поїзда з метою забезпечення необхідних прискорень здійснюють шляхом зміни напруги й магнітного потоку тягових машин. Починаючи з моменту, коли нерухомий поїзд ($V=0$) рушає з місця, й до розгону його до так званої пускової швидкості V_n , швидкість регулюється зміною напруги U_δ на затискачах двигуна при коефіцієнті ослаблення збудження $\alpha=1$ (повне поле). Напруга U_δ регулюється таким чином, щоб відповідно до збільшення швидкості V підтримувати незмінним струм I_n в обмотці якоря й силу тяги F_{kn} машини (рис.7.1). Напруга змінюється від $U_{\delta\min} = rI_n$ до $U_{\delta\text{ном}}$, після чого для реалізації більших значень сили тяги регулюється коефіцієнт α , а отже, магнітний потік тягової машини. Коефіцієнт α змінюють від $\alpha=1$ до $\alpha=\alpha_{\min}$, тим самим забезпечуючи збільшення швидкості руху від значення V_n до значення V_n' при збереженні незмінним середнього значення струму I_n в обмотці якоря машини. Значення α_{\min} обмежується потенційними й комутаційними умовами на колекторі тягової машини. Подальший розгін тягової машини до припустимої максимальної швидкості V_{\max} триває за звичайною характеристикою ослабленого збудження тягової машини.

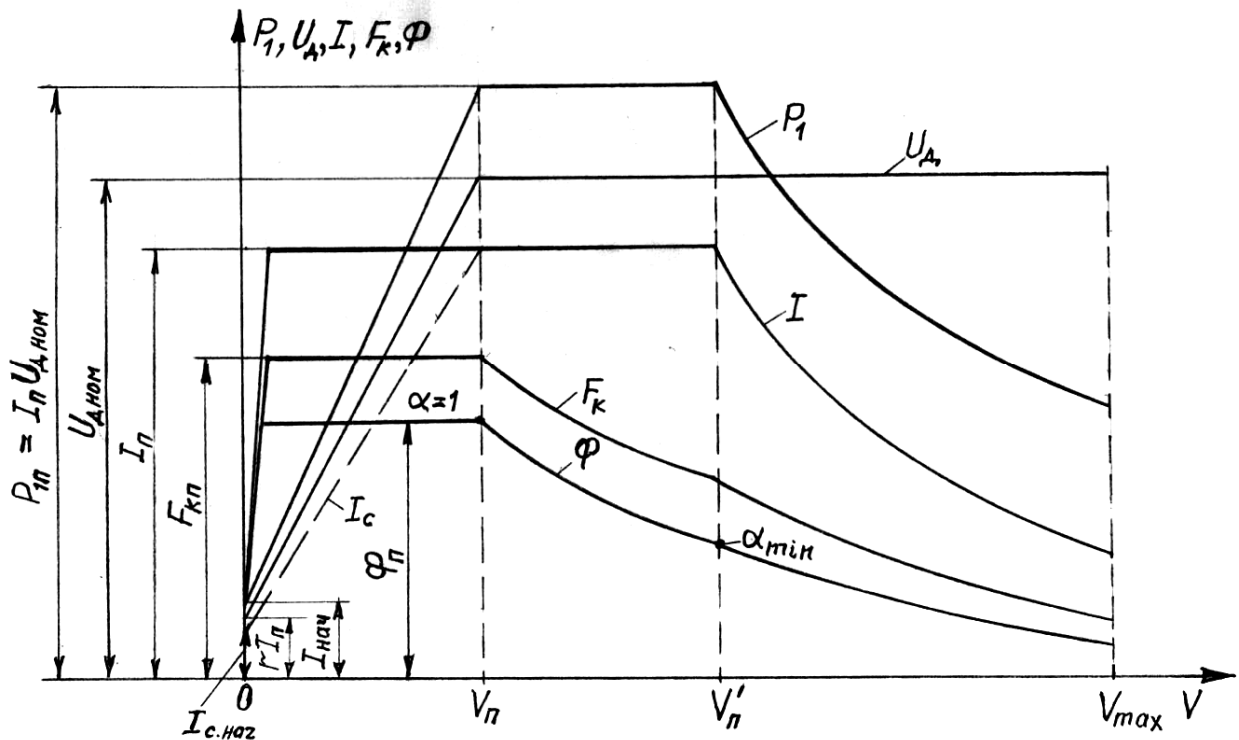


Рис.7.1 - Криві зміни параметрів режиму роботи тягового двигуна залежно від швидкості

Робота тягових машин на характеристиці ослабленого збудження за часом становить значну частину в періоді розгону ЕРС до максимальної швидкості руху, тому реалізація на цій ділянці швидкостей граничних значень сили тяги може дати помітний вигаш у скороченні тривалості розгону навіть при порівняно невеликому збільшенні сили тяги. За досягнення максимальної швидкості на горизонтальній ділянці шляху прискорення зменшується від $a_n = 1,2-1,5 м/с^2$ до $a_{min} = 0,2-0,3 м/с^2$.

При імпульсному регулюванні напруги U_0 на двигуні середнє значення струму двигуна I_n підтримується постійним, а середній струм I_c , спожитий з контактної мережі двигуном у процесі його пуску, змінюється від деякого мінімального значення $I_{c,нач}$ до значення струму двигуна I_n при швидкості $V = V_n$ (рис.7.1).

Щоб забезпечити плавний рух рухомого складу з місця під час пуску й запобігати ударам у механічній передачі від вала двигуна до рушійних коліс і в зчіпних приладах, необхідно обмежити струм на момент включення тягових двигунів, а потім поступово збільшувати його, а тим самим і силу тяги до найбільших припустимих значень, за яких здійснюється пуск поїзда.

Плавний рух рухомого складу з місця під час пуску відбувається в тому випадку, якщо початкове прискорення $a_{поч}$ не перевищує $0,3-0,4 м/с^2$ при ненавантаженому рухомому складі.

При збільшенні швидкості в межах від $V = V_n$ до $V = V_n'$ сила тяги двигуна F_k зменшується, це впливає зі співвідношення $P_{1n}\eta = I_n U_{\text{двигуна}} \eta = F_k V$, обернено пропорційно швидкості V , тому що $P_{1n} = \text{const}$. При збільшенні швидкості від V_n' до V_{max} зменшується спожитий двигуном струм і його потужність, а сила тяги зменшується приблизно обернено пропорційно квадрату швидкості.

На ЕРС постійного струму з контакторно - реостатним керуванням напругу на двигуні U_d регулюють за допомогою зміни опору пускового резистора R , включеного послідовно із двигуном, і для розгону двигуна з незмінним пусковим струмом I_n необхідно зі збільшенням швидкості безупинно зменшувати опір пускового резистора за законом

$$R = R_0 \left(1 - \frac{V}{V_n} \right), \quad (7.1)$$

де $R_0 = U/I_n - r$ – початковий пусковий опір при $V = 0$;

U – загальна напруга на двигуні й пусковому резисторі.

Плавна зміна опору пускового резистора (плавний реостатний пуск), що забезпечує сталість пускового струму, пов'язана зі значними труднощами. Тому опір пускового резистора в більшості випадків змінюють не безупинно, а окремими частинами, що називають ступенями. У цьому випадку пусковий струм змінюється й цю зміну обмежують з потреби вузькими межами від $I_{n \text{ min}}$ до $I_{n \text{ max}}$. Середній пусковий струм

$$I_n = \frac{I_{n \text{ max}} + I_{n \text{ min}}}{2}. \quad (7.2)$$

Нерівномірність пускового струму характеризується коефіцієнтом нерівномірності

$$K_I = \frac{\Delta I_n}{I_n} = \frac{I_{n \text{ max}} - I_{n \text{ min}}}{I_{n \text{ max}} + I_{n \text{ min}}}, \quad (7.3)$$

де $\Delta I_n = (I_{n \text{ max}} - I_{n \text{ min}}) / 2$ – відхилення пускового струму від середнього його значення I_n .

Середній пусковий струм двигуна вибирають відповідно до умови

$$I_n = \frac{I_{n \text{ max}}}{(1 + K_I) K_{\text{зан}}}, \quad (7.4)$$

де $K_{\text{зан}}$ – коефіцієнт запасу, значення якого вибирають залежно від системи керування й кількості ступенів пускового резистора (реостата). Для рухомого складу з автоматичним багатоступінчастим пуском (тролейбус ЗІУ-9; трамвай

РВЗ, КТМ-5М; метро Г, Е, И) $K_I = 0,05 - 0,07$, $K_{зан} = 1,03 - 1,05$. При плавному автоматичному пуску (імпульсивне регулювання, трамвай Т-3) $K_I = 0$, $K_{зан} = 1,0$.

Коливання сили тяги під час пуску трохи більше коливань пускового струму, тому що сила тяги залежить від добутку струму й магнітного потоку. Ці коливання характеризуються коефіцієнтом нерівномірності сили тяги

$$K_F = \frac{\Delta F_n}{F_n}, \quad (7.5)$$

де F_n – середня пускова сила тяги, дорівнює півсумі максимальної $F_{n \max}$ (при струмі $I_{n \max}$) і мінімальної $F_{n \min}$ (при струмі $I_{n \min}$) сил тяги, тобто $F_n = (F_{n \max} + F_{n \min})/2$; ΔF_n – відхилення пускової сили тяги від середньої: $\Delta F_n = (F_{n \max} - F_{n \min})/2$.

Ще більше коефіцієнт нерівномірності прискорення поїзда:

$$K_a = \frac{\Delta a_n}{a_n} = \frac{a_{n \max} - a_{n \min}}{2a_n} = K_F \frac{F_n}{F_n - W}. \quad (7.6)$$

Тому як прискорення a_n пропорційно рівнодійчій силі $F_n - W$, а відхилення Δa_n пускового прискорення від середнього пропорційне відхиленню ΔF_n пускової сили тяги, то коефіцієнт K_a тим більший, чим більше опір руху W , і, отже, менше прискорення поїзда.

У формулі (7.4) під $I_{n \max}$ розуміють менше значення струму, яке визначають з умови комутації й з умови зчеплення:

$$I_{n \max} < I_{ком}; I_{n \max} < I_{сц}, \quad (7.7)$$

де $I_{ком} = 2I_{сц}$ – відповідно до ДЕРЖСТАНДАРТУ на тягові електродвигуни.

Максимальний струм $I_{сц}$ визначається за $F_{кн \max}$ й електромеханічними характеристиками для повного поля або максимальним значенням струму в паралельній обмотці збудження двигуна:

$$F_{кн \max} < 10^3 G_{сц} \psi, H, \quad (7.8)$$

де $G_{сц}$ – вага, що припадає на одну вісь, що рухається κH , ;

ψ – розрахунковий коефіцієнт зчеплення.

Для пасажирського електрорухомого складу обране за (7.4) значення середнього пускового струму I_n перевіряють за максимальним прискоренням, що $a_{дон}$ допускається. Для рухомого складу з автоматичним

багатоступінчастим пуском $a_{\text{дон}} \leq 1,6 \text{ м/с}^2$, при плавному автоматичному пуску $a_{\text{дон}} \leq 2 \text{ м/с}^2$.

Перевірку виконують у наступному порядку. За I_n електромеханічними характеристиками визначають $F_{\kappa n}$. За кривих питомого основного опору руху $w_0(V)$ знаходять значення w_0 для швидкості $V = V_n$. Тоді величина середнього пускового прискорення, м/с^2

$$a_n = \frac{F_{\kappa n} Z_m - w_0 G}{102(1 + \gamma)G}, \quad (7.9)$$

де Z_m – число тягових двигунів у поїзді; G – вага поїзда, кН .

Якщо $a_n < a_{\text{дон}}$, то залишають обране значення пускового струму. Якщо $a_n > a_{\text{дон}}$, то зменшують $F_{\kappa n}$ і відповідно I_n .

Тягові характеристики поїзда $F(V)$ будують на підставі електромеханічних характеристик $V(I)$ і $F_{\kappa}(I)$ двигуна на ободі колеса. Швидкість переносять без змін, а силу тяги поїзда визначають за виразом

$$F = F_{\kappa} Z_m \quad (7.10)$$

Режим пуску на тягові характеристики наносять шляхом переносу режиму пуску з електромеханічних характеристик. При $I_n = \text{const}$ виходить пускова сила тяги поїзда

$$F_n = F_{\kappa n} Z_m.$$

На тягову характеристику поїзда $F(V)$ наносять обмеження:
за швидкістю

$$V_{\text{max}} = V_{\text{констр}}; \quad (7.11)$$

за зчепленням

$$F_{n \text{ max}} = 10^3 G_{\text{осц}} \psi Z_m; \quad (7.12)$$

за потужністю

$$FV = 3,6 P_{\text{пр max}} 10^3, \text{ Вт}, \quad (7.13)$$

де $P_{\text{пр max}}$ – максимальна потужність імпульсного перетворювача, кВт .

За всіх схем реостатного пуску поїзда (з однієї або декількома угрупованнями тягових двигунів) втрати енергії в пускових реостатах пропорційні роботі, виконаній двигунами протягом пуску. Ці втрати практично не залежать від електричних параметрів машин (опору ланцюга якоря, числа щаблів пускового резистора і їхніх опорів) і визначаються механічними параметрами, а саме запасом кінетичної енергії поїзда в сталому режимі й межами зміни швидкостей.

Зменшення втрат енергії у пускових резисторах (пусковому реостаті) практично можна досягти зміною напруги, що підведена до двигунів, тобто зміною при $I_n = const$ потужності, що підведена до мережі. Східчаста зміна напруги та потужності, що підведена з мережі здійснюється зміною схем включення тягових двигунів протягом пуску. Наприклад, при пуску двох або чотирьох тягових двигунів їх можна на початку пуску з'єднати послідовно, а потім паралельно або послідовно-паралельно. Підведена з мережі потужність дорівнює спочатку $U_\kappa I_n$, а потім при переході на паралельне або послідовно-паралельне з'єднання двигунів, вона подвоюється.

Відношення енергії втрат у пускових резисторах (пусковому реостаті) до роботи, виконаної двигунами під час пуску (корисно витраченої енергії), називають коефіцієнтом пускових втрат (коефіцієнтом пуску) K_n . Тому як втрата енергії у пусковому реостаті на кожному щаблі перемикачів пропорційна квадрату збільшення напруги на ній, то коефіцієнт K_n може бути виражений у загальному виді формулою

$$K_n = \sum_{i=1}^{n_2} \frac{(U_i - U_{i-1})^2}{U_\delta^2}, \quad (7.14)$$

де U_i – напруга на затискачах двигунів при i -тому групуванні; U_{i-1} – те ж, при $(i-1)$ -й групуванні, причому для першого групування (щабля) U_{i-1} приймається рівним нулю; U_δ – напруга на затискачах двигуна наприкінці пуску; n_2 – число групувань.

Наприклад, при двоступінчастому пуску чотирьох двигунів і відносному значенні напруг на затискачах двигунів при першому $U_{1*} = U_1 / U_\kappa = 0,25$ й другому $U_{2*} = U_{\delta*} = U_2 / U_\kappa = 0,5$ групуваннях коефіцієнт пуску

$$K_n = \frac{0,25^2 + (0,5 - 0,25)^2}{0,5^2} = 0,5.$$

При однощаблевому пуску $K_n = 1$. При великій кількості ступенів, наприклад при імпульсному пуску втрати можна звести до втрат в імпульсному перетворювачі напруги.

Загальний пусковий опір для одночасного пуску декількох двигунів розраховують за виразом

$$R = \frac{Z_c}{Z_n} R', \quad (7.15)$$

$$\text{де} \quad R' = (U_\kappa / Z_c - CV\phi) / I_n - r \quad (7.16)$$

– пусковий опір при пуску одного двигуна при $U_{\partial} = U_{\kappa} / Z_c$; Z_c – кількість послідовно з'єднаних двигунів; Z_n – кількість паралельних кіл, у кожному з яких послідовно включено Z_c двигунів; U_{κ} – напруга контактної мережі.

Отже, за всіх схем з'єднання двигунів можна вести розрахунок пускового опору R' , віднесеного до одного двигуна, за $U_{\partial} = U_{\kappa} / Z_c$, після чого загальний пусковий опір R розрахувати за виразом (7.15).

Розрахунок пускового опору (кількість й величина опорів ступенів) можна виконати графічним методом. Для цього потрібно побудувати діаграму пуску, що являє собою графічне зображення залежностей опору пускового реостата від швидкості $R(V)$ й струму в обмотці якоря тягової машини від швидкості $I(V)$. Розрахунок і побудова діаграм плавного й східчастого реостатного пуску одного й чотирьох тягових двигунів з послідовним і послідовно-паралельним включенням викладені в [5, с. 107-120].

ЗАДАЧІ

7.1. Визначити за умовами зчеплення граничне значення середнього пускового прискорення вагона трамвая КТМ-5М на горизонтальному шляху. Прийняти основний питомий опір руху $w_0 = 6 \text{ Н/кН}$, коефіцієнт зчеплення $\psi = 0,15$, коефіцієнт інерції обертаючих частин вагона $1 + \gamma = 1,12$, коефіцієнт нерівномірності сили тяги $K_F = 0,1$.

Рішення. З рівняння руху в питомій формі для режиму тяги $102(1 + \gamma)a_n = f_n - w_0$ одержуємо

$$a_n = \frac{f_n - w_0}{102(1 + \gamma)} = \frac{\frac{f_{n\max}}{1 + K_F} - w_0}{102(1 + \gamma)} = \frac{\frac{150}{1,1} - 6}{102 \cdot 1,12} = 1,14 \text{ м/с}^2.$$

Тут $f_{n\max} = f_{cy\max} = 1000\psi = 1000 \cdot 0,15 = 150 \text{ Н/кН}$.

Для вагона трамвая Т-3 коефіцієнт $K_F = 0$ і граничне середнє пускове прискорення

$$a_n = \frac{f_{n\max} - w_0}{102(1 + \gamma)} = \frac{150 - 6}{102 \cdot 1,12} = 1,26 \text{ м/с}^2.$$

7.2. Визначити за умовами зчеплення граничне значення середнього пускового прискорення тролейбуса ЗІУ-9 на горизонтальному шляху. Прийняти $w_0 = 13 \text{ Н/кН}$, $\psi = 0,3$, $1 + \gamma = 1,12$, $K_F = 0,1$.

Рішення. За умовами зчеплення максимальна питома сила тяги тролейбуса $f_{n \max} = 10^3 \cdot 0,6 \cdot \psi = 1000 \cdot 0,6 \cdot 0,3 = 180 \text{ Н/кН}$.

Граничне середнє пускове прискорення

$$a_n = \frac{\frac{f_{n \max}}{1 + K_F} - w_0}{102(1 + \gamma)} = \frac{\frac{180}{1,1} - 13}{102 \cdot 1,12} = 1,32 \text{ м/с}^2.$$

При $f_{n \max} = 10^3 \cdot 0,66 \cdot 0,35 = 231 \text{ Н/кН}$ одержуємо

$$a_n = \frac{\frac{231}{1,1} - 13}{102 \cdot 1,12} = 1,72 \text{ м/с}^2$$

7.3. Визначити значення коефіцієнта пускових втрат K_n при реостатному пуску із трьома групуваннями шести й восьми тягових двигунів електровоза при співвідношенні швидкостей (напруг) на групуваннях відповідно 1:2:3 й 1:2:4.

Рішення. Відповідно до формули (7.14) при пуску шести тягових двигунів

$$K_n = \frac{1^2 + (2-1)^2 + (3-2)^2}{3^2} = \frac{1}{3},$$

при пуску восьми тягових двигунів

$$K_n = \frac{1^2 + (2-1)^2 + (4-2)^2}{4^2} = \frac{3}{8}.$$

7.4. Побудувати діаграму східчастого реостатного пуску двигунів трамвайного вагона КТМ-5М, виходячи з умови нормальної реалізації сили тяги вагона (за умови зчеплення коліс із рейками).

Вихідні дані: маса вагона $m = 25 \text{ т}$ коефіцієнт зчеплення $\psi = 0,15$; коефіцієнт нерівномірності пускового струму $K_I = 0,07$; номінальна напруга на затискачах двигуна ДК-259Г $U_{ном} = 275 \text{ В}$; опір якорного ланцюга $r = 0,12 \text{ Ом}$.

Електричні характеристики двигуна $F_k(I)$, $V(I)$ при повному полі ($\alpha = 1$) задані у вигляді таблиці.

$I, \text{ А}$	100	200	250	300
$F_k, \text{ Н}$	4000	10000	13000	16000
$V, \text{ км/год}$	22	15	14	13

7.5. На підставі технічних даних і характеристик тягових двигунів послідовного збудження, наведених у табл. 7.1 і 7.2, розв'язати наступні задачі.

Таблиця 7.1 - Основні технічні дані тягових двигунів

Параметр	Трамваїв		Тролейбусів	
	ДК-261А	ТЕ-022	ДК-211А	ДК-211Б
Напруга на колекторі U_{∂}, B	275	300	550	550
Потужність на валові $P_r, кВт$	60	41	150	150
Струм годинного режиму I_r, A	250	150	300	300
Частота обертання $n_r/n_{max}, об/хв$	1700/4060	1750/4200	1750/3900	1860/3900
Коефіцієнт корисної дії $\eta_c, \%$	87,3	91,0	91,3	91,3
Клас ізоляції обмотки якоря	Н	В	Н	Н
Кількість пар головних полюсів p	2	2	2	2
Опір r а якоря при $115^{\circ}C, Ом$	0,11	0,15	0,11	0,11

Таблиця 7.2 - Характеристики на ободі колеса при номінальній напрузі й повному полі тягових двигунів трамваю та тролейбуса

I, A	ДК-261А		ТЕ-022		ДК-211А		ДК-211Б	
	$V, км/год$	F_k, H	$V, км/год$	F_k, H	$V, км/год$	F_k, H	$V, км/год$	F_k, H
75	—	—	44	1760	—	—	—	—
100	33,6	2840	38,6	2720	40	4169	41,3	3875
150	26,6	5180	31,6	4730	31,3	8535	32,3	8339
200	22,2	7800	27,9	7000	27	1314	27,2	1294
250	20,0	1078	25,4	9270	24,3	5	24,2	9
300	18,5	0	23,4	1190	22,7	1805	22,7	1795
350	—	1360	21,8	0	21,3	0	21,4	0
400	—	0	—	—	20,4	2315	20,8	2315
		—		—		2		2
		—		—		2849		2854
						8		7
						3374		3384
						6		5
μ	7,17		7,43		11,4		11,4	
D_k, M_m	0,7		0,7		1,07		1,07	
$U_{\partial ном}, B$	275		300		550		550	
K_I	0,07		0,00		0,07		0,07	

Задача 1. Побудувати діаграму східчастого реостатного пуску двигунів поїзда (трамвая, тролейбуса), визначити опір ступенів пускового резистора (реостата) і коефіцієнт нерівномірності сили тяги K_F . Значення максимального пускового струму прийняти рівним $I_{n\max} = 1,5I_{\phi}$.

Задача 2. Визначити середнє пускове прискорення a_n поїзда, коефіцієнт нерівномірності прискорення K_a й пусковий шлях l_n при русі на прямолінійному підйомі з укладом $i = 5\%$. Значення питомого опору руху визначити для швидкості $V = V_n$ за формулами (3.7) і (3.19). Вагу вагона трамвая прийняти рівною $230кН$, тролейбуса – $160кН$, коефіцієнт $K_i = 1 + \gamma = 1,12$.

Задача 3. Перевірити пускову силу тяги поїзда (вагона трамвая, тролейбуса) за умовами зчеплення коліс із рейками (дорожнім покриттям). Розрахункові значення коефіцієнта зчеплення прийняти рівними для трамвая 0,15, для тролейбуса 0,30.

Задача 4. Розрахувати й побудувати реостатні характеристики двигуна $V_R(I)$ для перших трьох ступенів опору пускового резистора.

8. МЕХАНІЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ ПОЇЗДА

Основні теоретичні положення

Кожний тип рухомого складу устаткований, як мінімум, двома незалежними одна від одної системами гальм. На ЕРС міського транспорту застосовується електричне гальмування, що використовують як робоче, і механічне гальмування, що використовується і як аварійне (екстрене), і як робоче при низьких швидкостях руху.

На ЕРС міського транспорту застосовують механічні колісно-колодкові, барабанні, дискові і магнітно - рейкові гальма.

При колісно-колодковому гальмі гальмова сила створюється внаслідок натискання гальмових колодок на колісні бандажі. Гальмова сила поїзда, H ,

$$B = 1000 \sum K \varphi_k, \quad (8.1)$$

де K – сила натискання колодки на бандаж, κH ; φ_k – коефіцієнт тертя між бандажем і колодкою.

Колісно-колодкове гальмо застосовують на залізничному рухомому складі й на вагонах метрополітену. На вагонах трамваю встановлюють барабанне, дискове й магнітно - рейкове гальма. На тролейбусах застосовують барабанні механічні гальма.

На вагонах трамваю гальмові барабани встановлюють на кінець вала якоря тягових двигунів або на хвостовик вхідної шестерні редуктора, на тролейбусах гальмові барабани кріплять безпосередньо до маточин гальмових коліс.

Гальмова сила на ободі гальмових коліс трамваю, H ,

$$B = 10^3 \varphi_k \sum K_n, \quad (8.2)$$

де

$$K_n = \frac{\mu R_\delta}{\eta_z R_k} nK \quad (8.3)$$

- приведена до обода гальмових коліс сила натискання гальмових колодок одного гальмового барабана, κH ;
- μ – передаточне число редуктора;
- R_δ – радіус гальмового барабана, m ;
- R_k – радіус гальмових коліс, m ;
- n – кількість гальмових колодок;
- η_z – ККД редуктора;
- K – сила натискання на одну гальмову колодку, κH ;
- φ_k – коефіцієнт тертя між поверхнею гальмового барабана й колодкою.

При розрахунку сили K_n на тролейбусах до формули (8.3) слід підставляти значення $\mu = 1$ й $\eta_s = 1$.

При тягових розрахунках зручно користуватися питомими значеннями гальмової сили, $H/\kappa H$:

$$b = \frac{B}{mg} = 10^3 \varphi_\kappa \frac{\sum K_n}{mg} = 10^3 \varphi_\kappa \theta, \quad (8.4)$$

де m – маса поїзда, т; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ;

$$\theta = \frac{\sum K_n}{mg} \quad (8.5)$$

– гальмовий коефіцієнт поїзда, що являє собою приведену силу натискання гальмових колодок поїзда, що припадає на $1\kappa H$ ваги поїзда.

Коефіцієнт тертя φ_κ гальмових колодок об барабан (бандаж) залежить головним чином від матеріалу поверхонь тертя, швидкості руху поверхні тертя гальмового барабана (бандажа) а, отже, швидкості руху, і сили натискання K на гальмову колодку. На значення φ_κ впливають також форма гальмової колодки, стан поверхонь тертя, їхня температура. Значення φ_κ визначають за дослідними даними. Середнє значення φ_κ барабанного гальма лежить у межах 0,28–0,32. За результатами випробувань складають емпіричні залежності φ_κ від швидкості V й сили K натискання на гальмову колодку, виготовлену з певного матеріалу. Ці залежності наведені в довідковій і навчальній літературі.

Найбільше натискання гальмових колодок обмежено умовами зчеплення коліс із рейками (дорожнім покриттям). Відношення найбільш припустимого за умовами зчеплення сумарного натискання гальмових колодок $\sum K_{n \max}$ до сили натискання гальмових коліс на рейки (полотно дороги) G_T називають коефіцієнтом натискання гальмових колодок

$$\delta = \frac{\sum K_{n \max}}{G_T}. \quad (8.6)$$

За умови, що всі осі (колеса) рухомого складу гальмові й, отже, гальмова вага $G_T = m_T g$ дорівнює вазі поїзда $G = mg$, найбільший гальмовий коефіцієнт буде дорівнювати коефіцієнту натискання: $\theta_{\max} = \delta$. Таке значення гальмового коефіцієнта вибирають для екстреного (аварійного) гальмування. При робочому гальмуванні $\theta = (0,6-0,7)\theta_{\max}$. У розрахунках приймають для вагонів метрополітену при колісно-колодковому гальмі $\delta = 0,5-0,6$; для вагонів трамваю при барабанних і дискових гальмах $\delta = 0,7-0,9$; для

тролейбусів $\delta = 1,5 - 2,0$; для трамвайних вагонів з магнітно - рейковим гальмом $\delta = 2$.

У магнітно - рейкових гальмах гальмова сила виникає в результаті притиснення до рейок силами електромагнітного притискання спеціальних сталевих гальмових черевиків і передається на візок через їх боковини. Тому, реалізовані гальмові сили не обмежені зчепленням коліс із рейками. Сучасні конструкції рейкових електромагнітних гальм дозволяють одержати сили притискання приблизно 50кН на 1м довжини черевика й реалізувати вповільнення $3,5 - 4,0 \text{м/с}^2$.

Гальмова сила поїзда, H

$$B = 1000 \sum K_n \varphi_{mp} \quad (8.7)$$

і відповідній цій силі питома гальмова сила поїзда, $H/\kappa H$

$$b = 1000 \varphi_{mp} \frac{\sum K_n}{mg} = 1000 \varphi_{mp} \theta_{mp}, \quad (8.8)$$

де $\sum K_n$ – сумарна сила притискання гальмових черевиків, κH ; $\theta_{mp} = \sum K_n / mg$ – гальмовий коефіцієнт натискання гальмових черевиків; φ_{mp} – коефіцієнт тертя гальмового черевика об рейку, що залежить від стану й матеріалу поверхонь тертя, а також від швидкості руху.

У зв'язку з різким зниженням значення φ_{mp} при збільшенні швидкості руху магнітно - рейкове гальмо знайшло застосування головним чином як аварійне гальмо і як засіб утримання рухомого складу на зупинці.

Силу притискання черевика до рейки, H розраховують за формулою

$$K_n = \frac{\phi_\delta^2}{\mu_0 S} = \frac{B_\delta^2 S}{\mu_0}, \quad (8.9)$$

де ϕ_δ – магнітний потік у зазорі між черевиком і рейкою, Вб ; B_δ – магнітна індукція в зазорі, Тл ; S – площа одного полюсного черевика, м^2 ; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{Гн/м}$ – магнітна постійна.

При колодкових гальмах гальмова сила зменшується із зростанням швидкості швидше, ніж зростає питомий основний опір руху w_{0x} , що при русі на спусках зумовлює механічну нестійкість процесу гальмування. Однак це не є перешкодою для застосування механічного гальмування, тому що завдяки великій інерції поїзда механічні перехідні процеси йдуть повільно й машиніст має можливість регулювати гальмову силу для підтримки незмінної швидкості руху.

Загальна умова стійкості режиму гальмування має вигляд

$$\frac{d(b+w_{0,x})}{dV} > 0, \quad (8.10)$$

тобто гальмова характеристика $B(V)$ механічно стійких систем гальмування повинна мати висхідний характер (гальмова сила поїзда повинна автоматично зростати при збільшенні швидкості руху). Механічно стійким є процес електричного гальмування.

Гальмова характеристика механічного гальмування поїзда обмежується двома умовами: по-перше, зчепленням, що визначається граничною характеристикою при $\sum K_n = \sum K_{n\max}$, і, по-друге, припустимою швидкістю $V_{\text{т max}}$, зумовлену правилами технічної експлуатації ЕРС.

ЗАДАЧІ

8.1. Визначити силу натискання K_{\max} на гальмову колодку барабанного гальма вагона трамвая КТМ-5М, якщо коефіцієнт натискання гальмових колодок $\delta = 0,6$, передаточне число редуктора $\mu = 7,143$, діаметр рушійного колеса $D = 0,7\text{ м}$, радіус гальмового барабана $R_\delta = 0,1\text{ м}$, ККД механічної передачі $\eta_3 = 0,96$; маса вагона $m = 25\text{ т}$, кількість колодок, що притискаються до гальмового барабана, $n = 2$.

8.2. Розрахувати силу притискання гальмового черевика до рейки, якщо кількість витків котушки збудження $W = 168$, струм $I = 26,4\text{ А}$, площа полюсного наконечника $S = 0,26\text{ м}^2$, зазор між головкою рейки й полюсним наконечником $\Delta = 0,012\text{ м}$.

Рішення. Нехтуємо опором магнітному потоку сталевих ділянок магнітного ланцюга, тоді $\phi_\delta = IW\lambda_m = IW\mu_0 S/\Delta$,

$$K_n = \frac{\phi_\delta^2}{\mu_0 S} = \frac{(IW)^2}{\Delta^2} \mu_0 S = \frac{(26,4 \cdot 168)^2}{0,012^2} \cdot 0,26 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} = 44609\text{ Н}.$$

9. ЕЛЕКТРИЧНЕ ГАЛЬМУВАННЯ

Основні теоретичні положення

Системи електричного гальмування засновані на принципі оборотності електричних машин, тобто на переході тягових машин з рухомого в генераторний режим. Момент, що потрібний для обертання генератора, реалізується на ободі рушійного колеса у вигляді гальмової сили.

При електричному гальмуванні кінетична енергія поїзда, перетворена на електричну енергію, або поглинається на резисторах рухомого складу й розсіюється у вигляді тепла в навколишньому просторі, або повертається до контактної мережі. У першому випадку електричне гальмування є реостатним, у другому - рекуперативним.

Гальмова сила електричного гальмування має ту ж природу, що й сила тяги, але спрямована в бік, протилежний руху поїзда. Гальмова сила B_k , що розвивається одною тяговою машиною при будь-якій системі електричного гальмування, H ,

$$B_k = B_{эм} + \Delta B_k = 3,6 \frac{P_{эм}}{V} + \Delta B_k = 3,6C\phi I + 3,6 \frac{\Delta P_m + \Delta P_{мх} + \Delta P_з}{V}, \quad (9.1)$$

а гальмова сила поїзда при n_o двигунах, H ,

$$B = n_o B_k = n_o (3,6C\phi I + \Delta B_k), \quad (9.2)$$

де ΔB_k – збільшення гальмової сили, викликане магнітними й механічними втратами у двигуні й передачі.

При реостатному гальмуванні тягові машини, що працюють у генераторному режимі, вмикають на так званий гальмовий реостат і їх ЕРС урівноважують сумою спадань напруги на цьому реостаті й самих тягових машинах. Рівняння електричної рівноваги при послідовно-паралельному включенні тягових машин має вигляд

$$n_c CV\phi = n_c r I + n_n R_r I \quad (9.3)$$

або

$$CV\phi = \left(r + \frac{n_n}{n_c} R_r \right) I, \quad (9.4)$$

де R_r – опір гальмового реостата; I – струм якоря машини; n_c – кількість послідовно з'єднаних машин; n_n – кількість паралельних кіл, у кожний з яких послідовно вімкнено n_c машин;

$$\frac{n_n}{n_c} R_r = R'_r \quad (9.5)$$

- опір гальмового реостата, віднесений до однієї машини.

З рівнянь (9.4), (9.5) маємо наступні вирази для струму I якоря машини й швидкості V при електрично сталому режимі реостатного гальмування:

$$I = \frac{CV\phi}{r + R'_r}; \quad (9.6)$$

$$V = \frac{(r + R'_r)I}{C\phi}. \quad (9.7)$$

Характеристики $V(I)$, $B_\kappa(I)$, $B(V)$ реостатного гальмування залежать від схеми збудження тягових машин при генераторному режимі.

Основною перевагою реостатного гальмування тягових машин послідовного збудження є те, що воно здійснюється без додаткового джерела енергії кола збудження й не залежить від напруги в контактній мережі. Істотний недолік такого гальмування полягає в значній тривалості й нестабільності процесу самозбудження генераторів. Час самозбудження залежить від швидкості, опору гальмового реостата, ступеня ослаблення збудження й залишкового магнітного потоку в машині.

При реостатному гальмуванні тяговий двигун послідовного збудження відключається від мережі й замикається на гальмовий реостат. Перехід двигуна в генераторний режим відбувається завдяки потоку, що зберігається в ньому, залишкового магнетизму. Для використання цього потоку необхідно при зміні напрямку струму в якорі залишити незмінним напрямок струму в послідовній обмотці збудження шляхом перемикання або кінців якоря, або кінців обмотки збудження.

Реостатне гальмування одного двигуна послідовного збудження є електрично стійким. Умовою електричної стійкості гальмування є дотримання нерівності

$$\frac{dE}{dI} < (r + R'_r), \quad (9.8)$$

де $E = CV\phi$ – ЕРС обмотки якоря двигуна.

Гальмову характеристику поїзда $B(V)$ будують за кривими електромеханічних характеристик $V(I)$, $B_\kappa(I)$ реостатного гальмування, які можна розрахувати виходячи з певного значення опору гальмового реостата за формулами (9.7), (9.1) і відомою залежністю $C\phi(I)$. Якщо ця залежність не задана, характеристики можна побудувати, користуючись залежністю $V_\delta(I)$ для двигуна з урахуванням того, що $C\phi = (U - rI)/V_\delta$, де V_δ – швидкість тягового режиму, який відповідає напрузі U й струму I , для якого

визначають швидкість і гальмову силу при реостатному гальмуванні. Підставляючи значення $C\phi$, виражене через швидкість тягового режиму, до формул (9.7), (9.1), отримаємо:

$$V = V_0 \cdot \frac{(r + R'_T)I}{U - rI}; \quad (9.9)$$

$$B_\kappa = 3,6 \frac{U - rI}{V_0} I + \Delta B_\kappa. \quad (9.10)$$

Значення $\Delta B_\kappa = 3,6(\Delta P_M + \Delta P_{Mx} + \Delta P_z)/V$ можна знайти приблизно за характеристиками $F_{em}(I)$ і $F_\kappa(I)$ як різницю $\Delta F_\kappa = F_{em} - F_\kappa \approx \Delta B_\kappa$ при певному значенні гальмового струму I . Тому як $B_\kappa = F_{em} + \Delta B_\kappa$, то для побудови кривої $B_\kappa(I)$ треба відкласти в гору від кривої $F_{em}(I)$ відрізки $\Delta B_\kappa \approx \Delta F_\kappa$.

Гальмову силу поїзда розраховуємо за формулою (9.2).

На характеристики реостатного гальмування наносять обмеження. Разом з обмеженнями, загальними для тягового й гальмового режимів – за максимальним струмом I_{max} якоря двигуна (і, відповідно до цього струму, за максимальною гальмовою силою B_{max}), зчепленням (величина B_{max} не повинна перевищувати обмеження за зчепленням, а струм I_{max} , зумовлений характеристикою $B_\kappa(I)$, не повинні перевищувати обмежено за комутацією) і максимальною (конструкційною) швидкістю $V_{max} = V_{констр}$, при реостатному гальмуванні вводиться додаткове обмеження за швидкістю, зумовлене максимально допустимим напруженням U_{max} на колекторі тягового двигуна, що обмежується максимальною ЕРС між колекторними пластинами колектора.

При певному струмі I найбільшу припустиму швидкість V_{max} визначають згідно з рівнянням

$$U_{max} = CV_{max}\phi - rI, \quad (9.11)$$

звідки

$$V_{max} = \frac{U_{max} + rI}{C\phi}. \quad (9.12)$$

Виражаючи $C\phi$ через швидкість V_0 тягового режиму при $U = U_{ном}$, одержимо

$$V_{max} = V_0 \frac{U_{max} + rI}{U_{ном} - rI}. \quad (9.13)$$

За цією формулою можна побудувати криву $V_{\max}(I)$, обмежуючи швидкості за максимальною напругою на колекторі двигуна. Для розрахунку V_{\max} треба взяти ряд значень струму I й за характеристикою $V_o(I)$ рухового режиму при $U = U_{ном}$ визначити відповідні значення V_o .

Небезпека надмірного підвищення напруги на колекторі двигуна пов'язана з тим, що в режимі реостатного гальмування бажано реалізувати більші гальмові сили, пропорційні добутку струму й потоку, при високих швидкостях руху. У цих умовах ЕРС двигуна більша, тому що він повинен працювати при більших магнітних потоках, зумовлених струмом, і високих швидкостях. У тяговому режимі великим струмом i , отже, великим магнітним потокам відповідають порівняно низькі швидкості.

Швидкості двигунів послідовного збудження при струмах близьких до максимальних, зазвичай приблизно у два рази менших найбільших, тому для ефективного використання реостатного гальмування варто було б застосовувати двигуни, що витримують у генераторному режимі дворазове підвищення напруги на колекторі порівняно з номінальним (див. вираз (9.13)). На такі умови в багатьох випадках розраховують тягові двигуни метрополітену й трамваю.

За однакових струмів пускового й гальмового режимів ($I_n = I_T$) максимальний опір гальмового реостата повинний бути приблизно у два рази більшим максимального опору пускового реостата: $R'_{T\max} \approx 2R'_{n\max}$, тому що $U_{\max} \approx 2U_{ном}$, $V_{\max} \approx 2V_n$.

Енергія, що виділяється в опорі гальмового реостата, приблизно пропорційна V_{\max}^2 , а енергія, що виділяється в пусковому реостаті під час пуску, приблизно пропорційна V_n^2 . При співвідношенні $V_{\max} \approx 2V_n$ це означає, що енергія, виділювана в опорі гальмового реостата, буде приблизно у 4 рази більшою за енергію, яка виділяється при пуску в пусковому реостаті, що потребує значного збільшення потужності гальмового реостата порівняно з пусковим.

При реостатному гальмуванні з метою зупинки поїзда бажано підтримувати гальмову силу a , отже, і гальмовий струм незмінними протягом усього періоду гальмування. При двигуні послідовного збудження для цього треба зменшувати гальмовий опір пропорційно зниженню швидкості відповідно до формули (9.6):

$$r + R'_T = V \frac{C\phi}{I}. \quad (9.14)$$

Як і в режимі реостатного пуску, гальмовий опір виводиться не плавно, а окремими щаблями. Межі коливань струму I_{\max} й I_{\min} визначають із тих же міркувань, що й межі пускових струмів, але з урахуванням додаткового обмеження по U_{\max} .

Методика побудови гальмової діаграми (побудова кривих залежностей $I(V)$ і $R_r(V)$) наведена в [5].

Реостатне гальмування тягових двигунів послідовного збудження на спусках механічно стійке, тому що гальмова характеристика $B(V)$ має висхідний характер і виконується загальна умова стійкості режиму гальмування $d(B+W_0)/dV > 0$.

У випадку встановлення на рухомому складі двох або чотирьох двигунів у режимі гальмування їх з'єднують паралельно або послідовно-паралельно, тобто зберігають схему з'єднання двигунів, прийняту для нормальної роботи в тяговому режимі. У цьому випадку не так відчутно зростає напруга й можливе використання пускового реостату.

Однак при паралельному з'єднанні генераторів послідовного збудження доводиться вживати спеціальних заходів для забезпечення їхньої усталеної роботи й рівномірного розподілу навантаження між ними. Таким заходом є включення обмоток збудження однієї групи послідовно з'єднаних генераторів у коло якорів іншої групи генераторів (перехресна схема включення обмоток збудження).

При тягових машинах змішаного збудження, які в тяговому режимі працюють як двигуни узгоджено-змішаного збудження, принципово можливі чотири системи реостатного гальмування: живлення паралельної обмотки від мережі при зустрічному або згодному включенні паралельної й послідовної обмоток; самозбудження тягової машини також при зустрічному або узгодженому включенні обмоток збудження.

Найбільш сприятливі для реостатного гальмування умови створюються при зустрічно - змішаному збудженні з живленням паралельної обмотки від контактної мережі або при незалежному її живленні. У цьому випадку забезпечується інтенсивне збудження при переході на гальмовий режим, стійка паралельна робота тягових машин і рівномірний розподіл навантажень між ними, зручне регулювання процесу гальмування. Для переходу з тягового на гальмовий режим досить відключити якір двигуна від контактної мережі й замкнути його на гальмовий опір. При цьому в порівняно з тяговим режимом напрямок струму в обмотках якоря й послідовного збудження змінюється, внаслідок чого виникає гальмовий режим, тому що магнітний потік зберігає колишній напрямок під дією МРС паралельної обмотки збудження. Для певного двигуна (певній кількості витків паралельної W_u й послідовної W_c обмоток збудження) гальмові характеристики визначаються значеннями струму I_u в паралельній обмотці збудження й гальмового опору R_r . Це дає можливість використовувати на тролейбусах, обладнаних двигунами змішаного збудження, нерегульований опір R_r і для гальмування звичайно досить мати дві або три гальмові характеристики при різних значеннях струму I_u . Керування процесом гальмування при цьому здійснюється досить легко.

З метою раціонального використання обмоток збудження в генераторному режимі поширення набули схеми реостатного гальмування

при виключеній послідовній обмотці або схеми, у яких при гальмуванні послідовна обмотка не відключається і нею протікає струм паралельної обмотки. МРС паралельної й послідовної обмоток збудження складаються, однак МРС послідовної обмотки невеликий і її вплив на загальну МРС несуттєвий. У зазначених схемах у коло обмотки паралельного збудження вводять частину гальмового (стабілізуючого) опору R_r , що дозволяє отримувати гальмові характеристики, подібні до характеристик генератора зустрічно – змішаного збудження.

При контактнорно - реостатному керуванні для здійснення рекуперативного гальмування необхідно, щоб ЕРС тягової машини або сума ЕРС тягових машин при їхньому послідовному з'єднанні перевищувала напругу контактної мережі. Цього можна досягти шляхом збільшення швидкості або магнітного потоку збудження тягових машин.

ЕРС тягового двигуна дорівнює $CV\phi$, вона урівноважує при рекуперації напругу мережі або частину напруги мережі, що припадає на один двигун, а також спадання напруги в ньому, тобто $CV\phi = U + rI$, звідки

$$I = \frac{CV\phi - U}{r}. \quad (9.15)$$

Швидкість руху поїзда при рекуперації

$$V = \frac{U + rI}{C\phi}, \quad (9.16)$$

а при n_c послідовно з'єднаних двигунах

$$V = \frac{U + \sum rI}{n_c C\phi}, \quad (9.17)$$

де $\sum rI$ – сумарне спадання напруги в силовому колі.

Гальмову силу рекуперативного гальмування виражають загальними для всіх видів електричного гальмування формулами (9.1), (9.2).

Коефіцієнт корисної дії при рекуперації являє собою відношення відданої в мережу електричної потужності до механічної потужності гальмування, яка дорівнює $B_k V$:

$$\eta_{рек} = \frac{3,6(UI - \Delta P_n)}{B_k V}, \quad (9.18)$$

де ΔP_n – потужність, Вт, спожита ланцюгами паралельного або незалежного збудження.

За формулами (9.1), (9.2), (9.16), (9.17), (9.18) можна побудувати характеристики рекуперативного гальмування, якщо відома залежність магнітного потоку ϕ від струму рекуперації I .

Електричне гальмування може бути здійснене в тому випадку, якщо схема включення електричних машин при генераторному режимі задовольняє вимозі електричної стійкості. Загальною ознакою зовнішньої електричної стійкості нерозгалужених схем є дотримання в точках електричної рівноваги нерівності

$$\frac{dU_z}{dI} < \frac{dU}{dI}, \quad (9.19)$$

де U_z – напруга генераторів; U – напруга зовнішнього кола.

Отже, для усталеної роботи машини на мережу з постійною напругою необхідно, щоб ця машина мала спадну зовнішню характеристику. Цій умові задовольняють машини незалежного, паралельного й зустрічно – змішаного збудження.

Таким чином, при контакторно - реостатному керуванні для рекуперації можуть бути застосовані тільки системи з незалежним, паралельним і зустрічно – змішаним збудженням.

Простіше всього здійснюється рекуперативне гальмування при тягових машинах змішаного збудження, які автоматично перетворюються при рекуперації на генератори зустрічно - змішаного збудження. Для переходу з двигунного на генераторний режим потрібно збільшувати струм в обмотці паралельного збудження доти, доки ЕРС машин не перевищить напруги мережі. При цьому напрямок струму в якорі зміниться, а напрямок МРС і магнітного потоку залишиться колишнім.

Імпульсне керування ЕРС дозволяє здійснити рекуперацію, навіть якщо ЕРС машин менше напруги мережі й при тягових двигунах послідовного збудження. Можливо також реостатне гальмування із плавним безконтактним регулюванням швидкості, причому й при опорі гальмового реостата, більшим за критичний.

ЗАДАЧІ

- 9.1. Визначити гальмову силу B_k , створену тяговим двигуном послідовного збудження при реостатному гальмуванні, якщо при струмі якоря $I = 200A$ й швидкості $V = 30 \text{ км/год}$ ЕРС якоря $E = 600V$ й сумарні магнітні й механічні втрати у двигуні й тяговій передачі $\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{мх} + \Delta P_z = 4 \text{ кВт}$.

Рішення. Відповідно до формули (9.1) гальмова сила

$$B_{\kappa} = \frac{3,6}{V}(P_{\text{э.м}} + \Delta P) = \frac{3,6}{V}(EI + \Delta P) = \frac{3,6}{30}(600 \cdot 200 + 4000) = 14880 \text{ Н} = 14,88 \text{ кН}.$$

- 9.2. Визначити рівнодіючу B_0 сил, що діють на тролейбус при русі в режимі реостатного гальмування зі швидкістю $V = 25 \text{ км/год}$ на спуску з уклоном $i = -20\%$, якщо маса тролейбуса $m = 15 \text{ т}$, струм якоря тягового двигуна $I = 250 \text{ А}$, ЕРС якоря $E = 500 \text{ В}$, сумарні магнітні й механічні втрати потужності у двигуні й передачі $\Delta P = 3000 \text{ Вт}$.

Рішення.

$$\begin{aligned} B_0 &= B_{\kappa} + W_0 + W_i = \frac{3,6(EI + \Delta P)}{V} + mg(12 + 0,004V^2) + mgi = \\ &= \frac{3,6(500 \cdot 250 + 3000)}{25} + 15 \cdot 9,81(12 + 0,004 \cdot 25^2) + 15 \cdot 9,81 \cdot (-20) = \\ &= 18432 + 2134 - 2943 = 17623 \text{ Н} \end{aligned}$$

- 9.3. Визначити гальмову силу B_{κ} , створену тяговим двигуном тролейбуса, якщо при русі на спуску з уклоном $i = -10\%$ гальмове вповільнення $a_{\text{т}} = 1,2 \text{ м/с}^2$. Середнє значення основного опору руху за період гальмування $W_{0\text{ср}} = 1,5 \text{ кН}$, маса тролейбуса $m = 12 \text{ т}$, коефіцієнт $K_i = 1 + \gamma = 1,15$.

Рішення.

$$\begin{aligned} B_{\kappa} &= m(1 + \gamma)a_{\text{т}} - W_{0\text{ср}} - W_i = 12 \cdot 10^3 \cdot 1,15 \cdot 1,2 - 1,5 \cdot 10^3 - 12 \cdot 9,81(-10) = \\ &= 16560 - 1500 + 1177 = 16237 \text{ Н}. \end{aligned}$$

- 9.4. На підставі технічних даних і характеристик тягових двигунів послідовного збудження, наведених у табл. 7.1 і 7.2, розрахувати й побудувати характеристики $V(I)$, $B_{\text{эм}}(I)$, $V(B_{\text{эм}})$ реостатного гальмування двигуна для трьох значень опору гальмового реостата: $R'_{\text{т1}} = 0$, $R'_{\text{т2}} = U_{\text{мак}}/I_{\text{тмак}}$, $R'_{\text{т3}} = 2U_{\text{мак}}/I_{\text{тмак}}$, де $U_{\text{мак}} = 2U_{\text{ном}}$ – максимальне допустиме напруження на колекторі двигуна; $I_{\text{тмак}} = I_{\text{пмак}} = 1,5I_{\text{ч}}$ – максимальний гальмовий струм. На характеристики нанести обмеження: за швидкістю $V_{\text{констр}} = 65 - 70 \text{ км/год}$; за швидкістю $V_{\text{мак}}$, що відповідає напрузі $U_{\text{мак}}$; за $I_{\text{тмак}}$ й $B_{\text{эммак}}$. Результати обчислень представити у вигляді табл. 9.1.

Таблиця 9.1 - Дані розрахунку характеристик реостатного гальмування двигуна

I, A	$V_{\phi},$ км/год	$U_{ном}, B$	$V_{max},$ км/год	$R'_{r1} = 0$		$R'_{r2} = \dots Ом$		$R'_{r3} = \dots Ом$	
				$V,$ км/год	$B_{эм},$ H	$V_{max},$ км/год	$B_{эм},$ H	$V,$ км/год	$B_{эм},$ H
100									
150									
200									
250									
300									
350									
400									

9.5. На підставі технічних даних і характеристик тягових двигунів послідовного збудження, наведених у табл. 7.1 і 7.2, розрахувати й побудувати східчасту діаграму реостатного гальмування двигуна й визначити значення опорів перших трьох ступенів гальмового реостата. Прийняти $I_{т max} = I_{п max} = 1,5I_{\phi}$, $K_I = 0,07$, $U_{max} = 2U_{ном}$.

9.6. Визначити зовнішню електричну стійкість тягової машини послідовного збудження при роботі в режимах реостатного й рекуперативного гальмування при постійній напрузі мережі живлення.

Методичні вказівки. Перевірку зовнішньої електричної стійкості здійснюють у наступному порядку. Спочатку вибирають швидкість руху, прийняту за постійну $V = const$, і розраховують, використовуючи швидкісну характеристику $V_{\phi}(I)$ режиму двигуна (див. табл. 7.2), залежність ЕРС від струму $E(I)$ за виразом

$$E = C\phi V = \frac{U - rI}{V_{\phi}} V.$$

Далі розраховують і будують в обраному масштабі зовнішню характеристику машини $U_{\phi} = E - rI$ у генераторному режимі роботи. Графік залежності спадання напруги на опорі гальмового реостата $IR'_r(I)$ або залежності $U(I)$ напруги мережі живлення виконують у тих же осях координат. Точка перетину зовнішньої характеристики машини й залежності $IR'_r(I)$ або $U(I)$ є точкою електричної рівноваги в режимі, який установився. Для перевірки стійкості цієї рівноваги припускають виникнення в системі (електричному контурі “машина – R'_r ” або “машина – мережа живлення”) з будь-якої зовнішньої стосовно тягової машини причини (короткочасна зміна зчеплення або зовнішньої напруги) перехідного процесу, що

супроводжується відхиленням струму від установленого значення. Рівняння перехідного процесу в режимі реостатного гальмування $U_{\text{вз}} = IR'_r + L \cdot dI/dt$ й у режимі рекуперативного гальмування $U_{\text{вз}} = U + \alpha dI/dt$, де α – коефіцієнт індуктивності обмоток машини. Загальна умова стійкості полягає в тому, що знаки відхилення струму I і його похідної, а, отже, і величини $\alpha dI/dt$ повинні бути протилежні. У загальному вигляді ця умова може бути виражена нерівністю $(d/dI)(L \cdot dI/dt) < 0$. Отже, зовнішню електричну стійкість машини послідовного збудження характеризують нерівності: для режиму реостатного гальмування $dU_{\text{вз}}/dI < R'_r$; для режиму рекуперативного гальмування $dU_{\text{вз}}/dI < dU/dI$.

Відповідь. Режим реостатного гальмування машини електрично стійкий, режим рекуперативного гальмування не має електричної стійкості.

- 9.7. Методом складання й аналізу диференціальних рівнянь перехідних процесів у електричних контурах визначити внутрішню електричну стійкість паралельної роботи двох тягових машин послідовного збудження в режимі реостатного гальмування на загальний гальмовий опір для звичайної [5, рис.9.14, б] і перехресної [5, рис.9.14, в] схем включення й за наступних допущень: опір та індуктивність якірних кіл обох машин однакові ($r_1 = r_2 = r, L_1 = L_2 = L$), до початку перехідного процесу сталі значення частот обертання, струмів і магнітних потоків машин однакові ($n_1 = n_2 = n, I_{01} = I_{02} = I_0, C_e \phi_{01} = C_e \phi_{02} = C_e \phi_0$), залежність магнітного потоку від струму якоря лінійна $C_e \phi = C_e \phi_0 + KI$.

Методичні вказівки. Внутрішню електричну стійкість складних систем визначають щодо струму тягових машин і розрахунок виконують у наступному порядку:

1. Складають диференціальні рівняння перехідних процесів у незалежних контурах системи.
2. Заміняють нелінійні залежності магнітних потоків від струмів збудження наближеними лінійними.
3. Розв'язують складену систему лінійних диференціальних рівнянь (ЛДУ), у результаті чого одержують диференціальне рівняння вищого порядку відносно струму однієї з тягових машин системи.
4. Складають характеристичне рівняння для ЛДУ вищого порядку й розглядають його коефіцієнти й корені.

Якщо дійсні частини всіх коренів негативні, то система, що, перевіряється, електрично стійка. Коли ця умова не витримується, система не має властивості внутрішньої електричної стійкості.

Для виявлення граничних умов електричної стійкості знайдені вирази коренів характеристичного рівняння дорівнюють нулю. Отримані у такий спосіб алгебраїчні рівняння містять усі параметри системи. Аналіз цих

рівнянь дозволяє знайти значення або співвідношення параметрів системи, за яких настає втрата її електричної стійкості.

Рішення. Рівняння перехідних процесів для контурів струму не перехресної схеми [5, рис. 9.14, б]

$$C_e n \phi_1 - r I_1 - R_r (I_1 + I_2) - L \cdot \frac{dI_1}{dt} = 0; \quad (9.20)$$

$$C_e n \phi_2 - r I_2 - R_r (I_1 + I_2) - L \cdot \frac{dI_2}{dt} = 0. \quad (9.21)$$

Відповідно до прийнятого допущення вводимо лінійну залежність магнітного потоку від струму:

$$C_e \phi_1 = C_e \phi_0 + K I_1;$$

$$C_e \phi_2 = C_e \phi_0 + K I_2.$$

Підставляючи ці вирази до рівняння (9.20), (9.21), отримуємо:

$$L \cdot \frac{dI_1}{dt} + (R_r + r - Kn) I_1 + R_r I_2 = C_e n \phi_0; \quad (9.22)$$

$$L \cdot \frac{dI_2}{dt} + (R_r + r - Kn) I_2 + R_r I_1 = C_e n \phi_0. \quad (9.23)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (9.22), (9.23) щодо струму I_1 , отримуємо:

$$\frac{d^2 I_1}{dt^2} + \frac{2\alpha(R_r + r - Kn)}{\alpha^2} \frac{dI_1}{dt} + \frac{(R_r + r - Kn)^2 - R_r^2}{\alpha^2} I_1 = C.$$

Характеристичне рівняння

$$P^2 + 2 \frac{R_r + r - Kn}{L} \cdot P + \frac{(R_r + r - Kn)^2 - R_r^2}{L^2} = 0.$$

Корені характеристичного рівняння

$$P_1 = -\frac{r - Kn}{L}, \quad P_2 = -\frac{2R_r + r - Kn}{L}.$$

Система має внутрішню електричну стійкість тільки в тому випадку, коли всі корені характеристичного рівняння негативні, тобто коли $r > Kn$.

Помножимо праву й ліву частини написаної нерівності на збільшення струму ΔI_1 , тоді $\Delta I_1 r > Kn \Delta I_1$.

Отже, граничною умовою електричної стійкості системи є рівність збільшення спадання напруги на обмотках машини збільшенню її ЕРС. Це

можливо тільки при $R_T = 0$, коли машина працює не в режимі реостатного гальмування, а в режимі короткого замикання. Таким чином, розглянута схема вмикання машин не має внутрішньої електричної стійкості у режимі реостатного гальмування.

Розглянемо внутрішню електричну стійкість схеми [5, рис. 9.14, в], що відрізняється від раніше розглянутої тільки перехресним включенням обмоток збудження.

Рівняння перехідного процесу:

$$C_e n \phi_1 - r I_1 - R_T (I_1 + I_2) - L \cdot \frac{dI_1}{dt} = 0; \quad (9.24)$$

$$C_e n \phi_2 - r I_2 - R_T (I_1 + I_2) - L \cdot \frac{dI_2}{dt} = 0. \quad (9.25)$$

З огляду на перехресне вмикання обмоток збудження, маємо:

$$C_e \phi_1 = C_e \phi_0 + K I_2;$$

$$C_e \phi_2 = C_e \phi_0 + K I_1.$$

Підставляючи ці лінійні залежності магнітного потоку від струму машин у рівняння (9.24), (9.25), отримуємо:

$$L \cdot \frac{dI_1}{dt} + (R_T + r) I_1 + (R_T - Kn) I_2 = C_e n \phi_0; \quad (9.26)$$

$$L \cdot \frac{dI_2}{dt} + (R_T + r) I_2 + (R_T - Kn) I_1 = C_e n \phi_0. \quad (9.27)$$

Спільне розв'язання рівнянь (9.26), (9.27) щодо струму I_1 дає

$$\frac{d^2 I_1}{dt^2} + 2 \frac{R_T + r}{L} \frac{dI_1}{dt} + \frac{(R_T + r)^2 - (R_T - Kn)^2}{L^2} I_1 = C.$$

Характеристичне рівняння

$$P^2 + 2 \frac{R_T + r}{L} P + \frac{(R_T + r)^2 - (R_T - Kn)^2}{L^2} = 0.$$

Корені характеристичного рівняння

$$P_{1,2} = -\frac{R_T + r}{L} \pm \sqrt{\frac{(R_T - Kn)^2}{L^2}}.$$

При $R_T = Kn$
$$P_1 = P_2 = -\frac{R_T + r}{L}.$$

При $R_T > Kn$
$$P_1 = -\frac{r + Kn}{L}, \quad P_2 = -\frac{2R_T + r - Kn}{L}.$$

Отже, умова внутрішньої електричної стійкості розглянутої системи може бути представлена у вигляді нерівності

$$(2 \cdot R_r + r) \geq Kn.$$

Помноживши праву й ліву частини нерівності на збільшення струму ΔI_1 й розглянувши отримані збільшення спадання напруги на гальмовому опорі, а також збільшення напруги на затискачах машини, переконуємося, що розглянута система реостатного гальмування має внутрішню електричну стійкість.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенфельд В.Е. и др. Теория электрической тяги.- М.: Транспорт, 1983.-328с.
2. Кутыловский М.П. Электрическая тяга. Городской электрический транспорт.-М.: Изд-тво лит-ры по строительству, 1970.-263с.
3. Осипов С.И. и др. Основы локомотивной тяги.-М.: Транспорт, 1979.-440с.
4. Электротехнический справочник .Т-3, Кн.2. Использование электрической энергии. М.: Энергоатомиздат, 1988. - 616с.
5. Пушков П.М. Основы электрической тяги. Ч.1.-Харьков:ХГАГХ, 2001.-187с.
6. Пушков П.М. Основы электрической тяги. Методичні вказівки до виконання курсової роботи.-Харків:ХДАМХ, 2003.-69с.
7. Пушков П.М, Андрейченко В.П. Основы электрической тяги. Методические указания к практическим и самостоятельным занятиям, контрольным заданиям, курсовой работе и лабораторным работам для студентов заочной формы обучения специальностей: 7.092201 – «Электрические системы и комплексы транспортных средств», 7.092202 – «Электрический транспорт»-Харьков: ХНАГХ, 2007.-42с.

ЗМІСТ

Стор

Вступ.....	3
1. Теоретичні основи руху електропоїзда.	
Основні теоретичні положення.....	4
Задачі.....	6
2. Реалізація сил тяги й гальмування.	
Основні теоретичні положення.....	10
Задачі.....	12
3. Опір руху поїзда.	
Основні теоретичні положення.....	14
Задачі.....	17
4. Характеристики тягових двигунів постійного струму.	
Основні теоретичні положення.....	24
Задачі.....	28
5. Регулювання швидкості тягових двигунів постійного струму.	
Основні теоретичні положення.....	32
Задачі.....	36
6. Порівняння тягових двигунів постійного струму різних систем збудження.	
Основні теоретичні положення.....	45
Задачі.....	50
7. Пуск поїзда.	
Основні теоретичні положення.....	51
Задачі.....	57
8. Механічне гальмування поїзда.	
Основні теоретичні положення.....	61
Задачі.....	64
9. Електричне гальмування.	
Основні теоретичні положення.....	65
Задачі.....	71
Список літератури.....	77

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки до практичних і самостійних занять з дисципліни «Основи електричної тяги» (для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання та слухачів другої вищої освіти за напрямом підготовки 0922 (6.050702 – "Електромеханіка"))

Укладачі: доц., к. т. н. Павло Максимович Пушков,
доц., к. т. н. Юлія Вітіліївна Мінеєва.

Відповідальний за випуск В.Ф. Далека

Редактор О. С. Кравцова

Верстка: І.В. Волосожарова

План 2009, поз. 231М

Підп. до друку 15.05.2009	Формат 60 x 84 1/16	Папір офісний
Друк. на ризографі	Умовн.-друк. арк. 4,6	Обл.-вид. арк. 5,0
Тираж 50 прим.	Зам. № 4750	

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК №731 від 19.12.2001