

УДК 621.313.333.001

**В.М. Безрученко, А.В. Шаповалов, канд-ти тех. наук, Б.О. Гарцев**

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна)*

### **ТЕПЛОВІ ПАРАМЕТРИ АСИНХРОННИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ**

Теорія нагріву розглядає електричну машину як однорідне тверде тіло, для якого відоме рівняння [1] набуває вигляду:

$$\sum p \cdot dt - A \cdot \tau \cdot dt = C \cdot d\tau, \quad (1)$$

де  $A$  – кількість тепла, що виділяє машина в оточуюче середовище за одиницю часу при різниці температур у  $1^\circ\text{C}$ ;  $C$  – повна теплоємність двигуна;  $\sum p$  – сумарні втрати потужності у двигуні (тепловий потік);  $\tau$  – перегрів, тобто перевищення температури тіла над температурою охолоджуючого повітря.

З рівняння (1) випливає, що коли  $d\tau = 0$ , то кінцевий перегрів визначається як

$$\tau_{\text{кн.}} = \frac{\sum p}{A}. \quad (2)$$

Як відомо, при кваліфікаційних випробуваннях визначають перегрів при різній витраті охолоджуючого повітря, але при однаковому навантаженні на валу двигуна. Очевидно, у цьому разі сумарні втрати повітря  $\sum p = \text{const}$ , а величина тепловіддачі згідно з рівняння (2) буде обернено пропорційна перегріву, тобто

$$A \sim \frac{1}{\tau_{\text{кн.}}}. \quad (3)$$

Аналіз таких рівнянь для тягових двигунів постійного струму був зроблений у роботі [2], у результаті чого було побудовано графік залежності тепловіддачі  $A$  у відносних одиницях від кількості охоло-

джуючого повітря  $Q$  також у відносних одиницях. При випробуваннях двигунів визначають їх перегріву при  $Q = 1,0; 0,75; 0,5$  та  $0$ .

Аналогічне дослідження було проведено для асинхронного тягового двигуна СТА-1200, що випробовувався при вказаній вище витраті охолоджуючого повітря при різних навантаженнях і в різних режимах роботи.

Пропускаючи значну кількість цифрового матеріалу, наведемо лише таблицю значень кількості тепла  $A$  та кількості охолоджуючого повітря  $Q$  (таблиця).

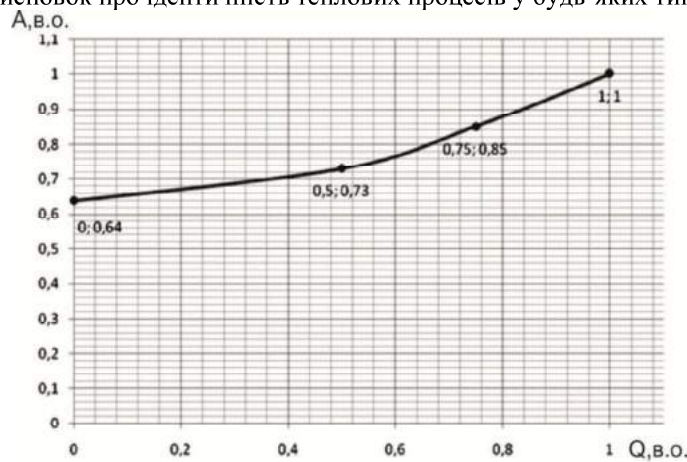
Таблиця

**Таблиця значень кількості тепла  $A$  та кількості охолоджуючого повітря  $Q$  у відносних одиницях**

Параметр	Відносні одиниці			
Q	1,0	0,75	0,5	0
A	1,0	0,85	0,73	0,64

На базі таблиці побудований графік  $A = f(Q)$ , який наведений на рис. 1.

Цікаво відзначити, що крива побудована для асинхронного тягового двигуна, не тільки за формою, але й за значенням дуже близька до кривої, побудованої для ряду тягових двигунів постійного струму [2]. Це дозволяє зробити висновок про ідентичність теплових процесів у будь-яких типах тягових двигунів.

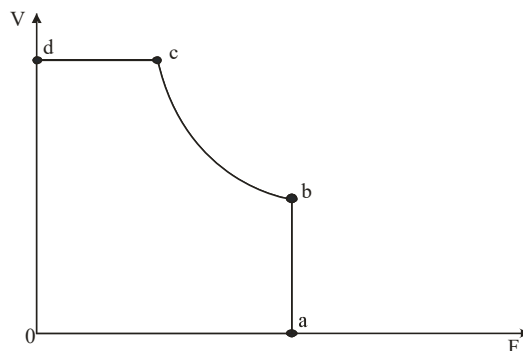


**Рис. 1. Графік залежності кількості тепла  $A$  від кількості охолоджуючого повітря  $Q$  у відносних одиницях**

Однак, з точки зору нагріву та втрат потужності, у тягових двигунів постійного струму та асинхронних тягових двигунів є суттєві відмінності. Ця різниця пов'язана з так званим коефіцієнтом втрат, тобто відношенням втрат у сталі до струмових втрат у міді –  $\alpha = P_c / P_m$ .

У двигунів постійного струму ця величина відносно мала, її розглянуто у роботі [2]. У регульованих асинхронних двигунів відбувається зміна амплітуди підведеної напруги та її частоти. Крім того, величина нагріву обмотки статора визначається як втратами в сталі, так і втратами в міді, а їх значення співставні. Наприклад, значення цих втрат у двигуні СТА-1200 та ті, що наводяться рядом авторів [3, 4], близькі одне до одного у номінальному режимі.

Розглянемо процес регулювання швидкості тягового двигуна під час експлуатації за допомогою ідеалізованої тягової характеристики (залежність між швидкістю та силою тяги), що наведена на рис. 2.



**Рис. 2. Графік залежності швидкості  $V$  від сили тяги  $F$  електровоза**

Попередньо було відзначено, що втрати в сталі статора пропорційні добутку частоти у степені  $\beta$  на індукцію у квадраті, тобто  $p_{c.ст.} \sim f^\beta \cdot B^2$ , де  $\beta$  приймає значення залежно від марки сталі ( $\beta=1,3\dots 1,5$ ), а індукція пропорційна магнітному потоку  $\Phi$ . При цьому, якщо магнітний потік  $\Phi = \text{const}$ , то індукція  $B = \text{const}$ .

Частотне регулювання виконується за законом М.П. Костенко [1], тобто

$$\frac{U_1}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\frac{F}{F_{\text{НОМ}}}} = \frac{f_1}{f_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi_{\text{НОМ}}}. \quad (4)$$

З виразу (4) видно, якщо на відріжку  $ab$  тягової характеристики регулювання виконується за умови  $U_1/f = \text{const}$ , то і сила тяги  $F = \text{const}$ , і магнітний потік  $\Phi = \text{const}$ . Частота  $f_1$  зростає, а з нею пропорційно зростають втрати в сталі статора  $f_1^\beta$ . У точці  $b$  характеристики настає номінальний режим, де втрати у сталі досягають максимального значення.

Якщо умовно відрізок  $ab$  (рис. 2) можливо назвати пусковою характеристикою, то  $bc$  буде робочою, де точка  $c$  характеризує максимальну швидкість руху, а отже і максимальну частоту  $f_1$  напруги живлення. Напруга на відріжку  $bc$   $U_1 = \text{const}$ , і вигляд характеристики визначається рівнянням  $V\sqrt{f} = \text{const}$  (тоді  $f_1 \cdot \Phi = \text{const}$ ). Таким чином, зі зростанням швидкості зменшується магнітний потік. При цьому значення  $\Phi^2$  зменшується швидше, ніж зростає значення частоти  $f_1^\beta$ . Це дозволяє стверджувати, що втрати в сталі будуть зменшуватись.

Отже, втрати в сталі у будь-якій точці тягової характеристики менші ніж втрати в точці номінального режиму роботи. Ця обставина може бути віднесена до деякого запасу за тепловими параметрами, якщо при розрахунках втрати в сталі приймати  $p_c = \text{const}$  такими, як і у номінальному режимі.

Використовуючи залежність  $A = f(Q)$  можна визначити можливу потужність двигуна до реалізації (тобто його струм навантаження) при заданій витраті охолоджуючого повітря.

Очевидно, для збереження незмінного значення перегріву при зміні витрати повітря згідно з виразами (2) і (3) пропорційно зміні тепловіддачі  $A$  мають змінюватися і сума втрат  $\sum p$ , яка в номінальному режимі

$$\sum p_{\text{НОМ}} = p_c + p_{\text{М.НОМ}}, \quad (5)$$

де  $p_{\text{М.НОМ}}$  – струмові втрати в обмотці статора (втрати в міді);  $p_c$  – втрати в сталі (причому  $p_c = \text{const}$  для будь-яких режимів роботи).

Номінальне значення втрат згідно з виразом (5) відповідає  $Q=1$  та  $A=1$ . Коли  $Q < 1$  і  $A < 1$ , то нове значення сумарних втрат  $\sum p' < \sum p_{\text{НОМ}}$ .

$$\sum p' = p_c + p'_M = A \sum p_{\text{НОМ}} = A(p_{\text{М.НОМ}} + p_c), \quad (6)$$

де  $p'_M$  – нове значення втрат в обмотках статора.

Позначимо коефіцієнт втрат у номінальному режимі як

$$\alpha_{\text{НОМ}} = \frac{p_c}{p_{\text{М.НОМ}}}. \quad (7)$$

Підставивши вираз (7) у (6) та перетворивши його, отримаємо

$$p'_M = A \cdot p_{\text{М.НОМ}} - (1-A) \cdot p_c. \quad (8)$$

Поділивши всі члени рівняння (8) на  $p_{\text{М.НОМ}}$  та з урахуванням виразу (7), запишемо:

$$\frac{p'_M}{p_{\text{М.НОМ}}} = A - (1-A) \cdot \alpha_{\text{НОМ}}. \quad (9)$$

Ліва частина рівняння (9) є відношення струмових втрат  $I^2 R$  в обмотці статора при новому та номінальному струмах, тобто вираз (9) можливо подати як відношення квадратів струмів: нового  $I'_1$  до номінального  $I_{\text{НОМ}}$  :

$$\left(\frac{I'_1}{I_{\text{НОМ}}}\right)^2 = A - (1 - A) \cdot \alpha_{\text{НОМ}}. \quad (10)$$

Вираз (10) є вихідним для визначення нового допустимого за умовами нагріву струму  $I'_1$  при зміні витрат охолоджуючого повітря  $Q$  і відповідній зміні тепловіддачі  $A$  (згідно з рис. 1). Отже, відповідно до виразу (10)

$$I'_1 = I_{\text{НОМ}} \sqrt{A - (1 - A) \cdot \alpha_{\text{НОМ}}}. \quad (11)$$

Якщо в асинхронних тягових двигунів  $\alpha_{\text{НОМ}} \approx 1$ , то вираз (11) набуває такого вигляду:

$$I'_1 = I_{\text{НОМ}} \sqrt{2A - 1}. \quad (12)$$

Згідно з виразом (12) тяговий двигун СТА-1200 за відсутності охолоджуючого повітря ( $Q = 0$ ) буде мати нове допустиме значення струму за умовами нагріву  $I'_1 = 0,525 I_{\text{НОМ}}$ .

Отже, для інших двигунів при інших значеннях  $\alpha_{\text{НОМ}}$  слід скористатися виразом (11), згідно з яким, чим менше значення  $\alpha_{\text{НОМ}}$ , тим більшим буде новий допустимий струм. Подальший аналіз отриманих експериментальних даних дозволив установити, що крива на рис. 1 точно описується рівнянням

$$A(Q) = c_0 \cdot e^{c_1 \cdot Q} + c_2, \quad (13)$$

де  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  – постійні величини ( $c_0 = 0,066$ ,  $c_1 = 1,884$ ,  $c_2 = 0,572$ ), тобто рівняння (13) має вигляд

$$A = 0,066 \cdot e^{1,884 \cdot Q} + 0,572. \quad (14)$$

Підставивши вираз (14) у (11) та перетворивши його, отримаємо величину нового струму двигуна залежно від кількості охолоджуючого повітря у відносних одиницях  $Q$  при значенні  $\alpha_{\text{НОМ}} \neq 1$ :

$$I'_1 = I_{\text{НОМ}} \sqrt{0,257 \sqrt{e^{1,884 \cdot Q} - \alpha_{\text{НОМ}} (6,485 - e^{1,884 \cdot Q})} + 8,667}. \quad (15)$$

У цьому випадку, якщо у тягового двигуна величина  $\alpha_{\text{НОМ}} \approx 1$ , то рівняння (15) запишеться так:

$$I'_1 = I_{\text{НОМ}} \cdot 0,363 \sqrt{e^{1,884 \cdot Q} + 1,091}. \quad (16)$$

Згідно з рівнянням (16) при  $Q = 0$   $I'_1 = 0,525 \cdot I_{\text{НОМ}}$ , що відповідає раніше одержаним результатам.

Отримані рівняння (15) та (16) дозволяють розв'язати і зворотню задачу, тобто встановити залежність кількості повітря  $Q$  від нового струму  $I'_1$ , що споживається, при відомому значенні номінального струму  $I_{\text{НОМ}}$ . Величина  $Q$ , як відомо, пропорційна частоті обертання двигуна вентилятора, тобто з'являється можливість здійснити безпосереднє регулювання їхньої частоти обертання залежно від навантаження тягових двигунів.

Отже, з рівняння (16) отримаємо зворотню залежність, що матиме вигляд

$$Q = 0,53 \cdot \ln \left( 7,576 \cdot \left( \frac{I'_1}{I_{\text{НОМ}}} \right)^2 - 1,09 \right). \quad (17)$$

### Висновки

1. З точки зору економії електричної енергії, то отримані результати дозволяють проводити прийнятно-здатні випробування асинхронних тягових двигунів після їх виготовлення або ремонту без вентиляції з еквівалентним за нагрівом струмом.

2. Під час експлуатації електровозу, зафіксована зміна струму навантаження за допомогою зворотного зв'язку може давати сигнал системі керування на відповідну зміну подачі охолоджуючого повітря шляхом зміни частоти обертання двигунів вентиляторів, потужність яких пропорційна частоті обертання у кубі. Оскільки переважну частину часу електровоз працює при струмах, менших за номінальні, то ця система дозволяє забезпечити значну економію електроенергії під час експлуатації електрорухомого складу.

### **Список літератури**

1. Безрученко, В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Дніпропетр. нац. ун-т заліз. транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
2. Експлуатаційна завантаженість струмом та витрати охолоджуючого повітря тягових двигунів / В. М. Безрученко, Б. О. Гарцев, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Вісн. східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2011. – Вип. №4 (158), ч. 1. – С. 43–45.
3. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых двигателей: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин; под ред. А. С. Курбасова. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
4. Проектирование тяговых электрических машин: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров, М. А. Козорезов; под ред. М. Д. Находкина. – М., «Транспорт», 1976. – 624с.

***Рекомендовано до друку проф. Дубінцем Л.В.***