

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ВИПРОБУВАННІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА НАГРІВАННЯ БЕЗ ВЕНТИЛЯЦІЇ

Запропоновано методику теоретичного визначення еквівалентного струму навантаження при випробуванні тягових електродвигунів на нагрівання без примусової вентиляції. Наведено результати розрахунку вказаного струму для тягового двигуна типу ЕД-118А та експериментально підтверджено точність методу.

Предложена методика теоретического определения эквивалентного тока нагрузки при испытаниях тяговых электродвигателей на нагревание без вентиляции. Приведены результаты расчета эквивалентного тока для тягового двигателя ЭД-118А, а также экспериментально подтверждена точность метода.

The theoretical determination procedure of an equivalent loading current in tests of traction electric motors on heating without ventilation is offered. The results of calculation of an equivalent current for traction engine ED-118A are presented, as well as the method accuracy is experimentally confirmed.

Програми типових випробувань електричних машин всіх видів містять випробування на нагрівання. В загальному випадку випробування на нагрівання зводиться до визначення перевищень температури різних частин машини, під якими розуміють різниці між температурою цих частин і температурою навколишнього середовища, що отримані в результаті її роботи в номінальному або іншому заданому режимі.

Найбільш природним є фактичне здійснення даного режиму роботи, тобто створення відповідного навантаження для випробуваної машини. Таке випробування носить назву випробування на нагрівання при безпосередньому навантаженні. Але чим більша потужність машини, тим складніше здійснити її випробування методом безпосереднього навантаження: габарити установки, додаткове обладнання для створення вентиляції у двигунів з примусовою вентиляцією, значні витрати електроенергії і т.д. У той же час, наприклад, правилами ремонту електричних машин локомотивів дозволяється випробовувати тягові електродвигуни без примусової подачі охолоджуючого повітря протягом однієї години при струмі, що дає перевищення температури, яке відповідає перевищенню температури при номінальному режимі [1, 2]. Назвемо цей струм еквівалентним. Випробування на нагрівання двигунів без примусової подачі охолоджуючого повітря протягом однієї години значно скорочує час випробувань у порівнянні з номінальним режимом, значно зменшує витрати електроенергії та виробничі площі, які займає обладнання. Тому розробка методики визначення еквівалентного

струму для типів двигунів, для яких цей струм невідомий, є актуальною задачею.

Якщо якір електричної тягової машини розглядати, як однорідне суцільне тверде тіло, то крива нагрівання $\tau = f(t)$ буде мати вигляд на рис. 1.

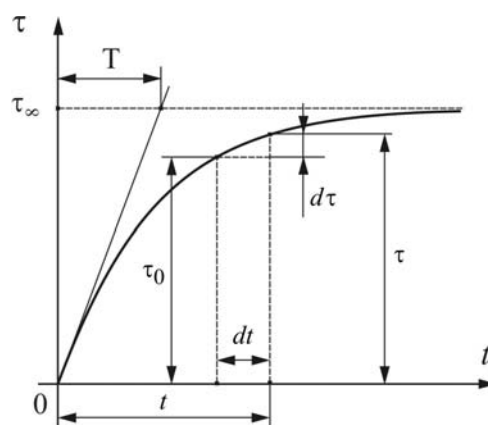


Рис. 1. Крива нагрівання $\tau = f(t)$

Втрати потужності в якорі за час dt нагрівають його, і перевищення температури збільшиться від значення τ_0 до τ , тобто на величину $d\tau$ (рис. 1). Якщо частина тепла, що виникає за час dt і дорівнює $cGdt$, залишилась в якорі й пішла на підвищення його температури, а частина $\alpha S\tau dt$ розсіялась у навколишнє середовище, то рівняння теплового балансу матиме вигляд [3]:

$$\sum p dt = cGd\tau + \alpha S\tau dt, \quad (1)$$

де $\sum p$ – втрати потужності в якорі, Вт;

c – питома теплоємність, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}$;

G – маса тіла, кг;

α – коефіцієнт тепловіддачі тіла, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}$;

S – площа поверхні, що віддає тепло, м^2 .

Для усталеного теплового режиму, коли $d\tau = 0$, а $\tau = \tau_\infty$, отримаємо [3]:

$$\sum p dt = \alpha S \tau_\infty dt, \quad (2)$$

де τ_∞ – перегрів в усталеному режимі, $^\circ \text{C}$.

З формули (2) перевищення температури τ_∞ в усталеному тепловому режимі [3]:

$$\tau_\infty = \frac{\sum p}{\alpha S}. \quad (3)$$

Величина перегріву, тобто перевищення температури даної частини машини над температурою навколишнього середовища, в довільний момент часу [3]:

$$\tau = \tau_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (4)$$

де τ_0 – початковий перегрів, $^\circ \text{C}$.

Теплова постійна часу якоря визначається за формулою [3]:

$$T = \frac{cG}{\alpha S} = \frac{cG\tau_\infty}{\sum p}. \quad (5)$$

Втрати потужності в якорі $\sum p$ складаються з двох складових – втрати в міді обмоток p_{ma} та в сталі сердечника якоря p_c .

Втрати в міді якоря визначаються за наступною формулою [4]:

$$p_{ma} = I_a^2 (r_a + r_d + r_{ko} + \beta r_3), \quad (6)$$

де I_a – струм якорного кола, А;

r_a , r_d , r_3 , r_{ko} – опори відповідно обмотки якоря, обмотки додаткових полюсів, обмотки збудження, компенсаційної обмотки, Ом;

β – коефіцієнт збудження.

Сумарні втрати в сталі даної частини машини за будь-якої частоти й індукції можна визначити за формулою [4]:

$$p_{ca} = K_{xx} (m_a p_a + m_z p_z), \quad (7)$$

де $K_{xx} \approx 0,8\sqrt{p_{1,5/50}}$ – емпіричний коефіцієнт, що враховує підвищення втрат у сталі з-за неідеальності шихтовки, а також всі види додаткових втрат холостого ходу;

$p_{1,5/50}$ – питомі втрати в електротехнічній сталі при $B = 1,5$ Тл, $f = 50$ Гц, Вт/кг;

m_z , m_a – маса сталі відповідно зубців та ярма якоря, кг;

p_z , p_a – питомі втрати відповідно в зубцях та ярмі якоря, Вт/кг.

Величина питомих втрат у сталі зубців якоря може бути отримана за виразом [4]:

$$p_z = \left[0,044f + 5,6 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] B_z^2, \quad (8)$$

де f – частота перемагнічування сталі, Гц;

B_z – індукція в зубцях, Тл.

Питомі втрати в ярмі якоря можуть бути визначені за формулою [4]:

$$p_a = \left[0,044f + 5,6 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] B_a^2, \quad (9)$$

де B_a – індукція в ярмі, Тл.

Закон нагрівання ідеального однорідного тіла в загальному випадку можна застосовувати до окремих частин електричних машин, однак лише з обумовленою мірою точності.

Швидкість охолоджуючого повітря, що визначає величину коефіцієнта тепловіддачі α , можна приблизно визначити [4]:

– відносно поверхонь охолодження котушок головних та додаткових полюсів:

$$V_k = \frac{Q_{\text{ном}}}{S_k}, \quad (10)$$

де $S_k = \pi n_k \frac{d_k^2}{4} + 0,12(D_0^2 - D_a^2)$ – сумарна площа перерізу аксіальних каналів для проходу повітря, м^2 ;

n_k – кількість аксіальних вентиляційних каналів в якорі;

d_k – діаметр каналу, м;

D_0 , D_a – внутрішній діаметр остова і зовнішній діаметр якоря, м;

$Q_{\text{ном}}$ – витрата повітря, $\text{м}^3/\text{с}$.

– відносно охолоджуваних поверхонь якоря і компенсаційної обмотки:

$$V_{\text{екв}} = \sqrt{V_a^2 + V_k^2}, \quad (11)$$

де $V_a = \frac{\pi D_a n_{\text{ном}}}{60}$ – лінійна швидкість якоря в тривалому режимі, м/с;
 $n_{\text{ном}}$ – номінальна швидкість обертання якоря, об/хв.

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі α [4], $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$:

$$\begin{cases} 30 + 2,4V, \text{ якщо } V < 54 \text{ м/с;} \\ 160, \text{ якщо } V \geq 54 \text{ м/с.} \end{cases} \quad (12)$$

За відсутності примусової вентиляції повітря в машину зовні додатково не подається, тому $V_k = 0$ м/с. В цьому випадку рух деякого об'єму повітря створюється при обертанні якоря, швидкість якого визначається за формулою (11), в якій $V_k = 0$. Якщо машина вентилюється в повному об'ємі, то у виразі (11) присутні обидві складові. Видно, що у випадку повної вентиляції значення $V_{\text{екв}}$ буде більшим, ніж у випадку відсутності примусової подачі охолоджуючого повітря.

Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі α за відсутності примусової вентиляції буде меншим від коефіцієнта тепловіддачі α_v при повній вентиляції машини.

Тому для того, щоб отримати усталене значення перегріву τ_∞ в режимі випробувань без вентиляції на протязі однієї години, рівне допустимому перегріву при роботі машини в тривалому режимі, необхідно зменшити втрати в міді обмотки p_{ma} , оскільки втрати в сталі не залежать від струму і залишаються незмінними $p_c = \text{const}$.

Проілюструємо це за допомогою рис. 2:

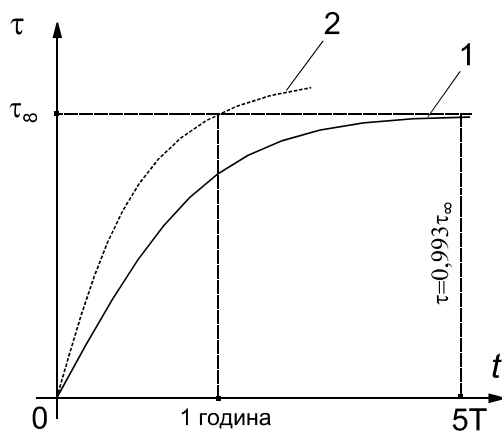


Рис. 2. Криві нагрівання якоря в різних умовах

1. Машина вентилюється примусово, режим роботи тривалий. Струм якоря в цьому випадку дорівнює номінальному.
2. Примусова вентиляція відсутня, машина навантажена еквівалентним струмом $I_{\text{екв}}$ на протязі однієї години.

Оскільки величина τ_∞ визначається класом ізоляції, а параметри α , S розраховуються, то з урахуванням виразу (3) та $p_c = \text{const}$ можна визначити втрати в міді обмотки, які забезпечують дану величину τ_∞ :

$$p_{ma} = \sum p - p_{ca} = \tau_\infty \alpha S - p_{ca}, \quad (13)$$

де p_{ca} – величина втрат в сталі, розрахована за формулою (7) для тривалого режиму, Вт.

Підставивши у формулу (6) значення p_{ma} з виразу (13), можна визначити еквівалентний струм $I_{\text{екв}}$, який забезпечить задану величину перегріву τ_∞ якірної обмотки на протязі однієї години випробувань без примусової подачі охолоджуючого повітря:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{p_{ma}}{(r_a + r_d + r_{ko} + \beta r_s)}}. \quad (14)$$

Згідно отриманої методики авторами розроблено програму розрахунку величини еквівалентного струму.

В якості прикладу наведено результати розрахунку еквівалентного струму для тягового двигуна типу ЕД-118А. Паспортні дані цього двигуна наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Паспортні дані тягового двигуна ЕД-118А

Потужність, кВт	305
Номінальна напруга живлення, В	463
Номінальний струм, А	720
Частота обертання, с ⁻¹	9,75
Витрата охолоджуючого повітря, м ³ /с	1,25...1,33

Величина перегріву в усталеному режимі: $\tau_\infty = 135,9$ °С (клас ізоляції F).

Величина еквівалентного струму аналітично отримана за приведеною методикою: $I_{\text{екв}} = 587,5$ А.

Величина еквівалентного струму, що встановлена експериментальним шляхом, складає $I_{\text{екв}} = 575$ А [1].

Різниця між аналітично отриманим та експериментально встановленим значеннями струмів складає приблизно 2,1 %. Це доводить точність та прийнятність запропонованої методики визначення значення еквівалентного струму якоря.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила ремонту електричних машин тепловозів ЦТ 0064 [Текст]. – 2003. – 122 с.

2. Правила ремонту електричних машин електро-
возів ЦТ 0063 [Текст]. – 2003. – 286 с.
3. Находкин, М. Д. Электрические машины постоянного тока [Текст] / М. Д. Находкин. – М.: Энергия, 1960.
4. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей [Текст] / А. С. Курбасов. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.

Надійшла до редколегії 28.11.2008.