

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Показано використання асинхронного частотнорегульованого тягового електропривода при значному збільшенні потужності та швидкості електровоза.

Показано использование асинхронного частотнорегулируемого тягового электропривода при существенном увеличении мощности и скорости электровоза.

In the article the use of asynchronous tractive electric drive controlled by frequency, when the power and speed of electric locomotive is greatly increased, is shown.

### Вступ

У будь-якому електроприводі електродвигун постійного або змінного струму завжди залишається «серцем» привода. Всі інші елементи тягового електропривода лише створюють йому умови, за яких би він забезпечував всі вимоги цього привода. Повною мірою це відноситься до найбільш простого, надійного, легкого і дешевого асинхронного тягового двигуна. Незважаючи на таку позитивну характеристику, як показав досвід, створення нового двигуна – це тривалий і трудомісткий багаторічний процес. Тому слід прагнути або використовувати вже «доведені до ладу» в експлуатації тягові двигуни, або їх же з мінімальними доробками. В даний час виникло питання про необхідність створення нового асинхронного тягового двигуна, більш потужного, ніж сучасний двигун СТА1200 електровоза ДСЗ.

### Мета роботи

Розглянути питання про можливість підвищення потужності трифазного двигуна СТА1200 без його переробки, за рахунок збільшення моменту та швидкості обертання.

### Матеріал і результати дослідження

Двигун СТА1200 має такі номінальні параметри:

- тривала потужність:  $P_{\text{ном}} = 1200$  кВт;

- напруга лінійна / фазна:

$$\frac{U_{\text{л}}}{U_{\text{ф}}} = 1870 / 1080 \text{ В};$$

- частота напруги живлення:  $f_{1 \text{ ном}} = 58$  Гц;

- частота обертання:  $n_{\text{ном}} = 1138$  об/хв;

- максимальна частота:  $f_{1 \text{ max}} = 154,4$  Гц;

- максимальная частота обертання:

$$n_{\text{max}} = 3030 \text{ об/хв};$$

- обмотки статора з'єднані «зіркою»;

- струм статора:  $I_1 = 450$  А;

- ізоляція класу «Н»;

- кінцевий перегрів обмотки статора:

$$\tau_{\text{кн}} = 150 \text{ }^\circ\text{C};$$

- коефіцієнт корисної дії:  $\eta_{\text{ном}} = 0,935$ .

За результатами кваліфікаційних випробувань визначені втрати холостого ходу і короткого замикання, що відповідно дорівнюють  $p_0 = 18$  кВт і  $p_k = 65,3$  кВт, коефіцієнт втрат

$$\alpha = \frac{p_0}{p_k} = 0,276.$$

Ковзання двигуна в номінальному режимі при синхронній частоті обертання:

$$n_1 = \frac{f_{1 \text{ ном}} \cdot 60}{p}, \quad (1)$$

$$n_1 = \frac{58 \cdot 60}{3} = 1160 \text{ об/хв},$$

буде дорівнювати:

$$S = \frac{1160 - 1138}{1160} = 0,019.$$

Як видно, без великої похибки для подальших розрахунків, величиною ковзання можна знехтувати, тобто приймати  $S \approx 0$ .

Ідеалізована механічна характеристика, на якій працює двигун, представлена на рис. 1.

Ця характеристика має дві характерних ділянки: ділянка *ab*, на якій відбувається регулювання амплітуди і частоти напруги за законом

$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$  і де обертовий момент

$M = \text{const}$ ; ділянка *bc* (від точки номінального

режиму  $b$  до точки максимальної кутової швидкості  $c$ ), на якій амплітуда напруги незмінна ( $U_1 = \text{const}$ ), а змінюється лише частота, і яка представляє собою криву гіперболічного вигляду. Рівняння ділянки  $bc$ :  $\omega \cdot \sqrt{M} = \text{const}$  [1].

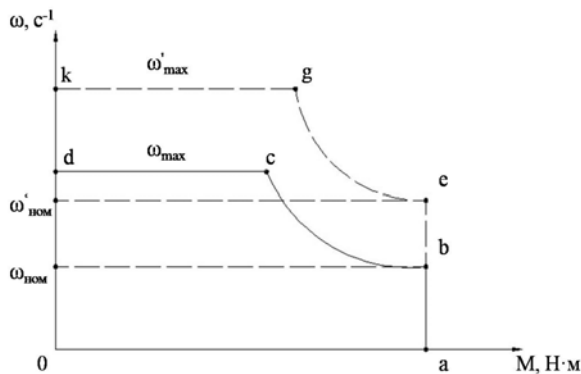


Рис. 1. Ідеалізована механічна характеристика

Як відомо, потужність електродвигуна:

$$P = \omega \cdot M, \quad (2)$$

тому підвищення потужності може бути виконано або в бік підвищення моменту (правіше точки  $a$  на рис. 1), або в бік збільшення номінальної швидкості  $\omega_{\text{ном}}$ , тобто вище точки  $b$  на рис. 1. Перший випадок вже досліджувався [2]. Він показав, що теоретично двигун СТА1200 допускає підвищення потужності шляхом підвищення моменту, тобто сили тяги електровоза. Однак, в результаті проведених розрахунків, підтверджених випробуваннями, з'ясувалося, що лінія  $ab$  на рис. 1 практично являє собою лінію обмеження сили тяги (тобто моменту двигуна) по зчепленню. Тому збільшення моменту двигуна недоцільне: він все одно не може бути використаний в експлуатації. Але якщо на ділянці  $ab$   $M = \text{const}$ , значить і магнітний потік  $\Phi = \text{const}$  [1]. Момент асинхронного двигуна:

$$M = C_M \Phi I_2' \cos \varphi_2, \quad (3)$$

де  $C_M$  — стала;  $I_2'$  — приведений струм ротора;  $\varphi_2$  — кут зсуву фаз між векторами ЕРС і струму ротора.

З умови сталості моменту випливає, що струм  $I_2' = \text{const}$ . Але для асинхронного двигуна струм статора:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}_2'), \quad (4)$$

де  $\underline{I}_0$ , при  $\Phi = \text{const}$  — незмінний струм холостого ходу, отже і струм статора  $I_1 = \text{const}$  [1].

Лінія  $cd$  визначена максимальною швидкістю руху електропривода  $\vartheta_{\text{макс}} = 160$  км/год, що відповідає кутовій швидкості:

$$\omega_{\text{макс}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{макс}}}{30}, \quad (5)$$

$$\omega_{\text{макс}} = \frac{\pi \cdot 3030}{30} = 317 \text{ с}^{-1}.$$

В номінальному режимі (точка  $b$  на рис. 1) момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{1200 \cdot 10^3}{1138} = 10^4 \text{ Н/м}.$$

Розглянемо тепер можливість, при незмінних механічній передачі та діаметрі ведучого колеса електропривода, збільшити швидкість руху до  $\vartheta'_{\text{макс}} = 250$  км/год. Цій швидкості буде відповідати пунктирна характеристика  $egk$  на рис. 1 і нова точка номінального режиму  $e$ , в якій нова номінальна потужність має дорівнювати  $P_{\text{ном}} = 1600$  кВт. Асинхронний двигун живиться від перетворювача (інвертора напруги), який невіддільний від двигуна так само, як невіддільний колектор (інвертор) від якоря двигуна постійного струму. Тому нова потужність двигуна і новий діапазон регулювання повинні бути обрані з урахуванням параметрів напівпровідникових вентилів перетворювача. Якщо в точці  $b$  на рис. 1:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30}, \quad (7)$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot 1138}{30} = 119 \text{ с}^{-1},$$

то в точці  $e$  швидкість зростає прямо пропорційно потужності, тоді:

$$\omega'_{\text{ном}} = \frac{1600}{1200} \cdot 119 = 158,7 \text{ с}^{-1},$$

а частота напруги живлення буде дорівнювати:

$$f'_{1 \text{ ном}} = \frac{1600}{1200} \cdot 58 = 77,3 \text{ Гц},$$

що відповідає частоті обертання  $n'_{\text{ном}} = 1517$  об/хв.

На ділянці  $ab$  механічної характеристики відношення амплітуди до частоти напруги живлення дорівнює:

$$\frac{U_{1\phi}}{f_{1\text{ ном}}} = \frac{1080}{58} = 18,62 = \text{const}.$$

Ця ж величина збережеться і на ділянці  $be$ , оскільки значення моменту залишається незмінним. Тоді в точці нового номінального режиму напруга буде:

$$U_{1\text{ ном}} = f'_{1\text{ ном}} \cdot \frac{U_{1\phi}}{f_{1\text{ ном}}}, \quad (8)$$

$$U_{1\text{ ном}} = 77,3 \cdot 18,62 = 1440 \text{ В},$$

а  $U'_{\text{ІІ}} = 2494 \text{ В}$ . Відзначимо, що нинішній рівень ізоляції двигуна – 3000 В.

При подальшому русі по характеристиці на ділянці  $eg$  напруга  $U_{1\phi}$  залишається незмінною, а змінюється лише частота  $f_1$ . Оскільки, як відомо, напруга практично пропорційна добутку частоти на магнітний потік, то в міру зростання частоти (швидкості руху) магнітний потік буде зменшуватись. В точці  $b$  номінальна швидкість руху електровоза ДСЗ дорівнює  $\vartheta_{\text{ном}} = 69,3 \text{ км/год}$ , отже в точці  $e$  нова номінальна швидкість досягне значення  $\vartheta'_{\text{ном}} = 92,4 \text{ км/год}$ .

При максимальній швидкості руху  $\vartheta'_{\text{мах}} = 250 \text{ км/год}$  частота:

$$f'_{1\text{ мах}} = \frac{250}{92,4} \cdot 77,3 = 209 \text{ Гц},$$

що є допустимим для IGBT-транзисторів, які використовуються в сучасних інверторах напруги.

Максимальна кутова швидкість при цьому стане:

$$\omega_{\text{мах}} = 158,7 \cdot \frac{209}{77,3} = 429 \text{ с}^{-1},$$

тобто  $n'_{\text{мах}} \approx 4100 \text{ об/хв}$ .

Така частота обертання не представляє небезпеки для короткозамкненого ротора двигуна, однак потребує застосування нових швидкохідних підшипників. Розглянемо тепер можливість такого підвищення потужності двигуна з точки зору його нагріву, а також його енергетичні показники. Як вже зазначалося вище, при переході з точки  $b$  на рис. 1 в точку нового но-

мінального режиму  $e$  момент двигуна, його струм  $I_1$ , а, отже, і втрати короткого замикання залишаться незмінними.

Зміняться лише втрати холостого ходу, які являють собою втрати в сталі і дуже малі механічні втрати. Останніми для простоти подальшої викладки ми нехтуємо.

Відомо [1], що втрати в сталі пропорційні добутку  $f_1^{1,3} \cdot B^2$ , де  $B$  – індукція, пропорційна магнітному потоку. Під час руху по ділянці характеристики  $ae$ , відповідно до зазначеного вище, магнітний потік  $\Phi = \text{const}$ , значить і  $B = \text{const}$  і тоді втрати холостого ходу зміняться лише у зв'язку зі зміною частоти і в точці  $e$  досягнуть значення:

$$p'_0 = p_0 \left( \frac{f'_{1\text{ ном}}}{f_{1\text{ ном}}} \right)^{1,3}, \quad (9)$$

$$p'_0 = 18 \left( \frac{77,3}{58} \right)^{1,3} = 26,1 \text{ кВт}.$$

А оскільки  $p_k = \text{const}$ , то сумарні втрати в новому номінальному режимі будуть дорівнювати:

$$\sum p' = p'_0 + p_k, \quad (10)$$

$$\sum p' = 26,1 + 65,3 = 91,4 \text{ кВт}.$$

Оскільки у відносно вузькому діапазоні температур можна приймати кінцевий перегрів (перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища)  $\tau_{\text{кн}}$  пропорційним сумі втрат [1], то в точці  $e$  характеристики на рис. 1 очікуваний перегрів складе:

$$\tau'_{\text{кн}} = \tau_{\text{кн}} \frac{\sum p'}{\sum p}, \quad (11)$$

$$\tau'_{\text{кн}} = 150 \cdot \frac{91,4}{18 + 65,3} \approx 165 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Нами не враховано деяке зростання механічних втрат при переході з точки  $b$  в точку  $e$ , що, очевидно, має призвести до певного додаткового підвищення температури. Але і при цьому кінцевий перегрів не перевищить допустимого для застосованого в двигуні класу ізоляції «Н», а під час роботи на ділянці характеристики  $eg$  втрати будуть тільки зменшуватись, тому що при  $U_1 = \text{const}$  з ростом частоти  $f_1$ , значення магнітного потоку буде зменшуватись.

У двигуна СТА1200 ККД  $\eta_{\text{ном}} = 0,935$ , а коефіцієнт навантаження при цьому  $K'_{\text{нг}} = \sqrt{\alpha} = 0,525$ , що відповідає потужності  $P = 0,525 \cdot 1200 = 630$  кВт.

В точці *e* нового номінального режиму значення ККД буде:

$$\eta'_{\text{ном}} = \frac{P'_{\text{ном}}}{P'_{\text{ном}} + \sum p'} \quad (12)$$

$$\eta'_{\text{ном}} = \frac{1600}{1600 + 91,4} = 0,946,$$

тобто він істотно збільшиться, в порівнянні з попереднім значенням.

Коефіцієнт навантаження, при якому в новому номінальному режимі ККД максимальний, буде:

$$K'_{\text{нг}} = \sqrt{\frac{P'_0}{P_K}} \quad (13)$$

$$K'_{\text{нг}} = \sqrt{\frac{26,1}{65,3}} = 0,632,$$

що відповідає потужності:

$$P' = 0,632 \cdot 1600 = 1011 \text{ кВт.}$$

Таким чином, енергетичні показники тягового двигуна при дотриманні закону регулювання  $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$  і підвищенні значень  $U_1$  и  $f_1$  істотно покращуються.

Оскільки на ділянці характеристики *eg* робота двигуна описується законом регулювання  $\omega\sqrt{M} = \text{const}$ , а в точці *e*  $M_{\text{ном}} = 10^4$  Н·м і  $\omega'_{\text{ном}} = 158,7 \text{ с}^{-1}$ , то:

$$\omega'_{\text{ном}}\sqrt{M_{\text{ном}}} = 158,7 \cdot \sqrt{10^4} = 15870.$$

Отже, при максимальній швидкості руху 250 км/год в точці *g* двигун розвиватиме момент:

$$M'_{\omega_{\text{max}}} = \left( \frac{\omega'_{\text{ном}}\sqrt{M_{\text{ном}}}}{\omega'_{\text{max}}} \right)^2 = \left( \frac{15870}{429} \right)^2 = 1368 \text{ Н·м.} \quad (14)$$

Як показали розрахунки та тягово-енергетичні випробування електровоза ДСЗ, сила тяги одного тягового двигуна в номінальному режимі, тобто при роботі в точці *b*, становить  $F = 62,5$  кН. Очевидно, при роботі в точці *g* сила тяги електровоза, тобто чотирьох тягових двигунів, буде дорівнювати:

$$F'_{\omega_{\text{max}}} = 4,625 \cdot \frac{1368}{10^4} = 34,2 \text{ кН.}$$

Ця величина є вихідною для проведення тягових розрахунків і визначення маси потягу, який може везти такий електровоз зі швидкістю 250 км/год.

#### Загальні висновки

Асинхронний тяговий двигун СТА1200 при незмінній механічній передачі може без будь-яких змін і доробок (окрім підшипників) використовуватися на електровозі при швидкості руху до 250 км/год, реалізуючи в номінальному режимі при збереженні колишнього обертального моменту потужність 1600 кВт.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безрученко, В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу [Текст] : навч. посібник / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак – Д.: Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
2. Безрученко, В. М. Эффективность использования тяговых электродвигателей современного электроподвижного состава [Текст] / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – № 8 (102). – Ч. 2. – К., 2006.

Надійшла до редколегії 14.01.2010.

Прийнята до друку 20.01.2010.