

В. М. БЕЗРУЧЕНКО, О. А. ХОРОШКО (ДІПТ)

**ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ
МОЖЛИВОСТІ**

Розглянуто можливості асинхронного тягового електропривода при певній зчепній масі з урахуванням обмеження по зчепленню. Запропоновано варіант використання закону регулювання електропривода, що дозволяє більш раціонально реалізувати силу тяги. Показано можливість реалізації електровозом ДСЗ швидкостей до 220 км/год.

Ключові слова: асинхронний тяговий двигун, механічні характеристики, потужність, тягові характеристики, обмеження по зчепленню, закон регулювання, допустимий перегрів

Рассмотрены возможности асинхронного тягового электропривода при определенной сцепной массе с учетом ограничения по сцеплению. Предложен вариант использования закона регулирования электропривода, позволяющего более рационально реализовать силу тяги. Показана возможность реализации электровозом ДСЗ скоростей до 220 км/час.

Ключевые слова: асинхронный тяговый двигатель, механические характеристики, мощность, тяговые характеристики, ограничение по сцеплению, закон регулирования, допустимый перегрев

The possibilities of asynchronous traction electric motor drive are considered at the certain coupling mass taking into account the coupling restrictions. A variant of using the regulation law for electric motor drive allowing realizing traction force more rationally is offered. The possibility of reaching the speeds to 220 km/h for electric locomotive DS3 is shown.

Keywords: asynchronous traction motor, mechanical characteristics, power, traction characteristics, coupling restrictions, regulation law, permissible overheating

Раніше в роботах [1–3] були розглянуті можливості підвищення ефективності використання асинхронного тягового привода. Актуальність цього питання не зменшилась і в наш час. Навіть більше, сьогодні гостро стоїть питання про так звану «недостатню потужність» цього привода, центральною ланкою котрого в електровозі ДСЗ є асинхронний тяговий двигун СТА1200. Можна було б створити новий тяговий двигун, однак, як показала практика, для цього, з урахуванням його випробувань та експлуатаційних доробок, знадобиться кілька років.

Розглянемо питання про те, яким чином може бути використаний легкий та надійний тяговий двигун СТА1200 на нових локомотивах. Двигун має наступні 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;
- номінальна / максимальна частота обертання:

$$\frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{max}}} = 1138 / 3030 \text{ об/хв};$$

- обмотки статора з'єднані «зіркою»;
- струм статора: $I_1 = 450$ А;
- ізоляція класу «Н»;
- кінцевий перегрів обмотки статора:

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

- кількість пар полюсів: $p = 3$ А;
- коефіцієнт корисної дії: $\eta_{\text{ном}} = 0,935$;
- втрати холостого ходу і короткого замикання відповідно дорівнюють $p_0 = 18$ кВт і $p_{\text{к}} = 65,3$.

В [3] було відмічено, що ковзанням у номінальному режимі, через його невелике значення, для простоти розрахунків можна знехтувати, тобто $S \approx 0$.

Слід пам'ятати, що тягові властивості привода не характеризуються лише параметрами двигуна, але й обмежуються зчепленням колеса з рейкою. Зупинимося на цьому положенні, котре, на жаль, не завжди враховується належним чином.

Відомо, що при визначенні коефіцієнта зчеплення отримують великий масив експериментальних точок, через які потім проводять деяку середню криву, котру описують рівнянням, що

використовується в тягових розрахунках. Розкид цих точок вельми великий та залежить від значної кількості факторів [6].

Для електровозів змінного струму з плавним регулюванням коефіцієнт зчеплення визначають за формулою, яка рекомендована в [5]:

$$\psi_{\pi} = 0,294 + \frac{4,2}{50 + 6 \cdot V} - 0,00063 \cdot V, \quad (1)$$

де V – швидкість електровоза, км/год.

Для електровоза з асинхронними тяговими двигунами, враховуючи специфіку їх характеристик та більшу стійкість завдяки відповідній системі управління, можна допустити підвищення коефіцієнта зчеплення, з нашої точки зору, не більше, ніж на 15 %, тобто прийняти розрахунковий коефіцієнт зчеплення з урахуванням виразу (1):

$$\psi_{\text{пр}} = 1,15 \cdot \psi_{\pi}. \quad (2)$$

Іноді цей коефіцієнт приймають рівним 1,18.

Це з достатньою ступінню точності підтверджується експлуатаційними випробуваннями електровоза ДСЗ.

Маючи на увазі, що зчепна маса електровоза ДСЗ на одну вісь становить 23 т, діаметр ведучого колеса 1,25 м, передавальне відношення тягового редуктора рівне 3,826, а його КПД – 0,97, по відомим формулам [6] розрахуємо в залежності від швидкості руху коефіцієнт зчеплення по (2), обмеження по зчепленню, силу тяги однієї колісної пари $F_{\text{цп}}$, силу тяги F та його частоту обертання n . Результати цих розрахунків зведемо до табл. 1.

Обмеження по зчепленню:

$$F_{\text{цп}} = 23 \cdot 9,81 \cdot \psi_{\text{пр}}. \quad (3)$$

За даними табл. 1 побудовано характеристики на рис. 1, де 1 – характеристика обмеження сили тяги по зчепленню; ділянка тягової характеристики 2 ab , на якій відбувається регулювання частоти та амплітуди напруги по закону $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$, а сила тяги $F = \text{const}$ та ділянка bc , яка являє собою криву гіперболічного виду, рівняння котрої $V \cdot \sqrt{F} = \text{const}$, причому тут, після виходу в точку номінального режиму b , змінюється лише частота, а напруга $U_1 = \text{const}$ [4]. В точці b корисна потужність номінального режиму $P_{\text{ном}} = 1200$, що згідно до [4] відповідає швидкості:

$$V_{\text{ном}} = \frac{D_K \cdot n_{\text{ном}}}{5,3 \cdot \mu} = \frac{1,25 \cdot 1138}{5,3 \cdot 3,826} = 70 \text{ км/год}, \quad (4)$$

а сила тяги для однієї колісної пари:

$$F_{\text{ном}} = 3,6 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{V} = 3,6 \cdot \frac{1200}{70} = 61,7 \text{ кН}. \quad (5)$$

Таблиця 1

V , км/год	n , об/хв	$\psi_{\text{пр}}$	$F_{\text{цп}}$, кН
0	0	0,446	102,6
20	324,4	0,361	83,1
40	648,9	0,334	76,9
60	973,3	0,314	72,3
70	1136	0,305	70,3
80	1298	0,297	68,3
90	1460	0,288	66,3
120	1947	0,264	61
140	2271	0,248	57,1
160	2596	0,233	53,6
200	3244	0,202	46,5
220	3569	0,187	43

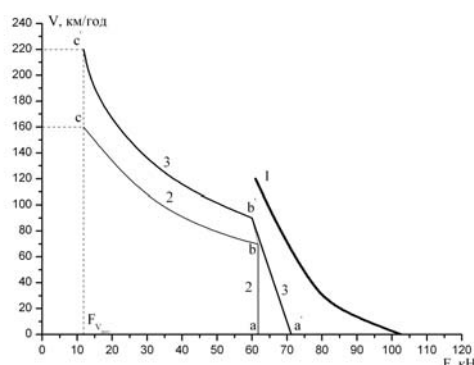


Рис. 1

На ділянці ab тягової характеристики (рис. 1) відношення $\frac{U_{1\phi}}{f_1} = \frac{1080}{58} = 18,62$, а на ділянці bc добуток

$$V \cdot \sqrt{F} = 70 \cdot \sqrt{61,7} = 550. \quad (6)$$

Сила тяги при максимальній швидкості 160 км/год в точці c з урахуванням (6) буде:

$$F_{V_{\text{max}}} = \left(\frac{550}{160} \right)^2 = 11,8 \text{ кН}. \quad (7)$$

Аналіз результатів розрахунків по табл. 1 показує, що при швидкості $V = 70$ км/год обмеження по зчепленню згідно (3) складає $F_{\text{ц}} = 67,15$. Таким чином по рівнянню (5) в номінальному режимі запас по зчепленню знаходиться в межах 8 %, тобто в цьому режимі електровоз ДСЗ працює практично на межі по зчепленню, що слід враховувати при формуванні маси поїзда, призначеного для чотиривісного електровоза ДСЗ.

Раніше в [1 – 2] показано, що потужність двигуна СТА1200 може бути підвищена при певних умовах, як в бік збільшення швидкості, так і в бік збільшення сили тяги. Тому тепер будемо намагатися сформувати таку характеристику двигуна, котра не призводила б до недопустимих перевантажень двигуна та зривам зчеплення.

Одним з можливих варіантів такої характеристики буде крива 3 на рис. 1, тобто крива $a'b'c'$, де точка b' є точкою номінального режиму при швидкості $V = 90$ км/год і силі тяги $F = 60$ кН; точка c' відповідає попередньому значенню сили тяги $F_{V_{\text{max}}} = 11,8$ кН, ділянка характеристики $b'c'$ сформована за законом $V \cdot \sqrt{F} = \text{const}$ при $U_1 = U_{\text{ном}}$ (незмінному), а ділянка $a'b'$ сформована за законом

$$\frac{U_1}{f_1^{1,0009}} = \text{const} . \quad (8)$$

Тут за значення прийняті параметри точки b' , тобто $U_{1\text{ном}} = 1400$ В, $f'_{1\text{ном}} = 74,6$ Гц, $V'_{\text{ном}} = 90$ км/год.

Ці параметри отримані при використанні рівняння М. П. Костенко [4] для частотнорегульованого тягового двигуна:

$$\frac{U_1}{U'_{\text{ном}}} = \frac{V}{V'_{\text{ном}}} \cdot \sqrt{\frac{F}{F_{\text{ном}}}} . \quad (9)$$

Підставивши в (8) значення параметрів, що відповідають точці b' , а саме $\frac{U_1}{1400} = \frac{V}{90} \cdot \sqrt{\frac{F}{60}}$, та перетворивши, отримуємо рівняння ділянки $a'b'$ характеристики 3 на рис. 1:

$$F = \frac{U_1^2}{4V^2} . \quad (10)$$

Вважаючи, як це було сказано вище, що швидкість V пропорційна частоті f_1 , використовуючи (7) та (9), розрахуємо ділянку $a'b'$ ха-

рактеристики 3 на рис. 1. Результати розрахунків зведемо до табл. 2.

Таблиця 2

F , кН	V , км/год	$U_{1\phi}$, В	f_1 , Гц	U_1/f_1
70	0	0	0	-
68,5	20	331	16,6	20
66,5	40	652	33,1	19,7
64,5	60	964	49,7	19,4
63,5	70	1116	58	19,2
62,5	80	1265	66,3	19,0
60	90	1400	74,6	18,7

Аналіз даних табл. 2 показує, що значення $\frac{U_1}{f_1}$ повністю відповідає рівнянню (8). Швидкість 90 км/год, фазна напруга 1400 В, сила тяги 60 кН та частота 74,6 Гц відповідають новому номінальному режиму, визначеному точкою b' на рис. 1. Потужність двигуна тут згідно (5) рівна $P'_{\text{ном}} = \frac{60 \cdot 90}{3,6} = 1500$ кВт. Як видно з гра-

фіка на рис. 1, подальше підвищення потужності двигуна, як з точки b в бік збільшення сили тяги, так і з точки b' при зчепній масі однієї колісної пари 23 т, недоцільно, бо вона не може бути реалізована через обмеження по зчепленню.

Ділянка нової характеристики $b'c'$, як і раніше, відповідає закону регулювання (6), тобто $90 \cdot \sqrt{60} = 697$. Отже, при збереженні попереднього значення сили тяги $F_{V_{\text{max}}}$ максимальна швидкість буде $\frac{697}{\sqrt{11,8}} = 203$ км/год при частоті

обертання ротора двигуна $n_{\text{max}} = \frac{203}{70} \cdot 1138 \cong \cong 3300$ об/хв, що цілком допустимо для підшипників, що використовуються в наш час. Швидкість руху може бути підвищена навіть до 220 км/год при відповідному зменшенні сили тяги до $F_{\text{min}} = \left(\frac{697}{220}\right)^2 = 10$ кН.

Частота обертання ротора двигуна при цьому буде рівна $n'_{\text{max}} = \frac{220}{203} \cdot 3300 \cong 3580$ об/хв, а частота живлячої напруги $f'_{\text{max}} = 74,6 \cdot \frac{220}{90} =$

= 182 Гц, що є допустимим для сучасних IGBT-транзисторів.

Таким чином, сформувавши нову тягову характеристику 3 на рис. 1, отримаємо наступні номінальні параметри тягового електропривода: $V'_{ном} = 90$ км/год; $F'_{ном} = 60$ кН; $U'_{1фном} = 1400$ В; $f'_{ном} = 74,6$ Гц; $P'_{ном} = 1500$ кВт.

Розглянемо тепер можливість такого підвищення потужності двигуна з точки зору його нагріву, а також його енергетичні показники. Як бачимо, при переході з точки *b* на рис. 1 в точку нового номінального режиму *b'* момент двигуна, його струм I_1 , а отже, і втрати короткого замикання залишаються практично незмінними, навіть дещо зменшуються, оскільки в точці зменшено силу тяги. Нові втрати короткого замикання дорівнюють приблизно за даними табл. 2:

$$p'_k = 65,3 \cdot \left(\frac{60}{63,5} \right)^2 = 58,3 \text{ кВт.}$$

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

Відомо [4], 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 *a'b'* магнітний потік практично $\Phi \approx \text{const}$, значить і $B \approx \text{const}$, і тоді втрати холостого ходу зміняться лише у зв'язку зі змінною частоти і в точці *b'* досягнуть значення:

$$p'_0 = p_0 \cdot \left(\frac{f'_{1ном}}{f_{1ном}} \right)^{1,3}, \quad (11)$$

$$p'_0 = 18 \cdot \left(\frac{74,6}{58} \right)^{1,3} = 25 \text{ кВт.}$$

Тоді сумарні втрати в новому номінальному режимі будуть дорівнювати:

$$\sum p' = p'_0 + p'_k, \quad (12)$$

$$\sum p' = 25 + 58,3 = 83,3 \text{ кВт.}$$

Оскільки у відносно вузькому діапазоні температур можна приймати кінцевий перегрів (перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища) $\tau_{кн}$ пропорційним сумі втрат [4], то в точці *b'* характеристики 3 на рис. 1 очікуваний перегрів складе:

$$\tau'_{кн} = \tau_{кн} \frac{\sum p'}{\sum p}, \quad (13)$$

$$\tau'_{кн} = 150 \cdot \frac{83,3}{18 + 65,3} = 150 \text{ }^\circ\text{C},$$

тобто перегрів залишається незмінним.

Нами не враховано деяке зростання механічних втрат при переході з точки *b* в точку *b'*, 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 *b'c'* втрати будуть тільки зменшуватись, тому що при $U_1 = \text{const}$ з ростом частоти f_1 значення магнітного потоку буде зменшуватись.

В точці *b'* нового номінального режиму значення ККД з урахуванням (12) буде:

$$\eta'_{ном} = \frac{P'_{ном}}{P'_{ном} + \sum p'}, \quad (14)$$

$$\eta'_{ном} = \frac{1500}{1500 + 83,3} = 0,947,$$

тобто він дещо збільшиться, в порівнянні з попереднім значенням.

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

$$K'_{нг} = \sqrt{\frac{p'_0}{p'_k}}, \quad (15)$$

$$K'_{нг} = \sqrt{\frac{25}{83,3}} = 0,5478,$$

що з урахуванням (15) відповідає потужності:

$$P' = 0,5478 \cdot 1500 = 822 \text{ кВт.}$$

Таким чином, енергетичні показники тягового двигуна при дотриманні закону регулювання $\frac{U_1}{f_1^{1,0009}} = \text{const}$ і підвищенні значень U_1 і f_1 будуть не гірше, ніж попередні.

Слід додати, що застосування цих параметрів двигуна потребує модернізації інвертора, який є невіддільним від асинхронного двигуна, як невіддільний колектор – інвертор від якоря двигуна постійного струму. Це питання розглянуто в [2].

Таким чином, асинхронний тяговий двигун СТА1200 з ізоляцією класу «Н» допускає сут-

теве підвищення потужності і швидкості, що виключає необхідність створення нового двигуна. За необхідністю в двигуні може бути застосована нова сучасна ізоляція, яка має назву ізоляція «класу 200», для якої допустимий перегрів складає 200 °С.

Загальні висновки

1. На електровозі змінного струму з асинхронним тяговим електроприводом та зчипною масою однієї колісної пари 23 т недоцільно застосовувати асинхронний двигун потужністю більше 1500 кВт, оскільки цю потужність неможливо використовувати за умовами зчеплення.

2. При підвищенні потужності двигуна до 1500 кВт доцільно дещо зменшити силу тяги номінального режиму у порівнянні з сучасною на електровозі ДСЗ, щоб мати більший запас по зчепленню.

3. Сучасний двигун СТА1200 без будь-яких переробок може забезпечити потужність 1500 кВт при швидкості 90 км/год на електровозі ДСЗ. Максимальна швидкість електровоза може бути 220 км/год.

4. При створенні нової програми керування асинхронним електроприводом доцільно на першому етапі регулювання, від зрушення до досягнення точки номінального режиму, застосовувати зміну (підвищення) напруги і частоти живлення за законом

$\frac{U_1}{f_1^{1,0009}} = \text{const}$, що дозво-

лить ліпше використовувати діапазон сили тяги за умовами зчеплення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безрученко, В. М. Эффективность использования тяговых электродвигателей современного электроподвижного состава [Текст] / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – К., 2006. – № 8 (102). – Ч. 2.
2. Безрученко, В. М. Тяговый асинхронный электропривод для скоростного электровоза [Текст] / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – К., 2008. – № 5 (123). – Ч. 2.
3. Безрученко, В. М. Підвищення ефективності тягового асинхронного електропривода [Текст] / В. М. Безрученко, Ю. С. Бондаренко, О. А. Хорошко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 32. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010.
4. Безрученко, В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу [Текст] : навч. посібник / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
5. Режимы работы магистральных электровозов [Текст] / под ред. О. А. Некрасова. – М.: Транспорт, 1983. – 231 с.
6. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

Надійшла до редколегії 21.04.2011.

Прийнята до друку 28.04.2011.