

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3.072.6

О. Б. Мокін¹
 Б. І. Мокін¹
 Д. А. Шокар'юв²

ДО ПИТАННЯ ПРО ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ

¹Вінницький національний технічний університет;²Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського

Доведено, що відоме співвідношення, виведене академіком М. П. Костенко, яке пов'язує частоту струму, що живить частотно-регульований асинхронний короткозамкнений електродвигун, з напругою обмотки статора і моментом на валу, вимагає корекції; отримано це співвідношення в уточненому вигляді та побудовані характеристики електропривода з використанням отриманого уточненого співвідношення.

Ключові слова: асинхронний двигун, схема заміщення, механічна характеристика.

Вступ

Багато років тому академік Костенко у своєму підручнику [1] запропонував співвідношення

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f}{f_n} \sqrt{\frac{M}{M_n}}, \quad (1)$$

яке пов'язує частоту f струму, що живить частотно-регульований асинхронний короткозамкнений електродвигун, з напругою U його обмотки статора і моментом M на валу, у якому індексом «н» частота, напруга і момент прив'язуються до номінального режиму.

Із цього співвідношення випливає, що регульовальна характеристика частотно-регульованого асинхронного електродвигуна, яка пов'язує частоту живильного струму з моментом на валу, повинна мати гіперболічний характер, як це показано на рис. 1, і бути подібною до регульовальної характеристики електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, чого в асинхронному електродвигуні досягнуто не може бути в принципі, оскільки швидкість обертання ротора цього електродвигуна при нульовому моменті зобов'язана бути рівною синхронній, а не прямувати у нескінченність.

Зауважимо, що для побудови графіка регульовальної характеристики у вигляді, показаному на рис. 1, ми привели вираз (1) до вигляду

$$f = f_n \frac{U}{U_n} \sqrt{\frac{M_n}{M}}, \quad (2)$$

а тому є сенс для регульовальної характеристики частотно-регульованого короткозамкненого асинхронного електропривода знайти замість виразу (1) точніше співвідношення, яке не входило б у протиріччя з принципом роботи асинхронного електродвигуна — це і є метою цієї роботи.

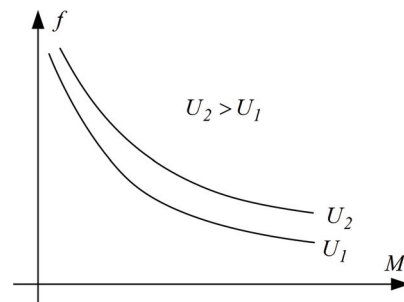


Рис. 1. Графік регульовальної характеристики, побудованої з використанням (2)

Результати дослідження

Відомо [1], що момент на валу короткозамкненого асинхронного електродвигуна може бути виражений таким співвідношенням

$$M = k\Phi_c I_p^a, \quad (3)$$

у якому Φ_c — магнітний потік, створюваний полем статора; I_p^a — активна складова струму ротора; а k — коефіцієнт, що відображає паспортні дані електродвигуна.

З кривої намагнічування випливає, що

$$\Phi_c = k_c(I_c)I_c, \quad (4)$$

де I_c — струм у гілці намагнічування обмотки статора, а $k_c(I_c) = \frac{\Phi_c}{I_c}$ — коефіцієнт зв'язку між

струмом у гілці намагнічування обмотки статора і магнітним потоком на кривій намагнічування, значення якого в загальному випадку залежить від струму, але яке на лінійній її частині, що відповідає ненасиченому стану сталі статора (аж до номінального режиму), можна вважати постійним, тобто вважати, що $k_c(I_c) = k_c$. Для Г-подібної схеми заміщення короткозамкненого асинхронного електродвигуна [1] струм у гілці намагнічування обмотки статора можна знайти зі співвідношення

$$I_c = \frac{U}{z_c} = \frac{U}{\sqrt{r_c^2 + x_c^2}}, \quad (5)$$

у якому U — діюче значення напруги, прикладеної до обмотки статора, а, r_c , x_c — активний і реактивний опори гілки намагнічування обмотки статора, відповідно. З урахуванням співвідношень (4), (5), вираз (3) набуде вигляду:

$$M = kk_c(I_c) \frac{U}{\sqrt{r_c^2 + x_c^2}} I_p^a. \quad (6)$$

А активну складову струму ротора при тій же Г-подібній схемі заміщення короткозамкненого асинхронного електродвигуна можна знайти зі співвідношення

$$I_p^a = \frac{E_p}{z_p} \cos \psi_p = \frac{E_p^* s}{\sqrt{(r_p^*)^2 + (sx_p^*)^2}} \cdot \frac{r_p^*}{\sqrt{(r_p^*)^2 + (sx_p^*)^2}} = \frac{E_p^* sr_p^*}{(r_p^*)^2 + (sx_p^*)^2}, \quad (7)$$

у якому E_p — електрорушійна сила, що наводиться в короткозамкненій обмотці ротора; z_p — повний опір цієї обмотки; ψ_p — кут між векторами е. р. с. і струму в короткозамкненій обмотці (зірочками позначені величини, приведені до обмотки статора), а s — ковзання, яке дорівнює

$$s = \frac{n_c - n}{n_c} = \frac{f_c - f}{f_c}, \quad (8)$$

де f_c — частота, що відповідає синхронній швидкості n_c обертання поля статора, а f — частота, що відповідає поточній швидкості n обертання ротора. Підставляючи вираз (7) до виразу (6), отримаємо:

$$M = kk_c(I_c) \frac{U}{\sqrt{r_c^2 + x_c^2}} \cdot \frac{E_p^* sr_p^*}{(r_p^*)^2 + (sx_p^*)^2}. \quad (9)$$

Далі нагадаємо, що при Г-подібній схемі заміщення короткозамкненого асинхронного електродвигуна має місце приближена рівність

$$E_p^* \approx U. \quad (10)$$

А тепер з використанням виразів (9) і (10) знайдемо відношення моменту поточного до моменту номінального. Отримаємо вираз

$$\frac{M}{M_H} = \frac{k_c(I_c)}{k_c(I_{cH})} \cdot \frac{U^2}{U_H^2} \cdot \frac{s \left[(r_p^*)^2 + (s_H x_p^*)^2 \right]}{s_H \left[(r_p^*)^2 + (s x_p^*)^2 \right]} \quad (11)$$

Якщо переписати вираз (11) у відповідності зі структурою запису виразу (1), то отримаємо:

$$\frac{U}{U_H} = \sqrt{\frac{k_c(I_{cH})}{k_c(I_c)}} \cdot \sqrt{\frac{(r_p^*)^2 + (s x_p^*)^2}{(r_p^*)^2 + (s_H x_p^*)^2}} \cdot \sqrt{\frac{s_H}{s}} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_H}} \quad (12)$$

Порівнюючи вирази (1) і (12), бачимо, що ці вирази суттєво відрізняються. Однак, якщо врахувати, що в робочому діапазоні струмів статора

$$k_c(I_{cH}) \approx k_c(I_c), \quad (13)$$

а також врахувати те, що, як видно з наведеної на рис. 2 типової механічної характеристики короткозамкненого асинхронного електродвигуна і виразу (8), у робочому діапазоні зміни моменту має місце нерівність

$$s \ll 1, \quad (14)$$

що, у свою чергу, приводить до нерівності

$$(s x_p^*)^2 \ll (r_p^*)^2 \quad (15)$$

і, як наслідок, до наближеної рівності

$$(r_p^*)^2 + (s_H x_p^*)^2 \approx (r_p^*)^2 + (s x_p^*)^2, \quad (16)$$

то вираз (12) можна представити у вигляді

$$\frac{U}{U_H} = \sqrt{\frac{s_H}{s}} \sqrt{\frac{M}{M_H}} \quad (17)$$

А з урахуванням співвідношення (8) вираз (17) набуває вигляду:

$$\frac{U}{U_H} = \sqrt{\frac{f_c - f_H}{f_c - f}} \sqrt{\frac{M}{M_H}} \quad (18)$$

Порівнюючи вираз (1) з виразом (18), бачимо, що вони відрізняються тим, що в першому з них має місце відношення частот, а в другому — корінь квадратний з відношення різниць частот, що призводить до регульовальних характеристик, які різняться при використанні короткозамкненого асинхронного електродвигуна в системі частотно-регульованого електропривода. Покажемо це. Для цього перетворимо вираз (18) до вигляду

$$f = f_c - \frac{(f_c - f_H) U_H^2}{M_H U^2} M \quad (19)$$

Орієнтовний графік регульовальної характеристики, побудованої з використанням виразу (19) для двох значень напруги, показано на рис. 3.

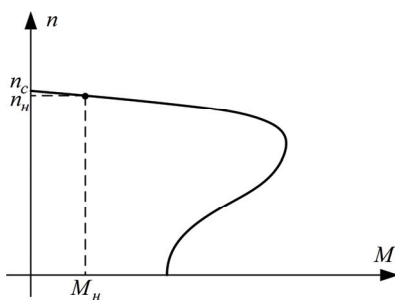


Рис. 2. Типова механічна характеристика короткозамкненого асинхронного електродвигуна

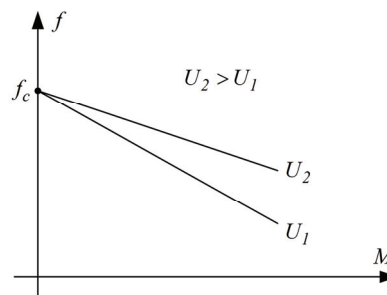


Рис. 3. Графік регульовальної характеристики, побудованої з використанням виразу (19)

Порівнюючи графіки регулювальних характеристик, наведені на рис. 1 і на рис. 3, бачимо, що в першому випадку короткозамкнений асинхронний електродвигун мав би вести себе як електродвигун постійного струму з послідовним збудженням, чого не може бути в принципі, виходячи з фізики процесів в асинхронному електродвигуні, а в другому випадку — як асинхронний електродвигун. Враховуючи те, що при зміні знака моменту в околі його нульового значення асинхронний електродвигун переходить у генераторний режим, що повинна відобразити його частотно-моментна регулювальна характеристика, можна стверджувати, що запропонована нами у вигляді (19) регулювальна характеристика, графік якої наведено на рис. 3, задовольняє цю властивість асинхронної електричної машини, у той час як регулювальна характеристика, що запропонована у вигляді (1) академіком М. П. Костенко, графік якої наведено на рис. 1, вказаної властивості асинхронної електричної машини не задовольняє.

Висновки

Показано, що регулювальна характеристика частотно-регульованого електропривода на основі асинхронного електродвигуна, яка запропонована академіком М. П. Костенко, не відповідає властивості оборотності асинхронної електричної машини і не може бути реалізована.

Запропоновано будувати частотно-регульований електропривод на основі короткозамкненого асинхронного електродвигуна з використанням регулювальної характеристики, запропонованої в цій роботі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Костенко М. П. Электрические машины. В 2-х ч. : учебн. для ВУЗов. Ч. 2 : Машины переменного тока / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергия. — 1973. — 648 с.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 11.02.2015

Мокін Олександр Борисович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, e-mail: abmokin@gmail.com;

Мокін Борис Іванович — акад. НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів.

Вінницький національний технічний університет;

Шокар'єв Дмитро Анатолійович — старший викладач кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: shokareff@gmail.com.

Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського

O. B. Mokin¹
B. I. Mokin¹
D. A. Shokariov²

To question of characteristics of variable-frequency drive with squirrel-cage induction motors

¹Vinnitsia National Technical University;

²Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

It is proved that the known ratio invented by the academician Kostenko and connecting the frequency of the current feeding the variable-frequency squirrel-cage induction motor with voltage of its winding of the stator and the moment on a shaft demands correction; this ratio in the specified form is received and characteristics of the electric drive with the use of the received specified ratio are constructed.

Keywords: induction motor, equivalent circuit, mechanical characteristics.

Mokin Oleksandr B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Renewable Energy and Transport Electrical Systems and Complexes, e-mail: abmokin@gmail.com;

Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Renewable Energy and Transport Electrical Systems and Complexes;

Shokariov Dmytro A. — Senior Lecturer of the Chair of Power Systems and Power Management, e-mail: shokareff@gmail.com

А. Б. Мокин¹
Б. И. Мокин¹
Д. А. Шокарев²

К вопросу о характеристиках частотно-регулируемого электропривода с короткозамкнутыми асинхронными электродвигателями

¹Винницкий национальный технический университет;

²Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского

Доказано, что известное соотношение, выведенное академиком М. П. Костенко и связывающее частоту тока, питающего частотно-регулируемый асинхронный короткозамкнутый электродвигатель, с напряжением его обмотки статора и моментом на валу, требует коррекции; получено это соотношение в уточненном виде и построены характеристики электропривода с использованием полученного уточненного соотношения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, схема замещения, механическая характеристика.

Мокин Александр Борисович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, e-mail: abmokin@gmail.com;

Мокин Борис Иванович — акад. НАПН Украины, д-р техн. наук, профессор кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов;

Шокарев Дмитрий Анатольевич — старший преподаватель кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: shokareff@gmail.com