

УДК 621.313.3

*Доктор техн. наук, професор Лущик В. Д.
магістр Карапка В. Д.
бакалавр Пік О. В.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

ДОДАТКОВИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ В АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНЕНОГО ДВИГУНА З КАСКАДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Описаний спосіб поліпшення пускових властивостей асинхронних двигунів з допомогою каскадного режиму роботи, який виникає, якщо короткозамикаючі кільця ротора розрізати, а на статорі застосовувати суміщену $2p_1/2p_2$ -полюсну обмотку.

Проблема і її зв'язок з науковими та практичними задачами. Всі відомі до теперішнього часу способи поліпшення пускових властивостей асинхронний двигунів призводять до погіршення енергетичних показників в номінальному режимі роботи.

Створення каскадних властивостей в асинхронному двигуні під час його пуску покращує його пускові властивості: зростає пусковий момент та зменшується пусковий струм. Каскадні властивості при пуску можна створити у асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором без помітного ускладнення технології його виготовлення. Досить на роторі короткозамкнені кільця виконати з розрізами. Розрізи в кільцях розміщені на однаковій відстані один від одного, при цьому розрізи одного короткозамкненого кільця розміщені проти розрізів другого кільця. Розрізи повинні бути розміщені проти зубців. Завдяки розрізам кілець в роторі утворюються додатково k короткозамкнених контурів [1].

Аналіз досліджень і публікацій. Роторна короткозамкнена обмотка завдяки розрізам короткозамкнених кілець утворює додаткове $2p_2$ – полюсне поле, яке обертається зустрічно з $2p_1$ – полюсним полем, створеним статорною обмоткою. Число пар полюсів додаткового $2p_2$ – полюсного поля визначається так

$$p_2 = k - p_1 \quad (1)$$

де k – число розрізів одного короткозамкненого кільця.

Число розрізів повинно бути мінімально можливим, тому що чим менша кількість розрізів, тим менше вони впливають на погіршення енергетичних показників двигуна в номінальному режимі. Для чотириполюсного двигуна ($2p_1=4$) раціонально зробити $k=3$. Тоді число пар полюсів додатково магнітного поля $p_2=3 \cdot 2 = 6$, [2].

Фази статорної $2p_1$ -полюсної обмотки повинні бути виконані із паралельних віток, які з'єднуються так, щоб вони утворювали короткозамкнені контури відносно $2p_2$ -полюсного поля.

Постанова задачі. Потрібно одержати кількісні результати збільшення пускового моменту завдяки розрізам коротко замикаючих кілець і застосуванню статорної обмотки, виконаної з паралельними вітками.

Виклад матеріалу і його результати. Розглянемо збільшення пускового моменту на прикладі асинхронного двигуна ЗВР180М4 потужністю $P_2=30\text{kVt}$. Його магнітний потік Φ на пару полюсів чотириполюсного ($2p_1=4$) магнітного поля становить $\Phi=0,016 \text{ Вб}$. Знайдемо струми в стержнях при наявності розрізів короткозамкнених кілець. Опір стержня

$$Z_{CT} = (0,76 + j2)10^{-4} \text{ Ом},$$

опір елементу кільця $r_k = 8,106 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}$, число пазів ротора $z_2 = 42$.

Короткозамкнену типу білячої клітки обмотку можна зобразити як таку, що складається із $n=z_2$ контурів (рис. 1), кожний із яких містить два рядом розміщених стержні, замкнених елементами двох короткозамкнених кілець. В кожному контурі протікає I_{kn} струм.

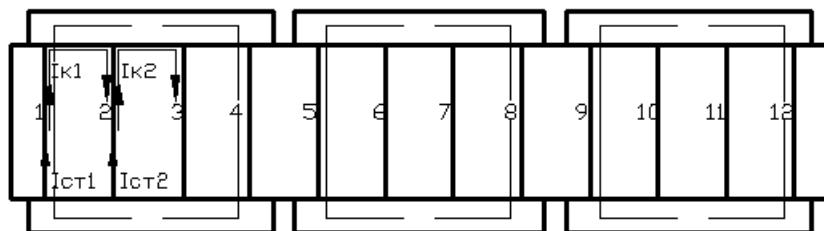


Рисунок 1 – Обмотка ротора з розрізами коротко замикаючих кілець

Використовуючи метод контурних струмів, складаємо систему $n=z_2$ рівнянь рівноваги напруг:

$$\begin{aligned}
1) \dot{E}_1 - \dot{E}_2 & \quad \dot{I}_{K1} Z_{k1} - \dot{I}_{K42} Z_{CT} - \dot{I}_{K2} Z_{CT} \\
2) \dot{E}_2 - \dot{E}_3 & \quad \dot{I}_{K2} Z_{k2} - \dot{I}_{K1} Z_{CT} - \dot{I}_{K3} Z_{CT} \\
3) \dot{E}_3 - \dot{E}_4 & \quad \dot{I}_{K3} Z_{k3} - \dot{I}_{K2} Z_{CT} - \dot{I}_{K4} Z_{CT} \\
& \dots \\
n) \dot{E}_n - \dot{E}_{n+1} & \quad \dot{I}_{Kn} Z_{kn} - \dot{I}_{K(n-1)} Z_{CT} - \dot{I}_{K(n+1)} Z_{CT} \\
& \dots \\
42) \dot{E}_{42} - \dot{E}_1 & \quad \dot{I}_{K42} Z_{k42} - \dot{I}_{K41} Z_{CT} - \dot{I}_{K1} Z_{CT}
\end{aligned} \tag{2}$$

Опір кожного контуру $Z_{kn} = (1,9 + j4)10^{-4}$ Ом. В місцях розрізів опори елементів кілець і відповідно опори контурів $Z_{k14} = Z_{k28} = Z_{k42} = 10^4$ Ом (розрізи виконані між стержнями 14 і 15, 28 і 29, 42 і 1).

ЕРС стержня E_n визначалась по формулі

$$E_n = 2,512 \sin \frac{360^0}{21} n \tag{3}$$

Були одержані значення контурних струмів. Струми в стержнях визначались по формулам

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{CT1} &= \dot{I}_{k1} - \dot{I}_{k42} \\
\dot{I}_{CT2} &= \dot{I}_{k2} - \dot{I}_{k1} \\
\dot{I}_{CT3} &= \dot{I}_{k3} - \dot{I}_{k2} \\
& \dots \\
\dot{I}_{CTn} &= \dot{I}_{kn} - \dot{I}_{k(n-1)}
\end{aligned} \tag{4}$$

Одержані величини струмів в стержнях роторної обмотки в комплексній формі. Кут відхилення струму в стержні $\dot{I}_{CT} = A + jB$ від ЕРС стержня визначається арктангенсом відношення уявної частини струму до його дійсної частини

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{B}{A}$$

Дійсна частина струму є його миттєве значення.

Щоб побудувати криву MPC стержнів короткозамкненої обмотки ротора в функції просторової координати, на якій розміщені стержні ротора числом $z_2=42$, необхідно по вісі ординат відкласти миттєві значення струмів стержнів, тобто їх дійсні частини.

Одержану криву MPC (рисунок 2), яка є періодичною функцією, розкладаємо графоаналітичним способом в ряд Фур'є.

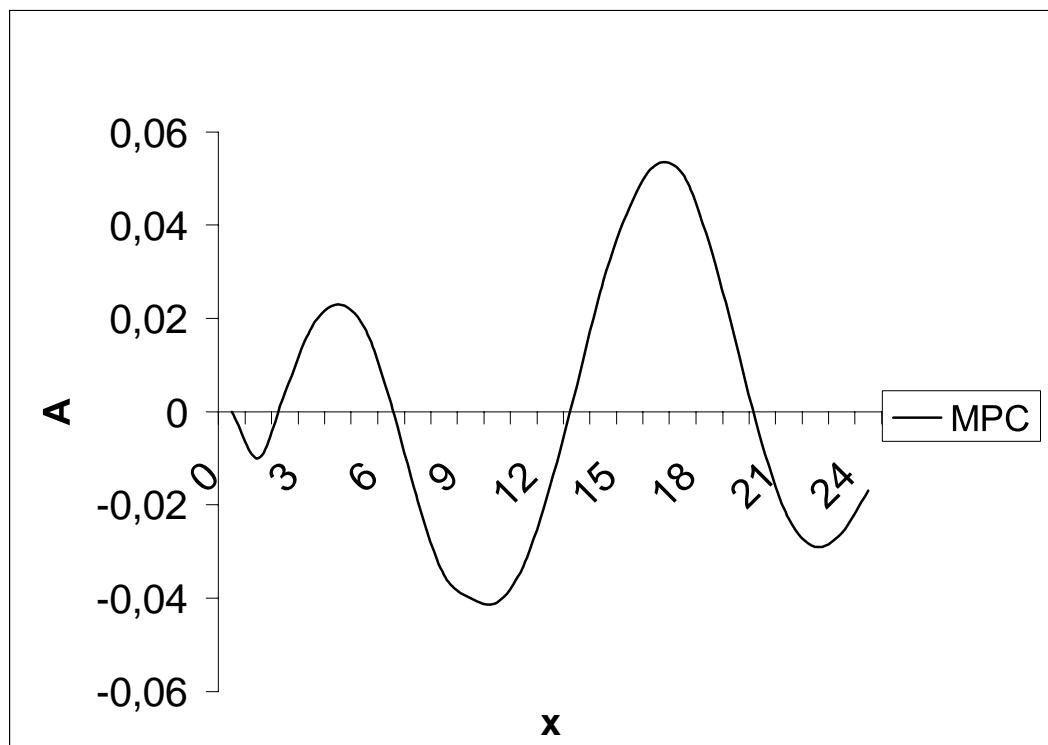


Рисунок 2 – Крива MPC стержнів короткозамкненої обмотки ротора

Нас цікавить амплітудне значення першої і другої гармоніки кривої MPC. Перша гармоніка – це $2p_2$ -полюсне поле, яке утворюється роторною обмоткою при розрізах короткозамикаючих кілець ($2p_2=2$). Друга гармоніка – $2p_1$ -полюсне поле ($2p_1=4$), утворюване статорною обмоткою. Величина $2p_1$ -полюсного поля практично не змінюється при виконанні розрізів, тому що величина цього поля визначається величиною підведененої до статорної обмотки напруги і числом витків фаз статорної обмотки.

Будь-яку гармоніку кривої MPC (рис.2) можна зобразити так:

$$A_v \sin(\nu\beta z + \psi_v) = A'_v \sin \nu\beta z + A''_v \cos \nu\beta z \quad (5)$$

де

$$A_v' = \frac{2 \sum_{z=1}^z I_{CTZ} \sin v \beta z}{z},$$

$$A_v'' = \frac{2 \sum_{z=1}^z I_{CTZ} \cos v \beta z}{z},$$

тут

$$\beta = \frac{360^0 \cdot p_2}{z_2} = \frac{360^0}{42}.$$

Амплітуда відповідної гармоніки

$$A_v = \sqrt{(A_v')^2 + (A_v'')^2} \quad (6)$$

Кут v – порядок гармонічної, $v=1$ для $2p_2$ -полюсного поля, $v=2$ для $2p_1$ -полюсного поля.

Виконавши відповідні розрахунки, знаходимо:

$$A_1=10,99; A_2=35,89.$$

Із співвідношення амплітудних значень цих гармонік знаходимо величину $2p_2$ -полюсного поля. При цьому потрібно враховувати, що магнітний потік пропорційний його амплітуді і полюсному діленню:

$$\Phi_{2p2} = \Phi_{2p4} \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{\tau_{2p2}}{\tau_{2p4}} \quad \Phi_{2p4} \cdot \frac{2A_1}{A_2} = 0,016 \frac{2 \cdot 10,99}{35,89} = 0,0098 B \text{ ВБ} \quad (7)$$

Відносно $2p_2$ -полюсного поля кожна фаза статорної обмотки являє собою короткозамкнений контур, що складається із двох послідовно ввімкнених паралельних віток, тому число витків фази для $2p_2$ -полюсного поля

$$W_1' = 2W_1 = 2 \cdot 112 = 224;$$

відповідно опори

$$Z_1' = 4Z_1 = 4 \cdot 1,113 = 4,452 \text{ Ом};$$

$$R_1' = 4R_1 - 4 \cdot 0,334 = 1,376 \text{ Ом};$$

$$X_1' = 4X - 4 \cdot 1,0585 = 4,234 \text{ Ом},$$

так як опір кожної паралельної вітки в два рази більший опору фази.

ЕРС, яка наводиться в кожній фазі статорної обмотки $2p_2$ -полясним полем

$$E_{2p2} = 4,44 f' W_1 K_{o61}' \Phi_{2p2} - 4,44 f' \cdot 2W_1 K_{o61}' \Phi_{2p2} \quad (8)$$

Частота f' визначається так:

$$f_1' = f_1 - \frac{n(p_1 + p_2)}{60} \quad (9)$$

при пуску $f_1' = f$.

Обмотковий коефіцієнт K_{o61}' вираховуємо, використовуючи методику, описану в (2). Записуємо в n всі пази із сторонами котушок, в яких при обході фази, наприклад фази А, напрям обходу направлений знизу вгору, під κ – пази, в яких напрям обходу направлений в протилежному напрямі, згори вниз.

$$n = 1, 2, 3, 4, 23, 24, 25, 26, 35, 36, 37, 38, 37, 38, 39, 40$$

$$\kappa = 11, 12, 13, 14, 13, 14, 15, 16, 25, 26, 27, 28, 47, 48, 1, 2$$

ЕРС фази, яка наводиться $2p_2$ -полясним полем, є комплексною величиною:

$$\dot{E}_1' = \sum_n \cos n\alpha_1 - \sum_k \cos k\alpha_1 + j \left[\sum_n \sin n\alpha_1 - \sum_k \sin k\alpha_1 \right] A_1 + jB_1 \quad (10)$$

Кут α_1 – кут між двома поряд розміщеними пазами в $2p_2$ -полясному полі,

$$\alpha_1 = \frac{360^0 \cdot p_2}{z_1} - \frac{360^0}{48} = 7,5^0$$

Модуль комплексної величини E_1' є геометрична сума ЕРС всіх активних сторін розглядуваної фази

$$E_1' = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (11)$$

а відношення геометричної суми до арифметичної суми всіх активних сторін фази дає нам обмотковий коефіцієнт фази відносно 2р₂-полюсного поля:

$$K_{o\delta 1} = \frac{E_1'}{\sum n + \sum k} = 0,482 \quad (12)$$

Підставляємо всі одержані дані в формулу (8) і отримуємо
 $E_{2p2}=233,9$ В

Діюче значення струму I_1' в кожній фазі статорної обмотки від 2р₂-полюсного поля

$$I_1' = \frac{E_{2p2}}{4Z_1} = \frac{233,9}{4,452} = 52,54 \text{ A} \quad (13)$$

Додатковий електромагнітний момент, створений в результаті взаємодії активної складової струму I_1' з 2р₂-полюсним полем при пуску

$$M' = B_{\delta 2p2} \cdot l_\delta I_{1cep}' \cos \psi_1' \cdot N \cdot \frac{D}{2} \quad (14)$$

Враховуючи, що

$$B_{\delta 2p2} = \frac{\Phi_{2p2}}{\tau_{2p2} l_\delta}, \quad I_{1cep}' = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_1', \quad \cos \psi_1' = \frac{r_1}{Z_1},$$

$$D = 2p_2 \cdot \tau_{2p2}, \quad N = 2W_k z_1$$

де W_k – число витків котушки, формула (14) набуває такого вигляду:

$$M' = \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} p_2 W_k z_1 \Phi_{2p2} \cdot T_1 \frac{r_1}{Z_1} \quad (15)$$

i, підставляючи $p_2=1$, $W_k = 14$, $z_1 = 48$, $\Phi_{2p2} = 0,016 \text{ Вб}$, $I_1 = 52,54 \text{ A}$, $r_1 = 0,344 \text{ Ом}$, $Z_1 = 1,113 \text{ Ом}$, одержимо $M' = 62,622 \text{ Нм}$, що складає 20% від пускового моменту асинхронного двигуна, виконаного без розрізів короткозамикаючих кілець.

Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напряму. На 20% збільшується пусковий момент в асинхронного двигуна, виконаного з розрізами коротко замикаючих кілець і з паралельними вітками в статорній обмотці.

Одержані дані близько співпадають з результатами експеримента-льних досліджень.

Описаний спосіб покращення пускових характеристик є перспективним і вимагає подальших досліджень та впровадження в серійне виробництво.

Описан способ улучшения пусковых свойств асинхронных двигателей с помощью каскадного режима работы, который возникает, если разрезать короткозамыкающие кольца ротора, а на статоре применить совмещенную 2р₁/2р₂-полюсную обмотку.

Method of improving asynchronous engines starter properties based on realization of cascade rate of asynchronous machine functioning with the help of matched windings on the stator and rotor is described.

Бібліографічний список

1. Лущик В.Д. Асинхронні двигуни з каскадними властивостями при пуску. //Електротехніка та електроенергетика. -2004.-№1. – с.69-73.
2. Лущик В.Д. Суміщені електричні машини та апарати.-К.: Техніка, 1993. – 203с. Мова рос.