

*д.т.н. Лущик В. Д.,
Іваненко В.С.
(ДонДТУ, Алчевськ, Україна),
Карапка В.Д.
(ДП “Первомайськвугілля”)*

АСИНХРОННИЙ КАСКАДНИЙ ДВИГУН З СУМІЩЕНОЮ ФАЗНОЮ ОБМОТКОЮ НА РОТОРІ

Розглянутий восьмиполюсний каскадний асинхронний двигун з суміщеною фазною обмоткою на роторі, який має кращі пускові характеристики. Досліджено весь спектр гармонік, що створюються каскадною обмоткою в роторі, і їх вплив на роботу двигуна.

Ключові слова: асинхронний двигун, фазна обмотка, ротор, каскадна обмотка, секція.

Рассмотрен восьмиполюсный каскадный асинхронный двигатель с совмещенной фазной обмоткой на роторе, имеющий улучшенные пусковые характеристики. Исследован весь спектр гармоник, которые создаются каскадной обмоткой в роторе и их влияние на работу двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, фазная обмотка, ротор, каскадная обмотка, секция.

Експериментальні дослідження каскадних асинхронних двигунів з короткозамкненими роторами із суміщеними обмотками підтверджують високу ефективність суміщення обмоток. Так, наприклад, в двигуні ЕКВ4УС-2 для стругів потужністю $P_2=110$ кВт виробництва Первомайського електромеханічного заводу імені К. Маркса пусковий момент збільшився в 1,53 рази, максимальний – в 1,16, мінімальний – в 1,5 рази, провал в кривій моменту відсутній, зникає можливість перекидання двигуна. Коефіцієнт корисної дії в номінальному режимі зріс на 1% завдяки збільшенню поперечного перерізу стержнів роторної обмотки, що в звичайних двигунах серійного виконання не практикується із-за погіршення пускових характеристик [1].

В конвеєрному двигуні ВКДВ250LC4 потужністю 132 кВт, а також в двигунах цієї ж серії потужністю 160 і 200 кВт «Донецького електротехнічного заводу» пусковий момент збільшився на 23%, енергетичні показники в номінальному режимі залишились незмінені [3].

Але найбільш ефективно застосування каскадних властивостей має місце в асинхронних двигунах з фазною обмоткою на роторі. Якщо в асинхронних двигунах з короткозамкненими роторами каскадні властивості при пуску використовуються частково, щоб не погіршити енергетичні показники в номінальному режимі (розрізають короткозамикаючі кільця тільки верхньої клітки паза), то в асинхронних двигунах з фазною обмоткою в роторі ми маємо можливість використати каскадні властивості з максимально можливою ефективністю. Так, наприклад, в двигуні МА36-52/6Ф потужністю 125 кВт Первомайського електромеханічного заводу, виконаного із суміщеними обмотками по каскадній схемі, пусковий струм при розімкненій роторній фазній обмотці зменшується в 1,66 рази, пусковий момент збільшується в 1,82 рази порівняно з двигуном серійного виконання з накоротко замкненими контактними кільцями [1,2]. Енергетичні показники в номінальному режимі абсолютно однакові порівняно з двигуном серійного виконання. Як показують розрахунки, збільшення пускового моменту можна досягти в три рази, якщо статорну обмотку виконати кроком не $u=10$, а $u=9$.

Тому робота по створенню і удосконаленню асинхронних каскадних двигунів з фазною обмоткою є важливою і актуальною. Відомі випадки із практики роботи гірничих електромеханіків, коли на шахтах використовують асинхронні двигуни не з короткозамкненим, а з фазним ротором з огляду на невеликий пусковий струм цих двигунів. Якщо не потрібне регулювання швидкості, асинхронні каскадні двигуни з фазною обмоткою можна зробити безконтактними.

Розглянемо переконструювання восьмиполюсного асинхронного двигуна ВАОК315М-8 в асинхронний каскадний двигун. Роторна обмотка в каскадному режимі при пуску поряд з $2p_1$ -полюсним полем ($2p_1=8$) повинна утворювати $2p_2$ -полюсне поле, яке буде обертатись в зворотньому напрямі. Як показують результати теоретичних і експериментальних досліджень, зворотно-обертове $2p_2$ -полюсне поле буде утворюватись, якщо на роторі виконати n короткозамкнених котушкових груп, де $n=p_1+p_2$ [1]. Назвемо цю обмотку каскадною обмоткою.

Експериментами було підтверджено, що для ефективного суміщення обмоток число пар полюсів p_2 не повинно відрізнятись від p_1 більше ніж в 2 рази і може бути як менше p_1 , так і більше. Вибір оптимального значення p_2 для кожної конкретної машини в залежності від призначення цієї машини та умов її роботи – це окреме дослідження, яке ще потрібно буде провести. В даному випадку, по аналогії з уже дослідженим шестиполюсним двигуном МА36-52/6Ф, приймаємо $p_2=2p_1$, звідки $n=p_1+p_2= p_1+2p_1=3p_1=12$. Для більш простої технології

виконання каскадних котушкових груп доцільно замкнути початки і окремо кінці секцій цих котушкових груп і з'єднати їх шиною. Число пазів ротора $Z_2=84$ (в серійному двигуні $Z_2=75$). Каскадна обмотка займає $\approx 43\%$ пазового простору. Решту пазового простору займає трифазна восьмиполюсна хвильова обмотка стержневого типу, яка виводиться на контактні кільця. Під кожною парою полюсів $2p_1$ -полюсного поля, створеного статорною обмоткою, знаходиться три короткозамкнені каскадні котушкові групи. Щоб дізнатися, які гармоніки, їх амплітудне значення і напрям обертання будуть створюватись роторною каскадною обмоткою, достатньо розглянути спектр гармонік, що створюються трьома каскадними короткозамкненими котушками.

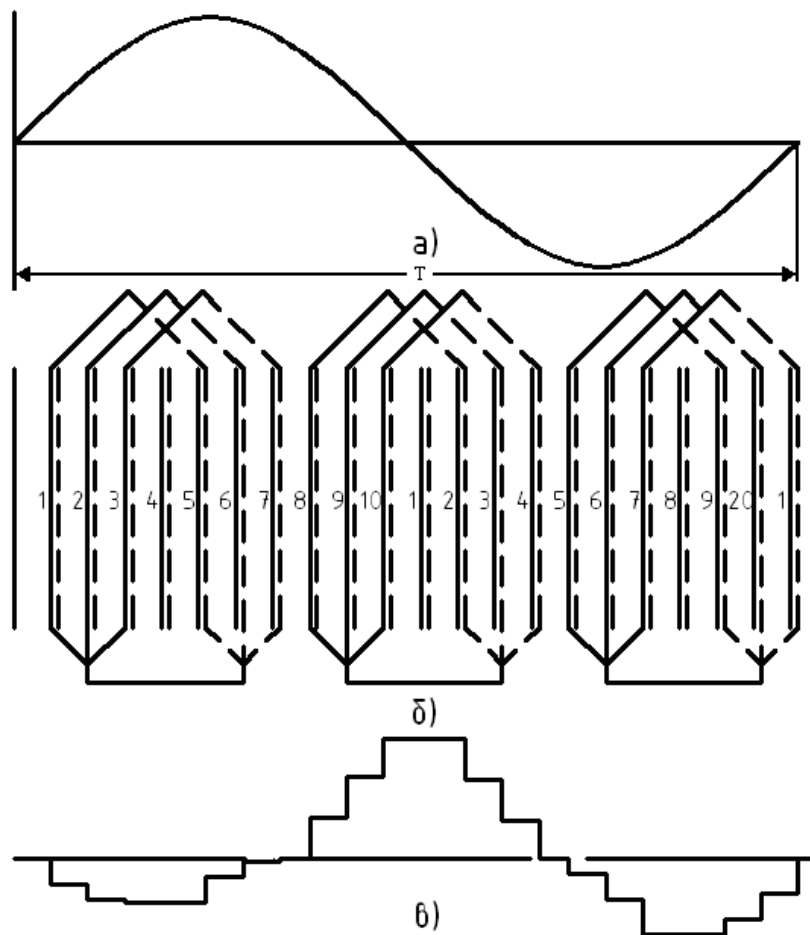


Рисунок 1 – Каскадна обмотка

На рисунку 1а показана синусоїдної форми індукція магнітного $2p_1$ -полюсного поля, на рисунку 1б – три каскадні короткозамкнені котушки, в яких наводиться ЕРС $2p_1$ -полюсним полем. ЕРС кожної

секції визначаємо як різницю ЕРС стержнів, що створюють дану секцію. ЕРС кожного стержня вираховуємо по формулі:

$$e_{ct} = B_m \cdot \sin \omega t = B_m \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{1}{T} \cdot t \right),$$

де T – просторова координата, що визначається величиною подвійного полюсного ділення, вираженого числом пазових поділок ротора, в нашому випадку:

$$T = \frac{Z_2}{p_1} = \frac{84}{4} = 21;$$

ЕРС кожної секції визначається, як різниця ЕРС стержнів, котрі створюють цю секцію:

$$E_{C_{t,t+y}} = e_{ct} - e_{c_{t+y}} = B_m \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{1}{T} \cdot t \right) - B_m \cdot \sin \left[2\pi \cdot \frac{1}{T} \cdot (t + y) \right], \quad (1)$$

де y – крок секції, для спроектованої обмотки $y=4$;

t – змінна величина, що означає номер паза, в якому лежить розглядуваний стержень; $t=1,2,3,8,9,10,15,16,17$.

B_m – амплітудне значення магнітної індукції, приймаємо $B_m=1$.

За допомогою (1) знаходимо відносні значення ЕРС секцій для даної схеми обмотки:

$$E_{C_{1,5}} = B_m \cdot \left[\sin \left(2\pi \cdot \frac{1}{21} \cdot 1 \right) - \sin \left(2\pi \cdot \frac{1}{21} \cdot 5 \right) \right] = -0.702$$

$$E_{C_{2,6}} = -0,412; \quad E_{C_{3,7}} = -0,084; \quad E_{C_{8,12}} = 1,114; \quad E_{C_{9,13}} = 1,114;$$

$$E_{C_{10,14}} = 1,015; \quad E_{C_{15,19}} = -0,412; \quad E_{C_{16,20}} = -0,702; \quad E_{C_{17,21}} = -0,931.$$

Струм секції визначається по формулі;

$$I_C = \frac{E_C}{Z_C},$$

де Z_C – повний опір секції.

Якщо прийняти повний опір всіх секції постійними $Z_C = \text{const}$, тоді струми в секціях будуть пропорційними ЕРС цих же секцій. Це дозволяє побудувати розподілення МРС перших трьох каскадних котушок (рисунок 1в).

Зважаючи, що трифазна система синусоїдних струмів, які протікають по секціям, симетрична, значення МРС секцій 1,2,3,8,9,10,15,16,17 для заданої миті часу t запишемо так:

$$F_{C_{t,t+y}} = \sqrt{2} \cdot I \cdot W \cdot \sin\left(\omega t - \frac{t \cdot \pi}{\tau_2}\right);$$

де I – діюче значення струму котушки;

W – число витків секції, $W = 1$;

ω – кутова швидкість, $\omega = 2\pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{T}$;

τ_2 – полюсне ділення ротора:

$$\tau_2 = \frac{Z_2}{2p_1} = \frac{84}{8} = 10,5.$$

Використовуючи розклад в ряд Фур'є для даної форми кривої МРС котушки:

$$F_{V_C} = \sum_{v=1}^{\infty} 2 \cdot F_C \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot v \cdot T_0}{T}\right)}{\pi \cdot v} \cdot \cos\left(\frac{v \cdot 2 \cdot \pi}{T} \cdot x\right)$$

і враховуючи просторовий зсув кожної секції в $2p_1$ -полюсному полі, одержимо вирази МРС кожної секції:

$$F_{V_{C_{t,t+y}}} = \sum_{v=1}^{\infty} 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot W \cdot \sin\left(\omega t - \frac{t \cdot \pi}{\tau_2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\pi \cdot v \cdot \frac{T_0}{T}\right)}{\pi \cdot v} \cdot \cos\left(v \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot x - \frac{t \cdot \pi}{\tau_2}\right)$$

де v – порядок гармоніки;

x – змінна просторова координата;

T_0 – крок котушок, $T_0 = 4$.

Для визначення результуючої МРС кожної гармоніки достатньо скласти відповідні гармоніки дев'яти перших секцій.

Перша гармоніка ($v=1$):

$$\frac{\sin\left(\pi \cdot v \cdot \frac{T_0}{T}\right)}{\pi \cdot v} = \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{4 \cdot \pi}{21}\right)}{1 \cdot \pi} = 0,179;$$

$$\begin{aligned} F_1 &= 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,179 \cdot I \cdot W \cdot \left[\sum_t \sin\left(\omega t - \frac{t \cdot \pi}{10,5}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{t \cdot \pi}{10,5}\right) \right] = \\ &= \sqrt{2} \cdot 0,179 \cdot I \cdot W \cdot \left[\sum_t \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{2t \cdot \pi}{10,5}\right) + \sum_t \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) \right]. \end{aligned}$$

Поле, що характеризується членом $\left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x\right)$, обертається в зворотньому напрямі вісі x і називається лівобігучим полем. Сума

лівобігучих полів з відставанням по фазі на кут $\frac{2t \cdot \pi}{10,5}$ дорівнює нулю.

$$F_1 = 9 \cdot 0,254 \cdot I \cdot W \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) = 2,285 \cdot I \cdot W \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right),$$

тобто перша гармонічна складова є правобігуче поле, що обертається в прямому напрямі вісі x .

Друга гармонічна складова МРС, враховуючи, що

$$\frac{\sin\left(v \cdot \pi \cdot \frac{T_0}{T}\right)}{v \cdot \pi} = \frac{\sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{4}{21}\right)}{2 \cdot \pi} = 0,148;$$

$$\begin{aligned} F_2 &= 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,148 \cdot I \cdot W \cdot \left[\sum_t \sin\left(\omega t - \frac{t \cdot \pi}{10,5}\right) \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{T} x - \frac{2t \cdot \pi}{10,5}\right) \right] = \\ &= \sqrt{2} \cdot 0,148 \cdot I \cdot W \cdot \left[\sum_t \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{T} x - \frac{3t \cdot \pi}{10,5}\right) + \sum_t \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{T} x + \frac{t \cdot \pi}{10,5}\right) \right] \end{aligned}$$

Тут сума правобігучих полів з відставанням по фазі на кут $\frac{t \cdot \pi}{10,5}$ дорівнює нулю. Зміщення на кут $\frac{3t \cdot \pi}{10,5}$ лівобігучих полів зменшує амплітуду другої гармоніки на 25%.

$$F_2 = 9 \cdot 0,75 \cdot 0,21 \cdot I \cdot W \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{T} x\right) = 1,417 \cdot I \cdot W \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{T} x\right)$$

Аналогічно визначаються всі послідовні гармонічні складові МРС.

Таким чином, розглядувана роторна обмотка створює два основні обертові в різні сторони магнітні поля числом полюсів $2p_1=8$ та $2p_2=16$. Відношення амплітуди МРС $2p_1$ -полюсного поля (перша гармонічна) до МРС $2p_2$ -полюсного поля (друга гармонічна) $\frac{F_1}{F_2} = 1,61$.

Статорну обмотку потрібно виконати із 2-х паралельних віток так, як показано на рисунку 2а. $2p_2$ -полюсне поле, створюване каскадною роторною обмоткою, наводить в статорній обмотці ЕРС, під дією якої протікає струм $I_{1,2}$ і створюється додатковий електромагнітний момент, який направлений узгоджено з електромагнітним моментом M_1 .

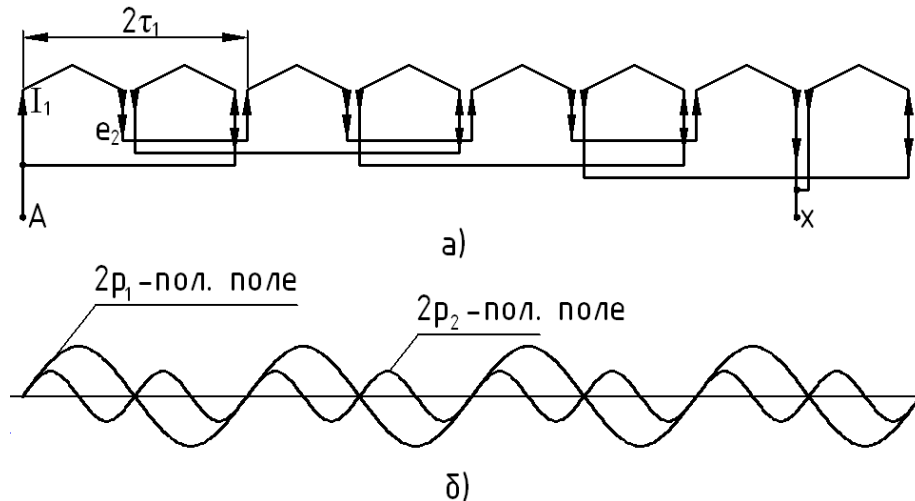


Рисунок 2 – Схема паралельних віток фази статорної обмотки

Для визначення обмоткового коефіцієнта статорної обмотки відносно $2p_2$ -полюсного поля скористаємось універсальною методикою розрахунку обмоткових коефіцієнтів [1], згідно з якою геометрична сума ЕРС всіх активних сторін обмотки визначається як:

$$E = \sqrt{A^2 + B^2},$$

де $A = \sum (\cos n\alpha - \cos k\alpha)$;

$B = \sum (\sin n\alpha - \sin k\alpha)$

тут n – номери всіх пазів контуру, в яких при обході напрям руху направлений знизу вгору;

k – номери пазів, в яких напрям руху направлений зверху вниз,

α – міжпазовий кут:

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot p_2}{Z_1} = \frac{360 \cdot 8}{84} = 34,3^\circ.$$

Для фази, показаній на рисунку 2а:

$n = 1, 2, 3, 19, 20, 21, 37, 38, 39, 55, 56, 57, 64, 65, 66, 46, 47, 48, 28, 29, 30, 10, 11, 12.$

$k = 8, 9, 10, 26, 27, 28, 44, 45, 46, 62, 63, 64, 71, 72, 1, 53, 54, 55, 35, 36, 37, 17, 18, 19.$

Обмотковий коефіцієнт:

$$K_{об1(2)} = \frac{E}{N} = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{n + k} = \frac{\sqrt{16,64^2 + 19,95^2}}{48} = 0,723,$$

де N – число всіх активних сторін.

Висновки. В розглянутому восьмиполюсному каскадному двигуні завдяки більшому на 73% обмотковому коефіцієнту статорної обмотки відносно $2p_2$ – полюсного поля в порівнянні з шестиполюсним дослідженим двигуном пусковий момент буде дорівнювати

максимальному.

Бібліографічний список

1. Луцик В.Д. *Суміщені електричні машини та апарати.* – К.: Техніка, 1993. – 203 с. Мова рос.

2. Луцик В.Д. *Асинхронні двигуни з фазними роторами з каскадними властивостями при пуску.*//Електротехніка і електромеханіка, 2005, №2. – с. 39-41.

3. Луцик В.Д., Кирьянов В.В. *Асинхронні двигуни для шахтних конвеєрів з покращеними пусковими властивостями.* // Електротехніка і електромеханіка. - 2009. - №1.