

## АСИНХРОННІ ДВИГУНИ З ФАЗНИМИ РОТОРАМИ З КАСКАДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПРИ ПУСКУ

Лущик В.Д., д.т.н., проф.

Українська інженерно-педагогічна академія

Україна, 94000, Стаханов, ул. Тельмана, 53, Гірничий факультет УПА, кафедра "Гірнична електромеханіка"  
тел. (06444) 4-29-62, факс (06444) 4-10-49

*Описані схеми суміщених обмоток та принцип дії асинхронного двигуна з фазним ротором в каскадному режимі роботи при пуску. Застосування суміщених обмоток дозволяє покращити пускові властивості.*

*Описаны схемы совмещенных обмоток и принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором в каскадном режиме работы при пуске. Применение совмещенных обмоток позволяет улучшить пусковые свойства.*

Численні дослідження асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором з каскадними властивостями при пуску, що досягаються застосуванням суміщених обмоток, показують їх високу ефективність в пускових режимах [1].

Доцільно використання суміщених обмоток і в асинхронних двигунах з фазними роторами з метою покращення їх пускових властивостей. Статорну обмотку виконують суміщеною  $2p_1/2p_2$ -полюсною нерегульованою, а роторну обмотку з двох частин: одна частина, на яку витрачається від 25% до 50% загальної витрати мідного проводу в роторі, у вигляді  $p_1+p_2$  накоротко замкнених котушкових груп, або із такого ж числа стержнів, замкнених на кінцях короткозамкненими кільцями; другу частину виконують як трифазну  $2p_1$ -полюсну обмотку, яку укладають у вільні від короткозамкнених котушок або короткозамкнених стержнів пази і підключають до контактних кілець.

При включенні статорної обмотки в мережу та при розімкненій роторній фазній обмотці в короткозамкнених котушкових групах (або короткозамкнених стержнях) протікають струми, які створюють два магнітні поля, що обертаються в різні сторони:  $2p_1$ -полюсне поле, яке створює обертальний момент  $M_1$ , а зворотно обертове  $2p_2$ -полюсне поле, яке, взаємодіючи з короткозамкненими контурами паралельних виток статорної обмотки, створює обертальний момент  $M_2$ , спрямований в тому ж напрямі, що і момент  $M_1$ . Механічна потужність каскадного двигуна при низьких частотах обертання є сума потужностей  $P_{2p_1}$  та  $P_{2p_2}$ , які утворюються в результаті взаємодії  $2p_1$ -полюсного поля із струмом в роторі  $I_2$  та  $2p_2$ -полюсного поля із струмом в статорі  $I_{1(2)}$ :

$$P_{2p_1} = M_1 \cdot \omega = \frac{2\pi}{\sqrt{2} \cdot p_1} \cdot f_1 \cdot m_2 \cdot w_{2(1)} \cdot k_{об.2(1)} \times \\ \times D \cdot l_\delta \cdot B_{\delta 1} \cdot I_2 \cdot \cos \psi_{2(1)} (1-s) \quad (1)$$

де  $w_{2(1)}$  – число витків фази суміщеної роторної обмотки;  $k_{об.2(1)}$  – обмотковий коефіцієнт суміщеної роторної обмотки відносно  $2p_1$ -полюсного поля;  $B_{\delta 1}$  – амплітудне значення індукції  $2p_1$ -полюсного поля.

Тут  $\cos \psi_{2(1)}$  має на 30-40% менше значення порівняно з  $\cos \psi_2$   $2p$ -полюсного асинхронного двигуна в номінальному режимі роботи із-за великої частоти струму в роторі  $I_2$  та великого диференційного опору суміщеної роторної обмотки, викликаного, головним

чином, тією складовою диференційного розсіювання  $x_{д(2)}$ , яка обумовлена наявністю  $2p_2$ -полюсного поля:

$$x_{д(2)} = 2m_2 \cdot f_2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot D \cdot l_\delta}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} \cdot \frac{w_2^2}{p_1^2} \cdot \frac{k_{об.2(2)}^2}{p_2^2}, \quad (2)$$

де  $k_{об.2(2)}$  – обмотковий коефіцієнт суміщеної роторної обмотки відносно  $2p_2$ -полюсного поля.

$$P_{2p_2} = M_2 \cdot \omega = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2} \cdot p_1} \cdot f_1 \cdot m_1 \cdot w_{1(2)} \cdot k_{об.1(2)} \times \\ \times D \cdot l_\delta \cdot B_{\delta 2} \cdot I_{1(2)} \cdot \cos \psi_{1(2)} (1-s) \quad (3)$$

де  $w_{1(2)}$  – число витків фази статорної обмотки відносно  $2p_2$ -полюсного поля;  $k_{об.1(2)}$  – обмотковий коефіцієнт статорної обмотки відносно  $2p_2$ -полюсного поля;  $B_{\delta 2}$  – амплітудне значення індукції  $2p_2$ -полюсного поля;  $\cos \psi_{1(2)}$  – косинус кута між ЕРС  $E_{1(2)}$ , наведеної в статорній обмотці  $2p_2$ -полюсним полем, і струмом  $I_{1(2)}$ .

Параметри статорної обмотки відносно  $2p_2$ -полюсного поля визначаються звичайним способом, як і диференційне розсіювання. Складова диференційного розсіювання  $x_{д(1)}$ , яка обумовлена наявністю  $2p_1$ -полюсного поля, тут дорівнює нулю на відміну від  $x_{д(2)}$  роторної обмотки, тому що при протіканні струму  $I_{1(2)}$   $2p_1$ -полюсне поле, викликане цим струмом, не виникає.

Підставивши значення струму  $I_{1(2)}$  в формулу (3), виявимо, що механічна потужність  $P_{2p_2}$  пропорційна квадрату обмоткового коефіцієнта статорної обмотки відносно  $2p_2$ -полюсного поля  $k_{об.1(2)}^2$ , а також квадрату амплітудного значення індукції  $2p_2$ -полюсного поля  $B_{\delta 2}^2$ .

Пускові струми при цьому незначні, не перевищують чотирикратного значення номінального струму асинхронного двигуна, пусковий момент в 1,8-2,5 рази більший номінального моменту асинхронного двигуна серійної конструкції таких же габаритів. Якщо пусковий момент перевищує статичний момент навантаження, двигун розгоняється до частоти обертання  $n_{кл} = f_1 / p_1 + p_2$ . Для подальшого розгону необхідно включити фазну обмотку ротора, при цьому каскадні властивості втрачаються, двигун продовжує розганятися ступінчато, в залежності від величини опору ввічкнених до контактних кілець резисторів.

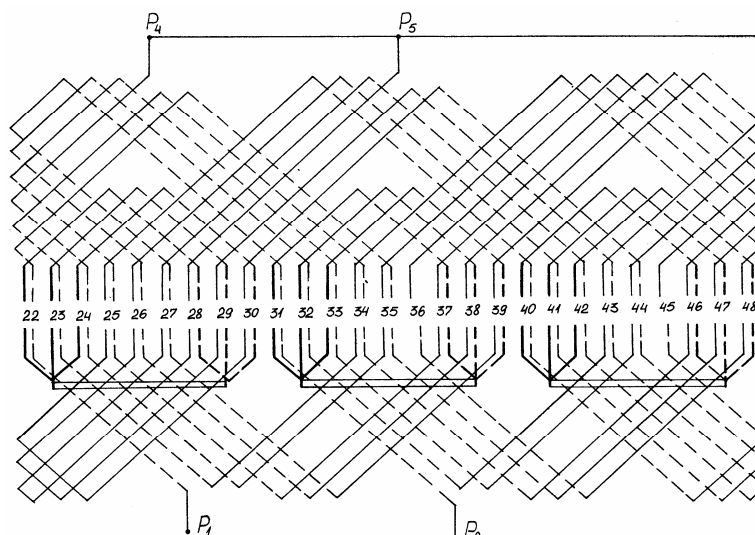
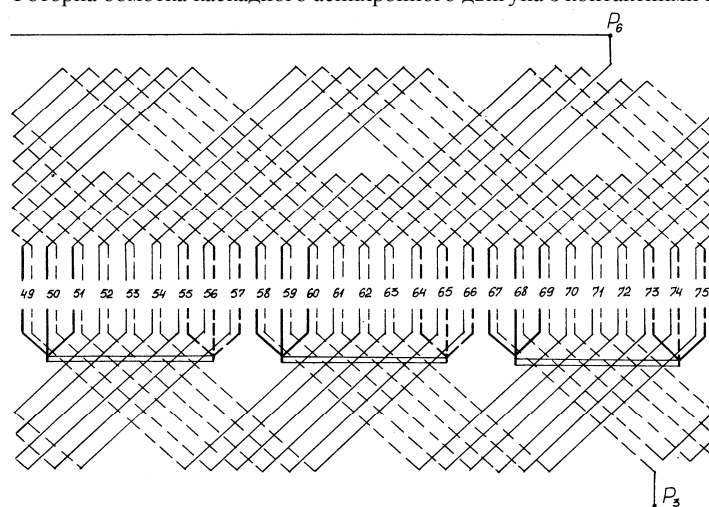


Рис. 1 – Роторна обмотка каскадного асинхронного двигуна з контактними кільцями



Продовження рис. 1

Якщо пусковий момент менший статичного моменту навантаження, то необхідно вмикати фазну обмотку ротора і розганяти як асинхронний двигун серійної конструкції.

При виконанні фазної обмотки з таким же числом витків, як і в двигуні, в якому всі пази ротора заповнені тільки фазною обмоткою, величина напруги на кільцях залишається незмінною, але струм фазної обмотки зменшується пропорційно кількості міді, що витрачається на фазну обмотку, зменшується нагрівання контактно-щіткового вузла і збільшується його надійність, при цьому потрібна менша величина регулювального опору.

Енергетичні показники в пусковому режимі при низьких частотах обертання покращуються, так як частина потужності не втрачається безповоротно в регульовальних резисторах, а повертається назад в статор для створення додаткового обертового моменту.

Так як при накоротко замкненій  $2p_1$ -полісній роторній обмотці зворотньо обертове  $2p_2$ -полісне поле повністю зникає, каскадні властивості двигуна втрачаються, і при високій частоті обертання енергетичні показники двигуна мають такі ж значення, як і в серійному двигуні.

При виконанні короткозамкнених котушок у вигляді білячої клітки зменшується витрата мідного проводу.

Був виготовлений експериментальний зразок асинхронного двигуна МА36-52/6Ф,  $2p_1$ -полісна ( $2p_1=6$ ) трифазна хвильова обмотка ротора має число пазів  $z_2=81$  і складається з 54-х стержневих котушок, решта котушок створюють 9 короткозамкнених котушкових груп, по 3 котушки в групі (рис.1: число пазів  $z_2=81$ , обмотка показана частково). Статорна обмотка – суміщена  $2p_1/2p_2$ -полісна ( $2p_2=12$ ) нерегульована, виконана в кожній фазі із двох паралельних віток. Кожна паралельна вітка складається із віддалених одна від одної на подвійне полюсне ділення котушкових груп.

На рис. 2а показана схема паралельних віток одної фази статорної обмотки. Число пазів  $z_1=72$ ,  $\tau_1=12$ ,  $y=10$ . Число котушок в кожній котушковій групі  $q=4$ . Починаються котушкові групи з таких пазів: 1, 13, 25, 37, 49, 61.

На рис. 2б показані  $2p_1$ -полісне поле та  $2p_2$ -полісне поле, що утворюється завдяки роторній обмотці. Паралельні вітки кожної фази статорної обмотки утворюють короткозамкнені контури відносно  $2p_2$ -полісного поля.

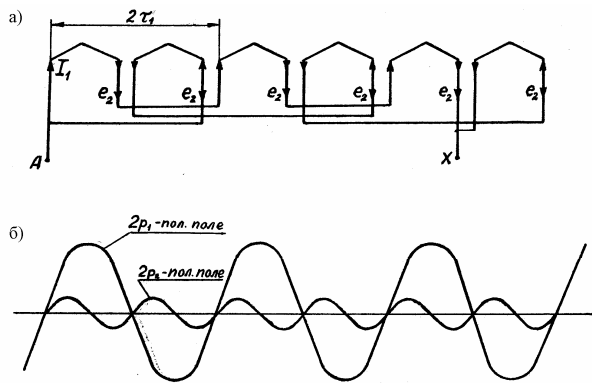


Рис. 2 – Схема паралельних віток фази статорної обмотки

Для визначення обмоткового коефіцієнта розглядуваної обмотки відносно  $2p_2$ -полюсного поля скористаємось універсальною методикою розрахунку обмоткових коефіцієнтів [2,3], 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,  $\alpha$  – міжпазовий кут,

$$\alpha = \frac{360^\circ \times p_2}{z_1} = \frac{360^\circ \times 6}{72} = 30^\circ$$

Для фази, показаній на рис. 2а,  $n = 1, 2, 3, 4, 13, 14, 15, 16, 25, 26, 27, 28, 37, 38, 39, 40, 49, 50, 51, 52, 61, 62, 63, 64$ ;  $k = 11, 12, 13, 14, 23, 24, 25, 26, 35, 36, 37, 38, 47, 48, 49, 50, 59, 60, 61, 62, 71, 72, 1, 2$ .

Обмотковий коефіцієнт

$$K_{обл(2)} = \frac{E}{N} = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{n+k} = \frac{\sqrt{14,20^2 + 14,20^2}}{48} = 0,418,$$

де  $N$  – число всіх активних сторін (арифметична сума ЕРС).

Були проведені випробування: дослід холостого ходу, дослід короткого замикання (в експериментальному двигуні окремо з розімкненою обмоткою ротора та з замкненою обмоткою ротора), а також зняті робочі характеристики.

Дані випробувань приводяться в таблиці в порівнянні з результатами випробувань серійного двигуна МА36-52/6Ф. Дані робочих характеристик в номінальному режимі не приведені, тому що нічим не відрізняються від показників серійного двигуна.

Як видно із експериментальних досліджень, пусковий струм досліджуваного двигуна при розімкненій роторній фазній обмотці зменшується при номінальній напрузі в 1,66 рази, пусковий момент збільшується в 1,82 рази порівняно з двигуном серійної конструкції з замкненими накоротко контактними кільцями. Пусковий момент досліджуваного двигуна при розімкненій роторній фазній обмотці складає 0,52 від максимального моменту асинхронного двигуна серійної конструкції. Слід відмітити, що якщо статорну обмотку виконати з кроком не  $y = 10$ , а  $y = 9$ , обмотковий коефіцієнт статорної обмотки відносно  $2p_1$ -полюсного поля зменшується при цьому всього на 4,3 %, зате обмотковий коефіцієнт статорної обмотки відносно

$2p_2$ -полюсного поля збільшується на 42 % і складає  $K_{обл(2)} = 0,592$ . Пусковий момент при цьому повинен досягнути значення максимального моменту.

Таблиця 1  
Дані випробувань двигуна МА36-52/6Ф

		Дослід ХХ			
		$P_0$	$P_{ст}$	$P_{мех}$	$I_0$
		Вт	Вт	Вт	А
серійний МА36-52/6Ф		4100	2490	1250	98,8
експериментальний	з розімкненою обмоткою ротора	4572	2900	1450	73
	з замкненою обмоткою ротора	4270	2600	1450	72,6

Продовження таблиці 1

		Дослід КЗ			
		$U_{1к}$	$P_k$	$I_k$	$\cos \phi_k$
		В	кВт	А	
серійний МА36-52/6Ф		380	288,7	1820	0,24
експериментальний	з розімкненою обмоткою ротора	380	288,3	1096,4	0,4
	з замкненою обмоткою ротора	380	272,4	1470	0,282

Продовження таблиці 1

		Механічні характеристики		
		$M_n$	$M_n$	$M_{max}$
		Нм	Нм	Нм
серійний МА36-52/6Ф		1230	1230	4290
експериментальний	з розімкненою обмоткою ротора		2235	
	з замкненою обмоткою ротора	1230	1646	4290

В пускових режимах нагрівання контактно-щіткового вузла досліджуваного двигуна відсутнє, в номінальному режимі роботи на 40% менше порівняно з серійним двигуном.

Розглянутий асинхронний двигун можливо виготовити безконтактним за рахунок виконання напівпровідникових елементів (тиристорів, транзисторів), що обертаються, для комутування фазних обмоток.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Використання каскадних властивостей асинхронних двигунів для покращення пускових характеристик. // Збірник наукових праць. – Миколаїв: НУК, 2004 - №4.
- [2] Луцик В.Д. Расчет обмоточных коэффициентов m-фазных обмоток, „Электромеханика”, // Изв.вузов. Электромеханика. – 1981. - №3.-С.267-275.
- [3] Луцик В.Д. Суміщені електричні машини та апарати. – К.: Техніка, 1933.-203 с. Мова рос.

Надійшла 14.10.2004