

УДК 62-83:621.313.333

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Р.М. Чуєнко, канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування  
України

*Проведено порівняння пускових характеристик серійного та компенсованого асинхронних двигунів.*

**Ключові слова:** *компенсований асинхронний двигун, пусковий момент, пусковий струм, час пуску, осцилограма*

**Проблема.** Застосування внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності (ВЄКРП) асинхронного двигуна (АД) призводить до зміни його параметрів, що, в свою чергу, впливає на пускові характеристики компенсованого асинхронного двигуна (КАД) [2]. Зокрема у КАД можуть змінюватися величини пускових струмів та електромагнітного моменту, що впливає на експлуатаційні характеристики двигуна. Тому дослідження пускових режимів КАД є актуальною задачею, пов'язаною із загальною науково-технічною проблемою створення енергоефективних електротехнічних комплексів на базі КАД.

**Метою роботи** є дослідження та порівняльний аналіз пускових характеристик серійного АД та створеного на його основі КАД.

**Вихідні дані та методика досліджень.** У якості об'єкта досліджень обрано серійний АД типу 4А71В2 із власними параметрами [1] та створений на його основі КАД.

Для моделювання процесу пуску необхідно знати величину механічного моменту інерції двигуна. Момент інерції розраховується за формулою:

$$J = mR^2 / 2 = \rho\pi R^2LR^2 / 2 = \rho\pi R^4L / 2, \quad (1)$$

де  $R = 0,0322$  м – радіус ротора,  $L$  – еквівалентна довжина ротора,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup> еквівалентна густина матеріалу ротора. Відстань між підшипниками складає 0,157 м, з урахуванням довжини вихідних кінців вала приймаємо  $L = 0,19$  м. Тоді маємо:  $J = \rho\pi R^4L / 2 = 7800 \cdot \pi \cdot 0,0322^4 \cdot 0,19 / 2 = 0,0025$  кг·м<sup>2</sup>.

© Р.М. Чуєнко.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 97. 2013.

Модернізація АД із використанням ВСКРП передбачає наявність у кожній фазі статора двох симетричних паралельних гілок, в одну з яких включається компенсувальна ємність  $C$  [2]. При цьому ЕРС та МРС фази обмотки статора КАД порівняно із АД, а також основний магнітний потік (потік взаємоіндукції) залишаються без змін. Тому і індуктивний опір взаємоіндукції  $x_m$  між обмотками статора і ротора не змінюється. Не змінюються також параметри роторної обмотки. Подальший чисельний аналіз процесу пуску серійного АД та КАД проводився із використанням схем заміщення, зображених на рис. 1.

Дві паралельні гілки обмотки статора (рис. 1, б) можна представити у вигляді еквівалентного опору обмотки статора КАД:

$$z_{1\sigma\text{КАД}} = r_{1\text{КАД}} + jX_{1\sigma\text{КАД}} \quad (2)$$

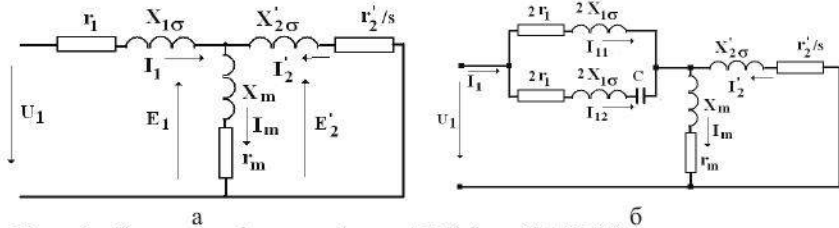


Рис. 1. Схеми заміщення фази АД (а) та КАД (б)

Після перетворень отримаємо наступні вирази для активної і реактивної складової еквівалентного опору:

$$r_{1\text{КАД}} = \frac{r_1 [r_1^2 - x_{1\sigma} (x_{1\sigma} - x_c / 2)] + r_1 [x_{1\sigma} + (x_{1\sigma} - x_c / 2)] \cdot [(x_{1\sigma} - x_c / 4)]}{r_1^2 + (x_{1\sigma} - x_c / 4)^2},$$

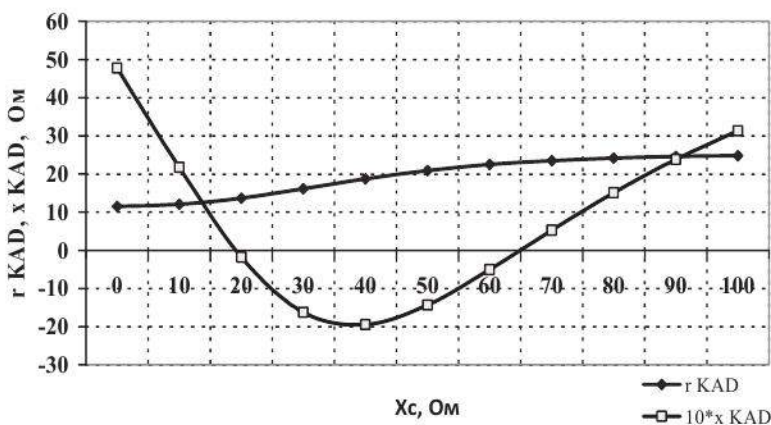
$$x_{1\sigma\text{КАД}} = \frac{-[r_1^2 - x_{1\sigma} (x_{1\sigma} - x_c / 2)] \cdot [(x_{1\sigma} - x_c / 4)] + r_1^2 [x_{1\sigma} + (x_{1\sigma} - x_c / 2)]}{r_1^2 + (x_{1\sigma} - x_c / 4)^2}, \quad (3)$$

де  $x_c = 1 / \omega C$  - реактивний опір ємності.

Якщо підставити в отримані вирази (1) чисельні значення параметрів серійного АД  $r_1 = 11,5$  Ом і  $x_{1\sigma} = 4,78$  Ом, то отримаємо наступні чисельні значення для КАД (в Ом) :

$$r_{1\text{КАД}} = \frac{23x_c^2 - 436,7x_c + 28537,6}{x_c^2 - 38,24x_c + 2481,6}, x_{1\sigma\text{КАД}} = \frac{9,56x_c^2 - 803,1x_c + 11862,05}{x_c^2 - 38,24x_c + 2481,6}. \quad (4)$$

Як видно з виразів (2), опір ємності впливає не тільки на реактивний опір обмотки статора КАД, але й на її активний опір (рис. 2).



**Рис. 2.** Функції параметрів  $r_{1KAD}$  і  $x_{1\sigma KAD}$  в залежності від опору ємності  $X_C$

З рис. 2 видно, що з ростом реактивного опору ємності в діапазоні значень  $X_C = (0 \dots 20)$  Ом активний опір КАД збільшується в 1,19 раза, а реактивний зменшується, переходячи при  $X_C = 20$  Ом в зону від'ємних значень, що можна трактувати, як набуття еквівалентним опором обмотки статора КАД ємнісного характеру.

При подальшому збільшенні  $X_C$  еквівалентний активний опір  $r_{1KAD}$  монотонно збільшується до величини  $r_{1KAD} = 2r_1 = 23$  Ом, а еквівалентний індуктивний опір  $x_{1\sigma KAD}$  при  $X_C = 65$  Ом знову стає позитивним і прямує до величини  $x_{1\sigma KAD} = 2x_{1\sigma} = 9,56$  Ом.

Збільшення еквівалентного реактивного опору обмотки статора КАД при зростанні  $X_C$  можна пояснити впливом коливальних процесів обміну енергією між власною індуктивністю основної обмотки та компенсуючою ємністю додаткової обмотки без транзитної передачі енергії в ротор, тобто без електромеханічного перетворення енергії. Наприклад, при виникненні ідеального резонансу струмів у паралельно з'єднаних ємності і індуктивності (при відсутності власних активних опорів паралельних гілок) вхідний активний опір такої схеми є нескінченно великим.

Порівняльний аналіз пускових характеристик серійного АД і КАД виконаємо в рамках обчислювального комплексу MATLAB – SIMULINK. В основі математичної моделі короткозамкненого асинхронного двигуна, що використовується в пакеті MATLAB – SIMULINK для аналізу динамічних режимів, лежить наступна система диферен-

ційних рівнянь, яка записана в еквівалентній двофазній  $d - q$  системі координат:

$$V_{1d} = i_{1d}r_1 + \frac{d\psi_{1d}}{dt} - \omega\psi_{1q}, \quad V_{1q} = i_{1q}r_1 + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + \omega\psi_{1d};$$

$$0 = i'_{2d}r_2 + \frac{d\psi'_{2d}}{dt} - (\omega - p\omega_R)\psi'_{2q}, \quad 0 = i'_{2q}r_2 + \frac{d\psi'_{2q}}{dt} + (\omega - p\omega_R)\psi'_{2d}; \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_R}{dt} = \frac{1}{2J}(T_e - T_c), \quad \frac{d\theta_R}{dt} = \omega_R;$$

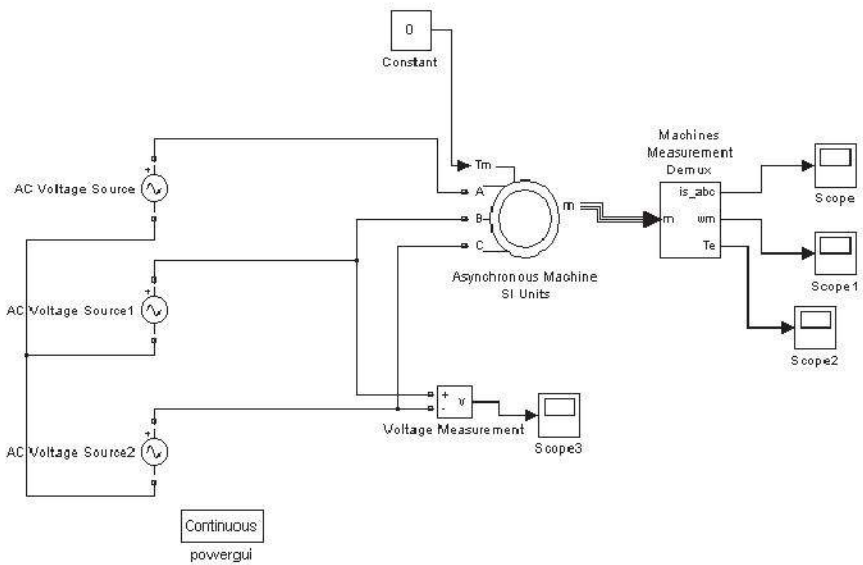
$$T_e = 1,5p (i_{1q}\psi_{1d} + i_{1d}\psi_{1q}) \quad (6)$$

де  $\psi_{1q} = L_1 i_{1d} + L_m i'_{2d}$ ,  $\psi_{1d} = L_1 i_{1q} + L_m i'_{2q}$ ,  $\psi'_{2d} = L_2 i'_{2d} + L_m i_{1d}$ ,  $\psi'_{2q} = L_2 i'_{2q} + L_m i_{1q}$  – магнітні потокозчеплення фаз статора і ротора;  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ ,  $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$  – власні індуктивності статора і ротора (приведена);  $L_{1\sigma}$ ,  $L_{2\sigma}$ ,  $L_m$  – індуктивності розсіювання статора, ротора (приведена), та взаємна індуктивність між статором і ротором;  $\omega_R$  – кутова швидкість обертання ротора;  $\omega$  – кутова частота напруги живлення;  $p$  – кількість пар полюсів;  $J$  – механічний момент інерції ротора АД;  $T_e$  – зовнішній момент опору на валу АД;  $\theta_R$  – кут повороту ротора. В моделі використовуються перетворення, які дають можливість у разі необхідності перейти від двофазної системи обмоток до трифазної.

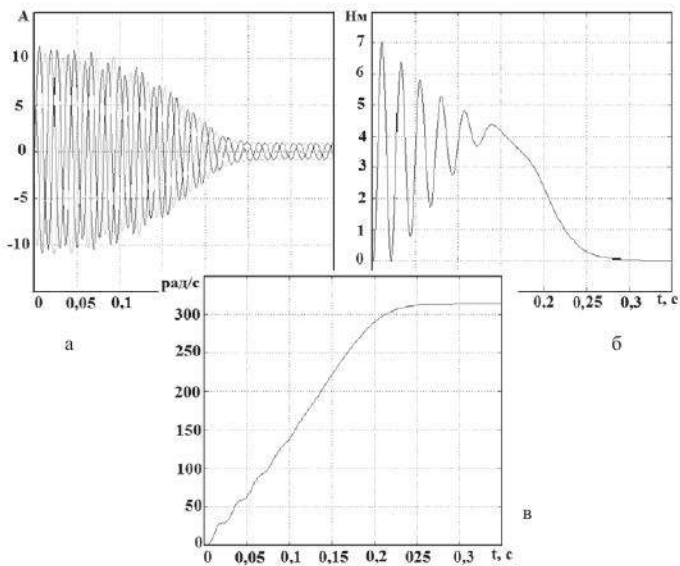
Вихідні дані двигуна відповідають схемі заміщення (рис. 1, а). При моделюванні КАД використовуються еквівалентні параметри обмотки статора, які визначаються за допомогою виразів (3), (4).

У рамках підсистеми SIMULINK формується стандартна електрична схема для дослідження пуску асинхронного двигуна при його прямому включенні в мережу (рис. 3). Джерела живлення відповідають номінальним фазним напругам обмотки статора. Система віртуальних осцилографів дає можливість отримувати та візуалізувати розрахункові осцилограми струмів статора, електромагнітного моменту і швидкості обертання ротора.

Початковими умовами є: ковзання ротора  $s = 1$ , струми у всіх контурах двигуна дорівнюють нулю, до обмотки статора прикладена незмінна за амплітудою трифазна система напруг, зовнішній момент опору дорівнює нулю.



**Рис. 3.** Схема для дослідження асинхронного двигуна у середовищі SIMULINK



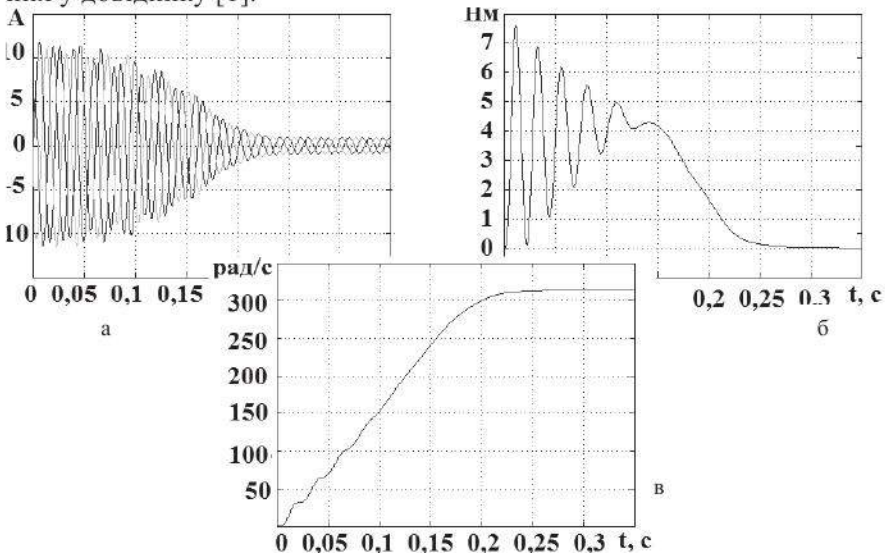
**Рис. 4.** Результати моделювання процесу пуску серійного АД



**Результати досліджень.** Характер розрахункових осцилограм пуску серійного АД типу 4A71B2 (рис. 4) відповідає фізичним уявленням щодо динаміки пуску двигуна. Зокрема спостерігаються коливання струму статора, які після завершення розгону ротора закінчуються протіканням струму холостого ходу. Спостерігаються також коливання електромагнітного моменту. Оскільки розглядається пуск при умові, що зовнішній момент опору на валу дорівнює нулю ( $T_m = 0$ ), то після завершення розгону електромагнітний момент також зменшується до нуля.

Амплітуда пускового (ударного) струму АД (рис. 4, а) складає 12,2 А, а пускового (ударного) моменту (рис. 4, б) – 7 Нм. Час розгону до номінальної швидкості при заданому моменті інерції ротора (рис. 4, в) дорівнює 0,23 с.

Відношення амплітуди пускового струму до номінального складає  $12,2 / 2,47 = 4,94$ , а відповідно пускового моменту  $7 / 3,75 = 1,87$ . Дані величини на 6-11% відрізняються в меншу сторону від даних, наведених у довіднику [1].



**Рис. 5.** Результати моделювання процесу пуску КАД

**Пуск КАД.** Характер зміни у часі осцилограм пускового струму, моменту та обертів КАД (рис. 5) залишається подібним до осцилограм серійного АД. Але у порівнянні з серійним АД амплітуда ударного

струму обмотки статора складає 12,98 А, а електромагнітного моменту 7,53 Нм.

Розрахункові залежності амплітуд ударного струму, електромагнітного моменту і часу пуску КАД в залежності від величини ємнісного опору компенсувальної ємності в діапазоні значень  $X_C = (0...20)$  Ом (рис. 6) свідчать, що на початковій стадії зміни  $X_C$  в діапазоні значень  $0 < X_C < 8$  Ом спостерігається невелике покращення пускових характеристик КАД: амплітуда пускового струму збільшується з 12,2 А до 12,98 А, (на 6,4%), амплітуда електромагнітного моменту збільшується з 7 Нм до 7,53 Нм (на 7,6%), а час пуску зменшується з 2,3 с до 2,1 с (на 9,5%). Це пояснюється зменшенням еквівалентного реактивного опору розсіювання обмотки статора  $x_{\sigma\text{КАД}}$ , не зважаючи на збільшення активної складової опору  $r_{\text{КАД}}$  (рис. 2).

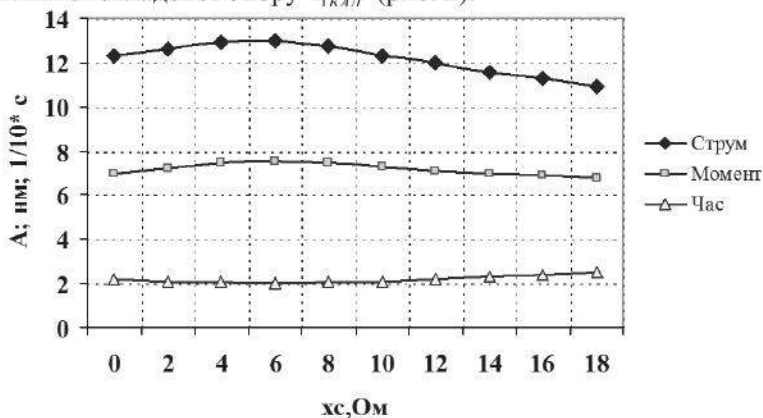


Рис. 6. Залежності амплітуд ударного струму, електромагнітного моменту і часу пуску КАД від  $X_C$

При подальшому збільшенні опору ємності  $X_C > 8$  Ом збільшення величини  $r_{\text{КАД}}$  призводить до зменшення ударного струму і моменту, що, в свою чергу, збільшує час пуску двигуна. Зокрема, при  $x_c = 18$  Ом час пуску КАД у порівнянні з серійним АД збільшується на 13,6%. Оптимальний вибір величини  $X_C$  виконується, виходячи з оптимальних характеристик КАД в номінальному сталому режимі роботи. Але отримані результати дають можливість оцінити можливі зміни пускових характеристик КАД у широкому діапазоні зміни зазначеного опору ємності.

**Висновки.** 1. Виконання КАД з двома симетричними паралель-

ними гілками, в одну з яких включено компенсувальну ємність, не призводить до недопустимого збільшення пускового струму і електромагнітного моменту, величини яких призводили б до зменшення експлуатаційного ресурсу КАД у порівнянні з аналогічним серійним АД.

2. Пускові характеристик КАД суттєво залежать від величини опору компенсувальної ємності. Максимальне збільшення пускового струму при широкій варіації величини  $X_C$  спостерігається на рівні (5...7)%, електромагнітного моменту (6...8)%, а відповідне зменшення часу пуску КАД складає (8...10)%.

3. При значному збільшенні опору  $X_C$  (малій величині компенсувальної ємності) спостерігається погіршення пускових характеристик КАД: у порівнянні з серійним АД час пуску КАД зростає на (14 ... 20)% і більше.

#### БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Асинхронные двигатели серии 4А* / [Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соколенская Е.А.]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. *Мишин В.И.* Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях / В.И. Мишин, Р.Н. Чуенко, В.В. Гаврилюк // *Электротехника*. – 2009. – №8. – С. 30-36.
3. *Мишин В.И., Чуенко Р.М., Кулинич А.Н.* Особенности физических процессов в компенсированном асинхронном двигателе. Научно-практический журнал национального технического университета „ХПИ”// *Электротехника і електромеханіка*. Харків. – 2005. – №2. – С. 48-53.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЕНСИРОВАННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Проведено сравнение пусковых характеристик серийного и компенсированного асинхронных двигателей.

**Ключевые слова:** *компенсированный асинхронный двигатель, пусковой момент, пусковой ток, время пуска, осциллограмма.*

#### STARTING CHARACTERISTICS OF THE COMPESATED INDUCTION MOTOR RESEARCH

*Comparison of the starting characteristics of the serial and compensated induction motors is carried out.*

**Key words:** *compensated induction motor, starting current, starting torque, start-up time, oscillogram.*