

УДК 62 - 83 : 621. 313. 333

Чуєнко Р.М.,

кандидат технічних наук,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПРЯМОГО ПУСКУ  
КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

*Досліджено перехідні процеси під час прямого пуску компенсованого асинхронного двигуна*

**Компенсований асинхронний двигун, прямий пуск, електромагнітний момент, частота обертання**

Трифазний асинхронний двигун (АД), який складає основу електроприводу робочих машин, характеризується високими номінальними енергетичними показниками. Проте внаслідок технологічних похибок при виготовленні АД, недовантаження та важких умов експлуатації його реальні енергетичні показники погіршуються, що призводить до підвищених витрат електроенергії та зниження енергоефективності споживачів. Для покращання енергетичних характеристик АД пропонується застосувати внутрішню ємнісну компенсацію реактивної потужності (ВСКРП) [2].

**Метою досліджень** є визначення впливу ВСКРП на величину струмів обмотки статора та електромагнітний момент компенсованого асинхронного двигуна (КАД) під час його пуску.

**Матеріали та методика досліджень.** Реалізація внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності в АД може бути здійснена різними способами у залежності від прийнятої схеми та кількості паралельних віток обмотки статора базової машини [2]. Перший спосіб ВСКРП в АД полягає у тому, що за послідовного з'єднання напівобмоток фаз статора одна з них шунтується конденсатором електричної ємності (рис. 1, а).

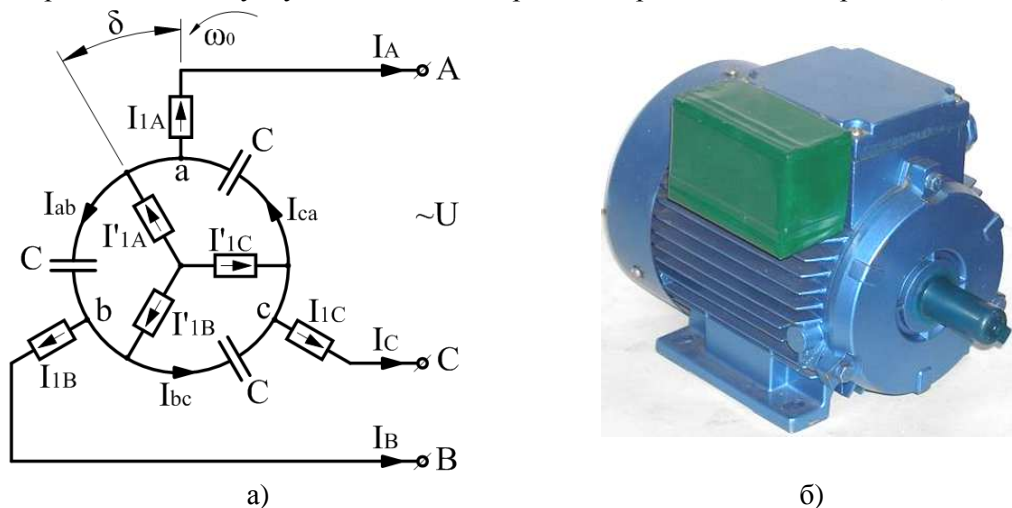


Рис. 1. Схема обмоток статора (а) та зовнішній вигляд (б) компенсованого асинхронного двигуна

**ЧУЄНКО Р.М.**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПРЯМОГО ПУСКУ**  
**КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

Для математичного моделювання КАД із послідовним з'єднанням напівобмоток фаз статора обрано систему реальних фазових координат [96], яка дозволяє оперувати реальними струмами фаз статора, як і в неперетворених звичайних координатах, а також дає можливість звільнитися від періодичних коефіцієнтів у виразах для індуктивностей та взаємніндуктивностей в потокозчепленнях [1].

Система рівнянь електричної рівноваги обмотки ротора складена для загальмованого електродвигуна, інваріантного за магніторушійними силами реальному двигуну, який обертається. Правомірність такої заміни підтверджується дотриманням однієї з найважливіших умов електромеханічного перетворення енергії – взаємної нерухомості магніторушійних сил нерухомої частини машини, та тієї яка обертається, в силу рівності швидкостей їх переміщення у просторі [1, 3].

За основний розрахунковий елемент схеми приймаємо котушкову групу напівфази статора та відповідної їй фази ротора, вважаючи однаковими числа пазів, числа котушок і котушкових груп обмоток статора і ротора. Фаза обмотки статора складається з двох послідовно з'єднаних напівфаз, одна з яких шунтується ємністю. Ротор представлений шестифазним, що складається з двох короткозамкнених трифазних кіл, просторово зміщених одне відносно одного на кут  $\delta$  (рис. 2).

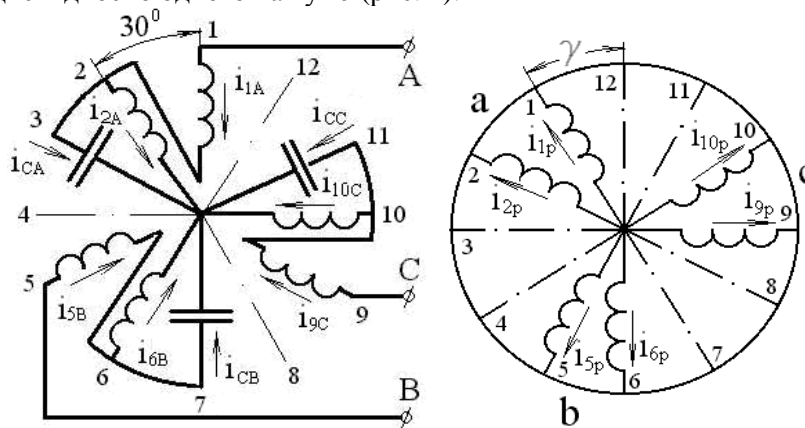


Рис. 2. Розрахункові електричні схеми обмоток статора і ротора асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією

Повна система рівнянь електричної рівноваги кіл статора і ротора КАД складається з 12 рівнянь, містить 6 шуканих струмів напівобмоток статора, 6 шуканих струмів фаз ротора та 3 ємнісних струми, які визначаються різницею струмів напівфаз статора [4].

$$\begin{aligned}
 1) \quad u_A &= (i_{1A} + i_{2A})R_k + \frac{d\psi_A}{dt} = (i_{1A} + i_{2A})R_k + (L_k + \frac{3 + \sqrt{3}}{2} M_k) \frac{d(i_{1A} + i_{2A})}{dt} - \\
 &\quad - \frac{\sqrt{3}}{2} M_k \frac{d(i_{6B} + i_{9C})}{dt} + 3M_k \frac{d(i'_{1p} + i'_{2p})}{dt}, \\
 2) \quad u_B &= (i_{5B} + i_{6B})R_k + \frac{d\psi_B}{dt} = (i_{5B} + i_{6B})R_k + (L_k + \frac{3 + \sqrt{3}}{2} M_k) \frac{d(i_{5B} + i_{6B})}{dt} - \\
 &\quad - \frac{\sqrt{3}}{2} M_k \frac{d(i_{10C} + i_{1A})}{dt} + 3M_k \frac{d(i'_{5p} + i'_{6p})}{dt},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3) \quad u_C &= (i_{9C} + i_{10C})R_k + \frac{d\psi_C}{dt} = (i_{9C} + i_{10C})R_k + (L_k + \frac{3 + \sqrt{3}}{2}M_k) \frac{d(i_{9C} + i_{10C})}{dt} - \\
 &\quad - \frac{\sqrt{3}}{2}M_k \frac{d(i_{2A} + i_{5B})}{dt} + 3M_k \frac{d(i'_{9p} + i'_{10p})}{dt}, \\
 4) \quad u_{2A} &= \frac{1}{C} \int i_{CA} dt = i_{2A}R_k + \frac{d\psi_{2A}}{dt} = i_{2A}R_k + (L_k + \frac{3}{2}M_k) \frac{di_{2A}}{dt} + \\
 &\quad + \frac{\sqrt{3}}{2}M_k \frac{d(i_{1A} - i_{9C})}{dt} + 3M_k \frac{di'_{2p}}{dt} \\
 5) \quad u_{6B} &= \frac{1}{C} \int i_{CB} dt = i_{6B}R_k + \frac{d\psi_{2A}}{dt} = i_{6B}R_k + (L_k + \frac{3}{2}M_k) \frac{di_{6B}}{dt} + \\
 &\quad + \frac{\sqrt{3}}{2}M_k \frac{d(i_{5B} - i_{1A})}{dt} + 3M_k \frac{di'_{6p}}{dt} \\
 6) \quad u_{10C} &= \frac{1}{C} \int i_{CC} dt = i_{10C}R_k + \frac{d\psi_{10C}}{dt} = i_{10C}R_k + (L_k + \frac{3}{2}M_k) \frac{di_{10C}}{dt} + \\
 &\quad + \frac{\sqrt{3}}{2}M_k \frac{d(i_{9C} - i_{5B})}{dt} + 3M_k \frac{di'_{10p}}{dt} \\
 7) \quad 0 &= i'_{1p}R_{kp} + \frac{d\psi'_{1p}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\psi'_{5p} - \psi'_{9p}) = i'_{1p}R_{kp} + (L_{kp} + 3M_k) \frac{di'_{1p}}{dt} + \frac{3}{2}M_k \frac{d(i_{1A} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{2A})}{dt} + \\
 &\quad + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \left[ (L_{kp} + 3M_k)(i'_{5p} - i'_{9p}) + \frac{3}{2}M_k(i_{5B} - i_{9C} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{6B} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{10C}) \right], \\
 8) \quad 0 &= i'_{2p}R_{kp} + \frac{d\psi'_{2p}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\psi'_{6p} - \psi'_{10p}) = i'_{2p}R_{kp} + (L_{kp} + 3M_k) \frac{di'_{2p}}{dt} + \frac{3}{2}M_k \frac{d(i_{2A} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1A})}{dt} + \\
 &\quad + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \left[ (L_{kp} + 3M_k)(i'_{6p} - i'_{10p}) + \frac{3}{2}M_k(i_{6B} - i_{10C} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{5B} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{9C}) \right], \\
 9) \quad 0 &= i'_{5p}R_{kp} + \frac{d\psi'_{5p}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\psi'_{9p} - \psi'_{1p}) = i'_{5p}R_{kp} + (L_{kp} + 3M_k) \frac{di'_{5p}}{dt} + \frac{3}{2}M_k \frac{d(i_{5B} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{6B})}{dt} + \\
 &\quad + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \left[ (L_{kp} + 3M_k)(i'_{9p} - i'_{1p}) + \frac{3}{2}M_k(i_{10C} - i_{2A} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{9C} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1A}) \right], \\
 10) \quad 0 &= i'_{6p}R_{kp} + \frac{d\psi'_{6p}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\psi'_{10p} - \psi'_{2p}) = i'_{6p}R_{kp} + (L_{kp} + 3M_k) \frac{di'_{6p}}{dt} + \frac{3}{2}M_k \frac{d(i_{6B} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{5B})}{dt} + \\
 &\quad + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \left[ (L_{kp} + 3M_k)(i'_{10p} - i'_{2p}) + \frac{3}{2}M_k(i_{10C} - i_{2A} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{9C} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1A}) \right], \\
 11) \quad 0 &= i'_{9p}R_{kp} + \frac{d\psi'_{9p}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\psi'_{1p} - \psi'_{5p}) = i'_{9p}R_{kp} + (L_{kp} + 3M_k) \frac{di'_{9p}}{dt} + \frac{3}{2}M_k \frac{d(i_{9C} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{10C})}{dt} + \\
 &\quad + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \left[ (L_{kp} + 3M_k)(i'_{1p} - i'_{5p}) + \frac{3}{2}M_k(i_{1A} - i_{5B} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{2A} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{6B}) \right],
 \end{aligned}$$

**ЧУЄНКО Р.М.**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПРЯМОГО ПУСКУ**  
**КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

---

$$12) \quad 0 = i'_{10p} R_{kp} + \frac{d\psi'_{10p}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (\psi'_{2p} - \psi'_{6p}) = i'_{10p} R_{kp} + (L_{kp} + 3M_k) \frac{di'_{10p}}{dt} + \frac{3}{2} M_k \frac{d(i_{10c} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{9c})}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \left[ (L_{kp} + 3M_k)(i'_{2p} - i'_{6p}) + \frac{3}{2} M_k (i_{2A} - i_{6B} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{1A} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{5B}) \right], \quad (3.18)$$

Для розрахунку динамічних електромеханічних процесів КАД необхідно до системи рівнянь електричної рівноваги її кіл додати рівняння руху привода з розрахунком електромагнітного моменту машини

$$M_e = -\frac{3pM_k}{\sqrt{3}} [i_{1A}(i'_{5p} - i'_{9p}) + i_{2A}(i'_{6p} - i'_{10p}) + i_{5B}(i'_{9p} - i'_{1p}) + i_{6B}(i'_{10p} - i'_{2p}) + i_{9c}(i'_{1p} - i'_{5p}) + i_{10c}(i'_{2p} - i'_{6p})] \quad (2)$$

Розв'язок системи рівнянь (1), разом з рівнянням руху електроприводу

$$M_e = M_c + \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

дає можливість будувати динамічні характеристики двигуна та аналізувати електромеханічні процеси в різних режимах роботи. В рівнянні (3.31)  $M_c$  – момент статичних опорів;  $J$  – момент інерції приводу.

За розробленою математичною моделлю (1-3) в обчислювальному комплексі MATLAB – SIMULINK була створена віртуальна модель для дослідження КАД (рис. 3). До складу моделі входять досліджуваний КАД (CAD), джерело змінної трифазної напруги (Voltage source), блок для задання механічного моменту на валу двигуна (Load Mechanical Torque (N.m)), універсальний блок вимірювання параметрів двигуна та осцилографи для спостереження миттєвих струмів статора і ротора, а також швидкості і моменту КАД.

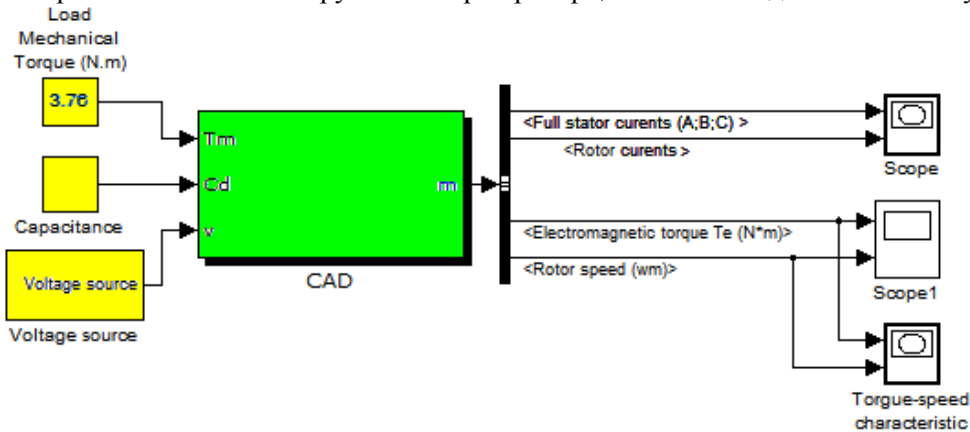


Рис. 3. Віртуальна модель для дослідження перехідних процесів в КАД

**Результати досліджень.** Характер розрахункових осцилограм пуску КАД, виконаного на базі АД 4А71В2 (рис. 4) відповідає фізичним уявленням щодо динаміки пуску двигуна. Зокрема спостерігаються коливання струму статора, які після завершення

розгону ротора закінчуються протіканням номінального струму. Спостерігаються також коливання електромагнітного моменту і частоти обертання ротора (рис. 5). Оскільки розглядається пуск КАД за номінального моменту опору на валу ( $T_m = 3,76$  Нм), то після завершення розгону електромагнітний момент також дорівнює номінальному.

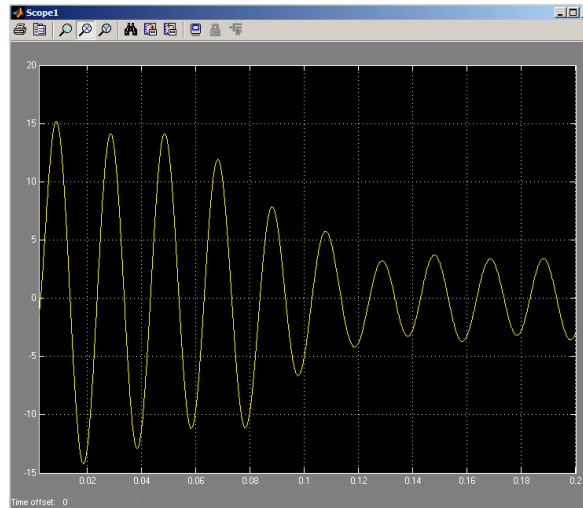


Рис. 4. Осцилограма струму статора КАД

Амплітуда пускового (ударного) струму КАД (рис. 4) складає 15,2 А, а пускового (ударного) моменту (рис. 5, а) – 13 Нм. Час розгону до номінальної швидкості при заданому моменті інерції ротора (рис. 5, б) дорівнює 0,15 с.

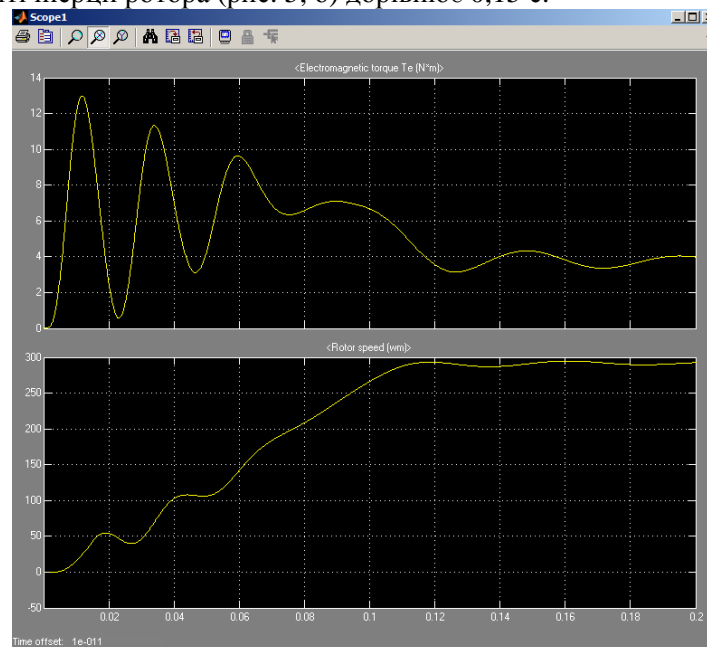


Рис. 5. Осцилограми електромагнітного моменту та частоти обертання КАД

**ЧУЄНКО Р.М.**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПРЯМОГО ПУСКУ**  
**КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

---

Відношення амплітуди пускового струму до номінального, знайдене за осцилограмою, складає  $I_{1max}/I_{1y} = 15,2 / 3,4 = 4,47$ , а пускового моменту  $M_{max}/M_y = 13 / 3,76 = 3,45$ . Наведені результати практично збігаються із розрахунковими значеннями даних відношень для струмів  $I_{1max}/I_{1y} = 16,1 / 3,7 = 4,35$  та моментів  $M_{max}/M_y = 12,8 / 3,54 = 3,61$ .

**Висновки**

Виконання КАД за послідовного з'єднання напівобмоток фаз статора одна з них шунтується конденсатором електричної ємності, не призводить до недопустимого збільшення пускового струму та електромагнітного моменту, величини яких призводили б до зменшення експлуатаційного ресурсу КАД у порівнянні з аналогічним серійним АД.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Копылов И.П. Электрические машины / Копылов И.П. – М.: Высшая школа, 2002. – 607 с.
2. Мишин В.И. Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях / Мишин В.И., Чуенко Р.Н., Гаврилюк В.В // Электротехника. – 2009. №8. – С. 30 – 36.
3. Сипайлов Г.А. Математическое моделирование электрических машин / Сипайлов Г.А., Лоос А.В. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.
4. Методика розрахунку характеристик компенсованого асинхронного двигуна у несиметричних режимах / Чуенко Р.М., Гаврилюк В.В // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2011. – Вип. 166. – С. 261 -268.

*Исследованы переходные процессы во время прямого пуска компенсированного асинхронного двигателя*

***Компенсированный асинхронный двигатель, прямой пуск, электромагнитный момент, частота вращения***

*There were researched transients during direct start-up of the compensated induction motor.*

*Compensated induction motor, direct star-up, electromagnetic torque, rotation frequency*

© Чуенко Р.М., 2015