

## ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У КОМПЕНСОВАНОМУ АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ ПІД ЧАС ПУСКУ

*Р.М. Чуєнко, кандидат технічних наук*

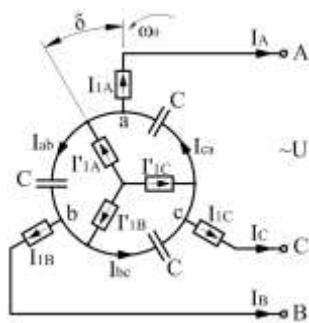
*Досліджено перехідні процеси під час прямого пуску компенсованого асинхронного двигуна*

***Двигун, прямий пуск, електромагнітний момент.***

**Постановка проблеми.** Трифазний асинхронний двигун (далі – АД), який складає основу електроприводу робочих машин, характеризується високими номінальними енергетичними показниками.

**Аналіз останніх досліджень.** 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 [1]. Для покращання енергетичних характеристик АД пропонується застосувати внутрішню ємнісну компенсацію реактивної потужності (далі – ВСКРП) [2].

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).



а)



б)

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

Для математичного моделювання КАД із послідовним з'єднанням напівобмоток фаз статора обрано систему реальних

фазових координат, 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).

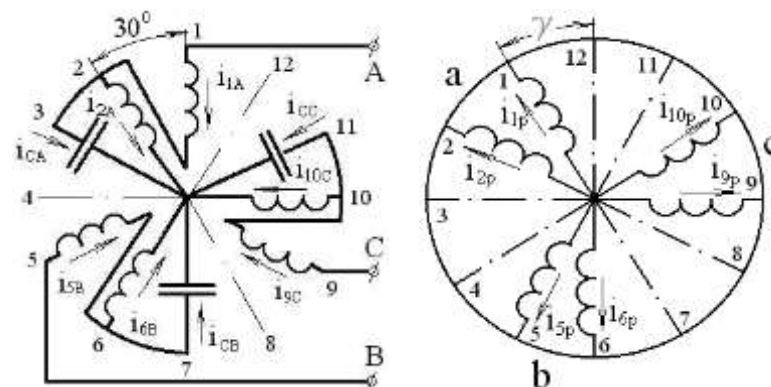


Рис. 2. Розрахункові електричні схеми обмоток статора і ротора асинхронного двигуна з внутрішньою ємнісною компенсацією.

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].

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

$$\begin{aligned}
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}, \\
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],
\end{aligned}$$

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

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

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

Розв'язок системи дванадцяти 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 електро механічні процеси в різних режимах роботи. В рівнянні (3)  $M_c$  – 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).

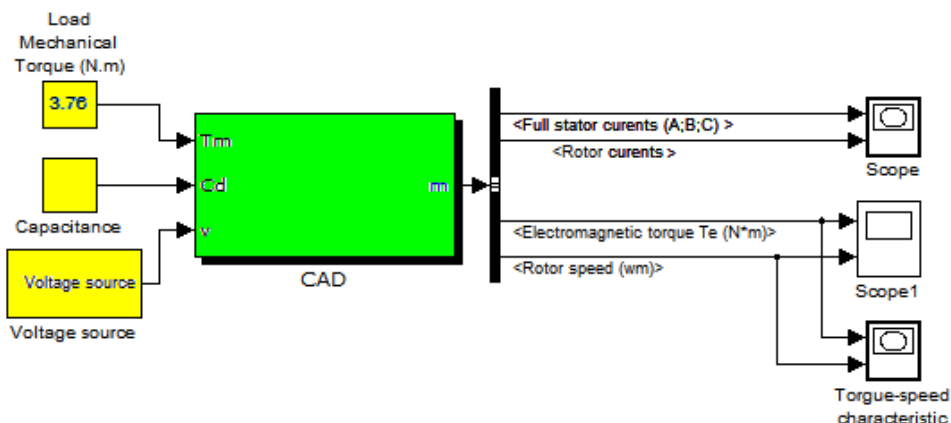


Рис. 3. Віртуальна модель для дослідження перехідних процесів в КАД.

До складу моделі входять досліджуваний КАД (CAD), джерело змінної трифазної напруги (Voltage source), блок для задання механічного моменту на валу двигуна (Load Mechanical Torque), універсальний блок вимірювання параметрів двигуна та осцилографи для спостереження миттєвих струмів статора і ротора, а також швидкості і моменту КАД.

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

**Результати досліджень.** Характер розрахункових осцилограм пуску КАД, виконаного на базі АД 4A71B2 (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.

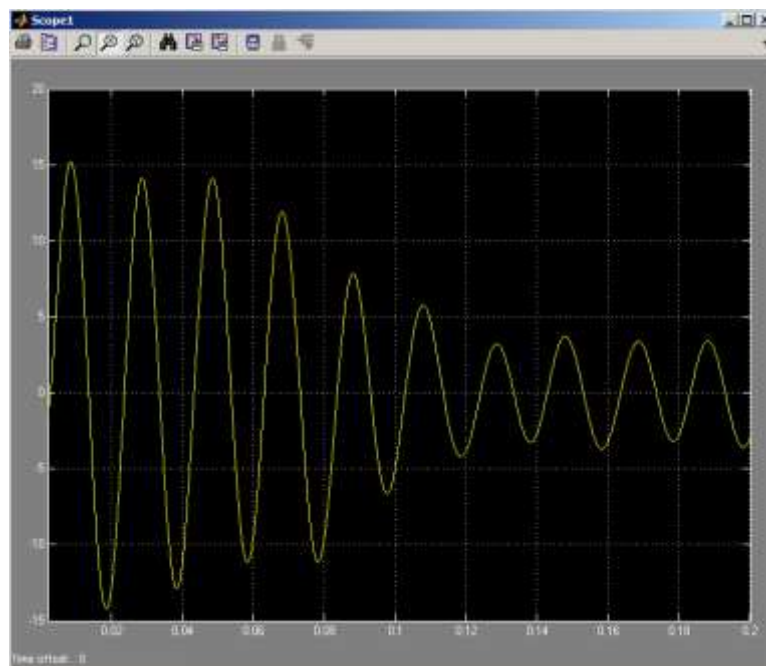


Рис. 4. Осцилограма струму статора КАД.

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.

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  $M_{max} / M_y = 12,8 / 3,54 = 3,61$ .

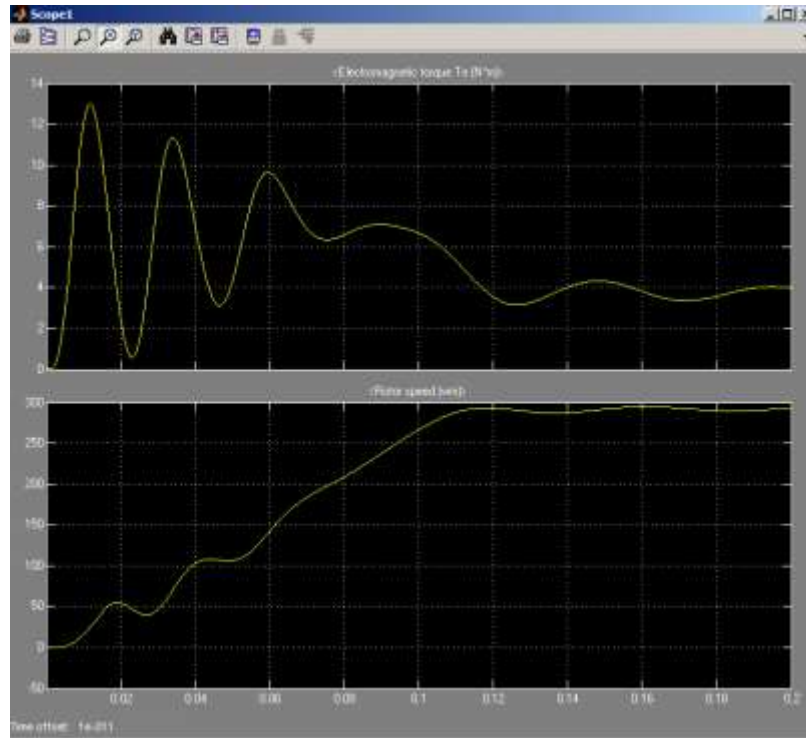


Рис. 5. Осцилограми електромагнітного моменту та частоти обертання КАД.

**Висновок.** 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 / И.П. Копылов. – 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 / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.
4. Чуенко Р.М. Методика розрахунку характеристик компенсованого асинхронного двигуна у несиметричних режимах / Р.М. Чуенко, В.В. Гаврилюк // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2011. – Вип. 166, ч. 2. – С. 261–268.

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

***Двигатель, прямой пуск, электромагнитный момент.***

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

***Motor, direct star-up, electromagnetic torque.***

УДК 631.147:632.937.3

## **ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА І ВНЕСЕННЯ ЕНТОМОЛОГІЧНОГО ПРЕПАРАТУ ТРИХОГРАМИ**

***О.А. Марус, кандидат технічних наук***

*В даній роботі наведений біотехнологічний процес виробництва та внесення ентомологічного препарату трихограми з результатами визначення економічної ефективності та окупності обладнання, яке при цьому використовується.*

***Біотехнологічний процес, ентомологічний препарат трихограми, собівартість, економічна ефективність.***

**Постановка проблеми.** Масове виробництво та використання ентомологічного препарату трихограми в біологічному захисті рослин припало на 70–90 роки минулого століття. В кожне господарство препарат поставлявся безкоштовно, поки була державна підтримка. З розвалом Союзу рухнула вся система, біометод вийшов на ринкові відносини, біолабораторії почали працювати на самозабезпеченні, а господарства, які звикли до безкоштовного постачання препарату, в більшості відмовились від його використання, і лабораторії, почали зупиняти свою діяльність. Ця ситуація в свою чергу дозволила закордонним фірмам у швидкому порядку вийти на український ринок з хімічними препаратами і заповнити його.

В даний момент на Україні залишилось близько 20 біолабораторій, серед яких і навчально-науково-виробнича лабораторія біологічного захисту рослин Національного університету біоресурсів і природокористування України, яка укомплектована сучасним обладнанням для виробництва ентомологічного препарату трихограма. Лабораторія займається не лише розведенням

© О.А. Марус, 2013