

УДК 621-83: 621.313.333

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ МЕРЕЖЕЮ ЖИВЛЕННЯ

Roman Chuyenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
Heroiv Oborony Str. 15, Kiev, 03041, Ukraine

**Анотація.** Досліджено електромагнітну сумісність асинхронного двигуна із внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності з мережею живлення

**Ключові слова:** компенсований асинхронний двигун, електромагнітна сумісність, мережа живлення, гармоніка, реактивна потужність.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Трифазний асинхронний двигун (АД), який складає основу електроприводу робочих машин у сільському господарстві, характеризується високими номінальними енергетичними показниками [1-3]. 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 [4-6]. Для покращання енергетичних характеристик АД пропонується застосовувати внутрішню ємнісну компенсацію реактивної потужності [7-10].

Метою досліджень є аналіз електромагнітної сумісності компенсованого асинхронного двигуна (КАД) з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності із мережею живлення.

### 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, 3]. Перший спосіб внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності в АД полягає у тому, що при послідовному з'єднанні напівобмоток статора одна з них шунтується конденсатором електричної ємності (рис. 1, а). При цьому зашунтована напівобмотка обмінюється реактивною потужністю не з мережею живлення, а з конденсатором. Внаслідок чого незашунтована напівобмотка фази обмотки статора частково або повністю звільняється від передачі реактивної потужності зашунтованій напівобмотці, а струм незашунтованої напівобмотки зменшується.

### РЕЗУЛЬТАТИ І ДИСКУСІЯ

Характерною рисою даного способу внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності в АД є зменшення струму та втрат потужності не лише у мережі живлення, як це відбувається при підключенні конденсаторів паралельно споживачу, але і у самому двигуні за рахунок зменшення струму в одній із напівобмоток статора [1].

При цьому ємнісні струми конденсаторів, з'єднаних трикутником, випереджають свої відповідні напруги на  $90^\circ$  (рис. 2, а) та до середніх точок фазних обмоток статора  $a$ ,  $b$ ,  $c$  підходять сумарні ємнісні струми, що випереджають фазні напруги зашунтованих

напівобмоток на  $90^\circ$ , наприклад, для фази  $A$ - $a$  цей струм дорівнює  $\dot{I}'_a = \dot{I}_{ba} - \dot{I}_{ac}$ , він випереджає напругу  $U'_{1A}$  зашунтованої напівобмотки на  $90^\circ$ , що компенсує її реактивний струм, а загальний струм іншої напівобмотки  $\dot{I}_{1A} = \dot{I}'_{1A} + \dot{I}'_a$  зменшується і зміщується за фазою відносно струму зашунтованої напівобмотки на кут  $\alpha$ . За рахунок використання внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності струм холостого ходу КАД зменшується на 30-40%, а у режимі номінального навантаження на валу струм, споживаний з мережі живлення, зменшується на 12-15%, коефіцієнт потужності зростає на 12-15% та на 2-3% збільшується коефіцієнт корисної дії двигуна, а при недовантаженні на 5-6% (рис. 2, б). Внаслідок зниження загальної споживаної потужності та струму КАД на 25-40% зменшуються транспортні втрати активної електроенергії в усіх елементах електричної системи [2, 3].

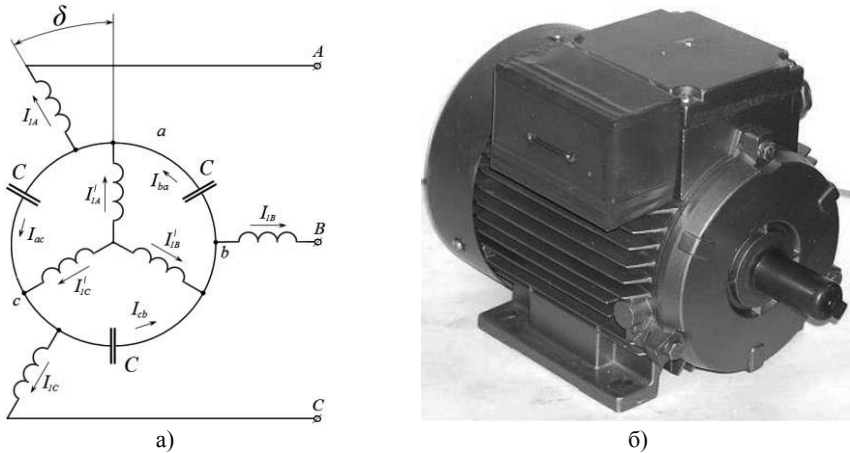


Рис. 1. Схема обмоток статора (а) та зовнішній вигляд (б) компенсованого асинхронного двигуна

Зміщення за фазою струмів напівобмоток  $\dot{I}'_{1A}$  і  $\dot{I}_{1A}$  просторово зміщує одну відносно іншої обертові хвилі їхніх магніторухливих сил (МРС), що призводить до деякого збільшення струмів намагнічування, необхідних для створення заданих МРС і магнітного потоку. Для компенсації даного явища напівобмотки повинні бути просторово зміщені одна відносно іншої на деякий кут  $\delta$ .

Дійсно, якщо виразити МРС зовнішніх напівобмоток на їхніх осях як:

$$F_{1A} = F_{m1} \cos \omega t, \quad F_{1B} = F_{m1} \cos(\omega t - \rho), \quad F_{1C} = F_{m1} \cos(\omega t + \rho), \quad (1)$$

а внутрішніх:

$$F'_{1A} = F'_{m1} \cos(\omega t - \alpha), \quad F'_{1B} = F'_{m1} \cos(\omega t - \rho - \alpha), \quad F'_{1C} = F'_{m1} \cos(\omega t + \rho - \alpha), \quad (2)$$

то їхня сумарна дія з урахуванням просторового зсуву фаз на кут  $\rho = 120^\circ$  і між собою у фазах на кут  $\delta$  визначає величини МРС зовнішніх напівобмоток:

$$F_1 = F_{1A} + F_{1B} e^{j\rho} + F_{1C} e^{-j\rho} = \frac{3}{2} F_{m1} e^{j\omega t}, \quad (3)$$

а внутрішніх, зашунтованих ємністю, напівобмоток:

$$F'_1 = F'_{1A} e^{j\delta} + F'_{1B} e^{j(\delta+\rho)} + F'_{1C} e^{j(\delta-\rho)} = \frac{3}{2} F'_{m1} e^{j(\omega t + \delta - \alpha)}, \quad (4)$$

де:  $F_{m1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_1 w_1}{p} k_{ol}$ ,  $F'_{m1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I'_1 w'_1}{p} k_{ol}$  – амплітуди МРС на осі напівобмоток фаз, відповідно зовнішніх  $F_{m1}$  і внутрішніх  $F'_{m1}$ ;  $I_1$  і  $I'_1$  – струми напівобмоток;  $W_1$  і  $W'_1$  – кількості витків напівобмоток (зазвичай  $w_1 = w'_1 = \frac{W}{2}$ );  $k_{ol}$  – обмотувальний коефіцієнт;  $p$  – кількість пар полюсів напівобмотки обмотки й обмотки статора в цілому.

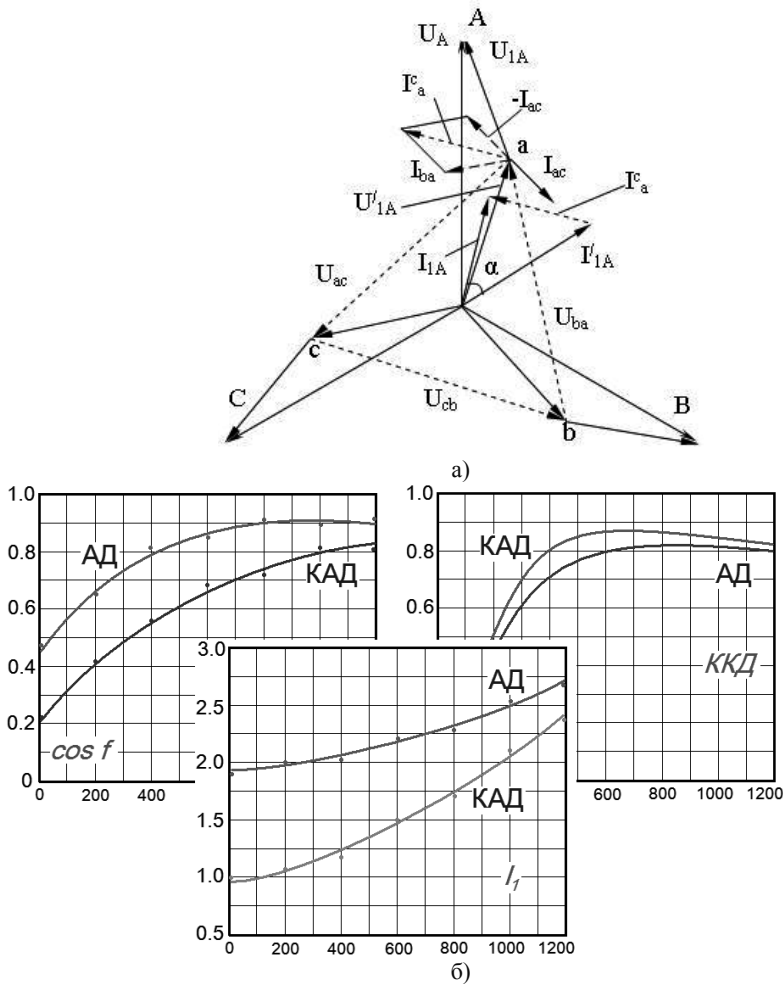


Рис. 2. Спрощена векторна діаграма (а) та робочі характеристики (б) КАД

Вирази (3), (4) своїми поворотними множниками  $e^{j\omega t}$  і  $e^{j(\omega t + \delta - \alpha)}$  вказують на обертовий характер хвиль МРС напівобмоток, що просторово зміщені одна відносно іншої на кут  $(\delta - \alpha)$ . Сумарна МРС обмоток статора буде максимальною за умови збігання осей МРС напівобмоток, тобто при  $\delta - \alpha = 0$ , коли струми у відповідних напівобмотках фаз зміщені просторово і в часі на рівні і протилежні кути, наприклад, у фазі  $A$  струм  $I'_{1A}$  зашунтованої напівобмотки відстає в часі від струму зовнішньої напівобмотки на кут  $\alpha$ , а просторово випереджає його на кут  $\delta$ , причому  $\delta - \alpha = 0$ . З іншого боку, для забезпечення заданих МРС і

магнітного потоку магнітного кола машини за умови  $\delta-\alpha=0$  вимагаються мінімальні значення струму намагнічування і загального струму машини [1].

Для двигунів малої потужності (до 11 кВт) з номінальним коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_n=0,8-0,87$  ( $\varphi_n=29-35$ , при повній компенсації  $\varphi_n \approx \alpha \approx 30^\circ$ ) для забезпечення умови  $\delta-\alpha=0$  кут просторового зсуву напівобмоток одна відносно одної зручно прийняти  $\delta=30^\circ$ , який досягається розподілом фазної зони  $60^\circ$  обмотки статора на дві рівні частини.

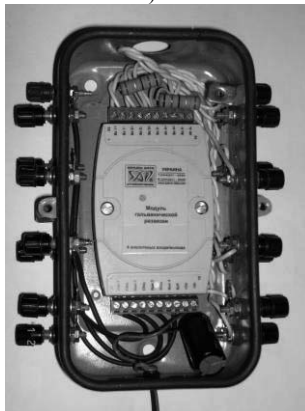
Зазвичай трифазна ( $m=3$ ) система струмів електричної машини своїми прямими і зворотними струмами котушок фази обмотки статора створює  $2m=6$  фазних зон по  $60^\circ$  кожна. При розділенні такої фазної зони на дві рівні частини по  $30^\circ$  кожна зі струмами, зміщеними у часі в напівобмотках на  $30^\circ$ , наприклад, за рахунок ємнісної компенсації струму в одній з напівобмоток, відбувається подвоєння кількості фазних зон обмотки статора до  $2m'=12$ , що еквівалентно подвоєнню кількості фаз обмотки статора до  $m'=2m$ .

Подвоєння кількості фазних зон обмотки статора виключає з гармонійного складу магнітного поля машини найбільш небезпечні паразитні гармоніки зворотну  $\nu_{зв}=5$  та пряму  $\nu_{пр}=7$ , просторове зміщення яких у напівхвилях МРС складає  $\nu\delta-\alpha=\pm 180^\circ$ , тобто вони знаходяться у протифазі.

Для експериментального дослідження електромагнітної сумісності КАД із мережею живлення за рівнем вищих просторових гармонік було використано цифровий осцилограф Metrix-3252 із відповідним програмним забезпеченням та модуль гальванічної розв'язки SDI-AIU-4U (рис. 3).



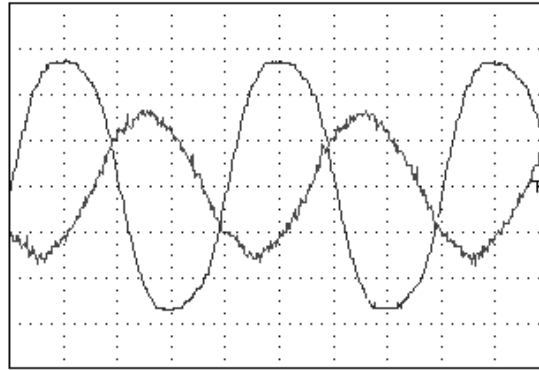
а)



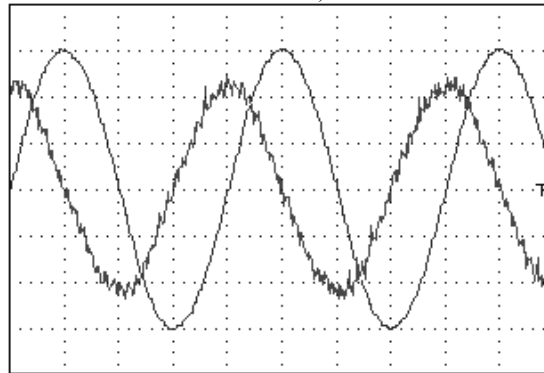
б)

Рис. 3. Цифровий осцилограф (а) та модуль гальванічної розв'язки (б)

При цьому знімалися осцилограми напруги на фазній обмотці статора та струму, що споживається КАД з мережі живлення для двох випадків: за холостого ходу та за номінального навантаження. На рис. 4 наведені осцилограми базового АД, а на рис. 5 – КАД.

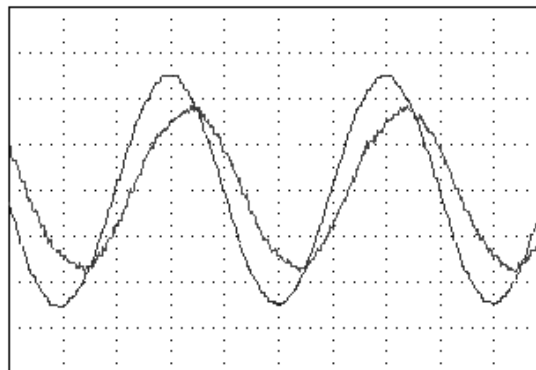


a)

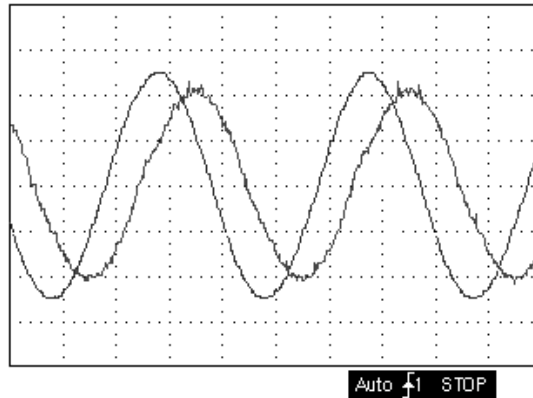


б)

Рис. 4. Осцилограми напруги та струму базового АД на холостому ходу (а) та за номінального навантаження на валу (б)



a)



б)

Рис. 5. Осцилограми напруги та струму КАД на холостому ході (а) та за номінального навантаження на валу (б)

Також на рис. 6 наведений гармонійний склад струму споживаного двигуном з мережі живлення, який був отриманий за допомогою функції *fft* (Fast Fourier Transformation) для базового АД та КАД. Очевидно, що за рахунок використання внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності за умови  $\delta - \alpha = 0$  спостерігається зменшення рівня 5-ї та 7-ї гармонік.

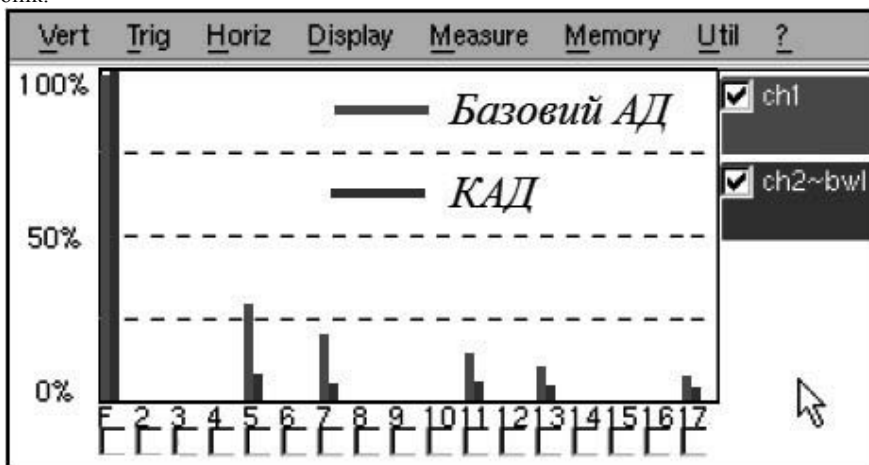


Рис. 6. Спектральний склад струму споживаного КАД з мережі живлення

Даний спосіб внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності є простим, дешевим і надійним. Питома ємність конденсаторів становить 8 мкФ на фазу на 1 кВт номінальної потужності двигуна [4].

## ВИСНОВКИ

Використання внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності покращує електромагнітну сумісність КАД порівняно із базовим АД за величиною реактивної потужності та рівнем вищих гармонік.

Фундаментальною умовою оптимальної компенсації, яку необхідно дотримуватися при створенні КАД є умова  $\delta - \alpha = 0$ , де  $\delta$  – кут просторового зсуву осей напівобмотки статора,  $\alpha$  – кут фазового зсуву між струмами напівобмоток.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Патент України №51814 Н02К 17/34, Асинхронний електродвигун [Мишин В.І., Чуенко М.О., Чуенко Р.М., Лісовий С.С.], Бюл. №12, 2002.
2. Чуенко Р.М. Енергозбереження у підготовці кормів до згодовування при використанні асинхронних електродвигунів з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.16. – К. НАУ, 2002. – 20 с.
3. Мишин В.И., Чуенко Р.М., Кулинич А.Н. Особенности физических процессов в компенсированном асинхронном двигателе. Научно-практический журнал национального технического университета „ХПИ” // *Електротехніка і електромеханіка*. Харків. – 2005. – №2. – С. 48–53.
4. Мишин В. И., Чуенко Р. Н., Гаврилюк В. В. Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронном электродвигателе // *Электротехника*, №8. М. – 2009. – С. 30–36.
5. *Cranes – Design, Practice, and Maintenance* / J. Verschoof. – London: Professional Engineering Publishing Limited, 2002. – 328 p.
6. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т.1. Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1965. – 204 с.
7. Дьяконов В. П. *Mathematica в математических и научно-технических расчетах* / Дьяконов В.П. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 696 с.
8. Stuart J. Birrell, Kenneth A. Sudduth, Steven C. Borgelt. Comparison of sensors and techniques for crop yield mapping. *Computers and Electronics in Agriculture* 14 (1996), p. 215–233.
9. Захарин Ф.М. Методы и алгоритмы прикладного анализа. Выпуск 2. Статистическая фильтрация / Ф.М. Захарин. – К.: КВВАИУ, 1978. – 148 с.
10. Корн Г. Справочник по математике для научных работников / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

## RESEARCH THE COMPENSATED INDUCTION MOTOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY WITH POWER LINE

**Summary.** There was researched the compensated induction motor electromagnetic compatibility with a power line.

**Key words:** compensated induction motor, electromagnetic compatibility, power line, harmonic, reactive power.