

УДК 621.313

ОЦІНКА ТА КОРЕКЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ПРИ НЕСИМЕТРІЇ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**В. О. Мельников**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
ул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Проведено оцінку впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна на енергетичні та динамічні характеристики в системах бездатчикового векторного керування. Розроблено систему векторного керування у трифазній системі координат, яка шляхом корекції завдання поточкозчеплення дозволяє компенсувати несиметрію обмоток асинхронних двигунів.

Ключові слова: несиметрія, обмотки статора, енергетичні характеристики, система керування.

ОЦЕНКА И КОРРЕКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИИ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**В. А. Мельников**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Проведена оценка влияния несимметрии обмоток статора асинхронного двигателя на энергетические и динамические характеристики систем бездатчикового векторного управления. Разработана система векторного управления в трехфазной системе координат, которая путем коррекции задания поточкозчепления позволяет компенсировать несимметрию обмоток асинхронных двигателей.

Ключевые слова: несимметрия, обмотки статора, энергетические характеристики, система управления.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На сьогодні як у промисловості, так і побуті все більшої гостроти набуває проблема енергозбереження, що обумовлено зростанням споживання електроенергії. Оскільки серед споживачів електричної енергії домінуюче місце займають електромеханічні перетворювачі, то головним шляхом розв'язання зазначеної проблеми є впровадження в усі галузі промисловості систем регульованого електроприводу, що визнано у світовій практиці однією з найбільш ефективних енергозберігаючих та ресурсозберігаючих технологій.

У масових системах регульованого електроприводу (ЕП) найбільшого поширення набув електропривод змінного струму, особливо асинхронний. Незважаючи на простоту та ефективність скалярних систем керування асинхронними двигунами (АД), найбільш перспективним у даний час є принцип векторного керування асинхронним ЕП, що дозволяє розглядати АД як двоканальний об'єкт у координатній системі, орієнтованій за вектором поточкозчеплення ротора, та незалежно впливати на поздовжню (намагнічуючу) та поперечну (моментоутворюючу) складові вектора струмів статора для керування магнітним станом машини й електромагнітним моментом відповідно.

У промисловості широко поширені як традиційні системи векторного керування (СВК) асинхронними ЕП з датчиком швидкості на валу, так і бездатчикові системи, тобто такі, що не містять у системі датчиків окрім тих, що можуть бути встановлені всередині силового перетворювача частоти [1]. Оцінка швидкості обергання в таких системах формується або на підставі інформації про струм та напругу двигуна на виході перетворювача частоти, або взагалі при використанні лише інформації про струм двигуна.

З огляду на тенденцію розширення сфери використання СВК, що характеризується збільшенням потужності встановлюваних перетворювачів, істотний інтерес мають енергетичні характеристики таких систем ЕП, оскільки довготривала експлуатація АД призводить до виникнення різного роду пошкоджень

(обмоток статора, ротора чи механічних). За статистичними даними більше половини випадків виходу з ладу АД відбувається через пошкодження обмоток статора [2]. Головною причиною цього є пошкодження провідникової та пазової ізоляції, що може бути наслідком як порушень у технології виробництва або ремонту двигунів, так і неправильної експлуатації або тривалої роботи. У результаті виникають короткі замикання (міжвиткові, міжфазні) та замикання на корпус. У зв'язку з тим, що промислові підприємства скорочують обсяг ремонтних робіт, то при виході з ладу кількох секцій обмотки статора АД середньої та великої потужності ці секції не витягують з пазів, але виключають їх зі схеми обмотки, з'єднуючи кінці секцій в обхід несправних [3]. У результаті обмотка статора стає несиметричною і двигун надалі експлуатується з такою обмоткою. Оскільки наслідки роботи АД з несиметричними обмотками можуть бути доволі значними як для двигуна, так і для робочого механізму, тому актуальною є задача дослідження динамічних та енергетичних показників бездатчикового векторного керування електроприводів з несиметричними двигунами.

Метою досліджень є оцінка та корекція енергетичних режимів роботи систем бездатчикового векторного керування електроприводами з несиметричними двигунами.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Дослідження енергетичних режимів роботи бездатчикових СВК з несиметричним АД проводилися на математичних моделях, у яких АД описується диференціальними рівняннями в трифазній системі координат [4], а структуру системи керування побудовано в ортогональній системі координат при напрямі осі d за просторовим вектором поточкозчеплення ротора.

Як непрямі методи визначення поточкозчеплення ротора були розглянуті спостерегачі:

– *спостерегач № 1* – базується на використанні рівнянь статорного кола в нерухомій системі координат [5];

– спостерігач № 2 – базується на використанні рівнянь роторного кола АД в обертовій системі координат [5];

– спостерігач № 3 – використовує рівняння асинхронного двигуна для випадку орієнтації дійсної вісі обертової системи координат за вектором потокозчеплення ротора [6].

Дослідження СВК з непрямими методами визначення швидкості проводилися на основі спостерігачів [7]:

– спостерігач № 1 – базується на розрахунку частоти напруги живлення в нерухомій системі координат, а розрахунок роторної ЕРС – в обертовій системі координат при орієнтації осі d за вектором потокозчеплення статора;

– спостерігач № 2 – базується на розрахунку частоти напруги живлення та частоти роторної ЕРС з проєкцій просторових векторів напруги та струму на вісі, зв’язаної зі статором нерухомої системи координат $\alpha-\beta$.

Дослідження енергетичних режимів роботи бездатчикових СВК проводилися для структури системи керування, що базуються на комбінації зазначених спостерігачів. Математичне моделювання даних систем було проведено для двигуна серії 4A100L2У3 з параметрами: $P_n=5,5$ кВт; $n_n=3000$ об/хв; $\cos\varphi=0,91$; $\eta=0,875$; $R_s=0,728$ Ом; $R_r=0,437$ Ом; $L_s=0,00209$ Ом; $L_r=0,004249$ Ом; $L_\mu=0,147$ Ом.

Оцінка енергетичних та механічних характеристик проводилася на основі наданих у роботі [8] параметрів оцінювання.

Проведені математичні дослідження зазначених структур систем керування показали, що використання в СВК непрямих методів визначення потокозчеплення та кутової частоти обертання ротора з двигунами, що мають несиметрію обмоток статора, призводить до суттєвого погіршення енергетичних та динамічних характеристик даних систем чи взагалі до втрати працездатності системи електропривода. Залежності енергетичних параметрів оцінювання розглянутих бездатчикових СВК від відсотка несиметрії обмоток статора двигуна зображено на рис. 1–2.

Оцінка енергетичних режимів роботи розглянутих систем ЕП проводилася на основі таких показників: $1,2 \Delta P_{Cu1}$ – перевантаження двигуна; $1,5 P_0$ – перевантаження перетворювача; $5...10 \Delta P_{Cu1}$ – швидко зростаючі теплові перевантаження; $\delta M < 10\%$ – допустимий рівень змінної складової електромагнітного моменту; $\delta M > 20\%$ – недопустимий рівень змінної складової електромагнітного моменту. В табл. 1 наведено допустимі значення відсотку несиметрії обмоток двигуна за представленими показниками оцінювання, де також наведено відсоток несиметрії, за якого спостерігається втрата працездатності бездатчикових СВК.

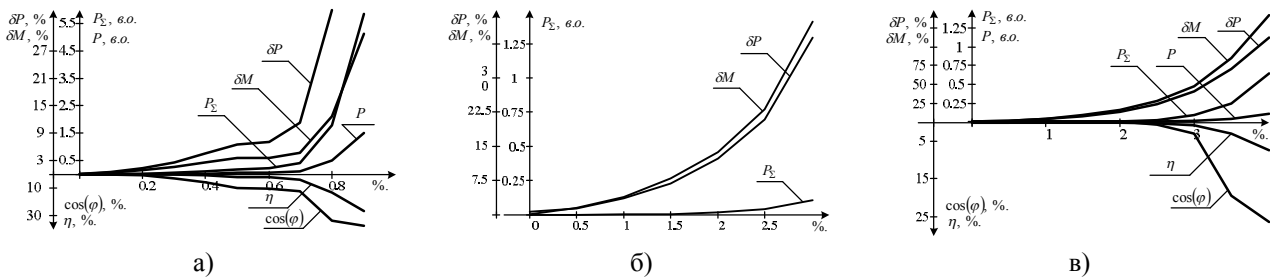


Рисунок 1 – Відхилення енергетичних характеристик бездатчикової СВК з першим спостерігачем швидкості та спостерігачами потокозчеплення: а) спостерігач № 1, б) спостерігач № 2, в) спостерігач № 3

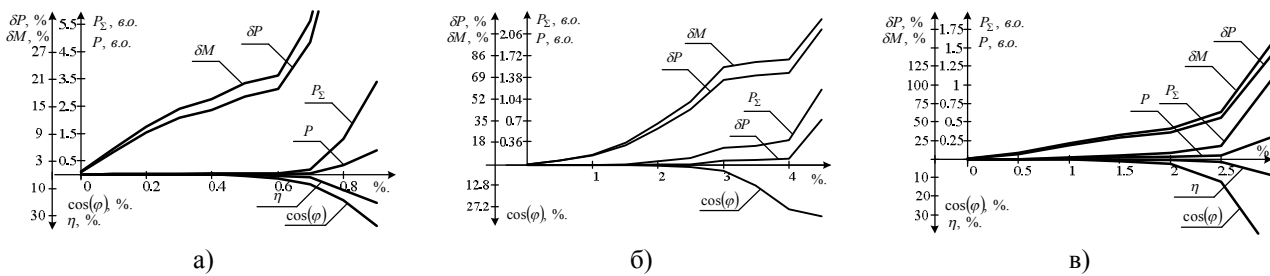


Рисунок 2 – Відхилення енергетичних характеристик бездатчикової СВК з другим спостерігачем швидкості та спостерігачами потокозчеплення: а) спостерігач № 1, б) спостерігач № 2, в) спостерігач № 3

Таблиця 1 – Оцінювання режимів роботи бездатчикових систем електроприводу

Системи ЕП		Критерії оцінювання					
Визначення швидкості	Визначення потоку	1,2	1,5	5...10	$\delta M < 10\%$	$\delta M > 20\%$	Втрата працездатності
		ΔP_{Cu1}	P_0	ΔP_{Cu1}	Рівень несиметрії		
Спостерігач № 1	Спостерігач № 1	0,42	0,8	0,81	0,75	0,84	> 0,86
	Спостерігач № 2	2,75	–	–	2,05	2,65	> 2,85
	Спостерігач № 3	2,95	–	–	1,55	2,15	> 3,8
Спостерігач № 2	Спостерігач № 1	0,65	0,83	0,845	0,185	0,5	> 0,95
	Спостерігач № 2	2,55	4,35	–	1,12	1,55	> 4,5
	Спостерігач № 3	2,05	–	–	0,55	0,95	> 3,2

Класичні системи бездатчикового векторного керування, які базуються на ортогональних моделях АД, не дозволяють здійснювати впливи окремо на кожну фазу, що, у свою чергу, не дає змоги проводити корекцію режимів роботи несиметричних електродвигунів. Тому для вирішення задачі корекції

енергетичних режимів роботи шляхом компенсації впливу несиметрії обмоток двигуна у складі електропривода з бездатчиковим векторним керуванням було розроблено математичну модель системи керування (рис. 3) з роздільним регулюванням кожної фази двигуна.

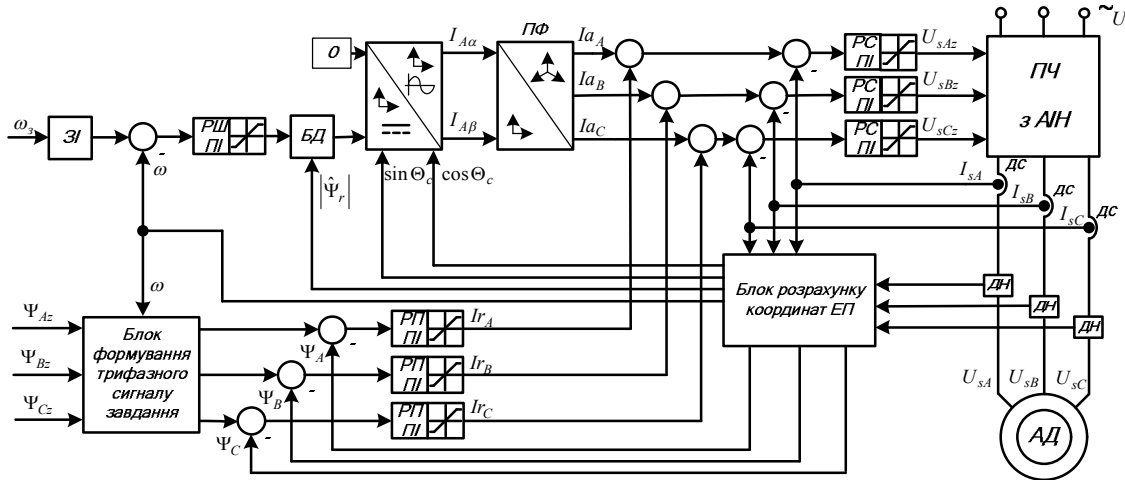


Рисунок 3 – Функціональна схема системи роздільного векторного регулювання фаз АД

У наданій системі керування контур регулювання швидкості двигуна, так само як і в класичних СВК, виконується в обертовій системі координат d, q . Вихідний сигнал регулятора швидкості ділиться на модуль потокозчеплення ротора, після чого отримується сигнал завдання активної складової струму в обертовій системі координат. За допомогою координатного перетворювача відбувається перехід у нерухому систему координат за виразами:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_{a_q} \\ I_{a_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_k) & \sin(\varphi_k) & 0 \\ -\sin(\varphi_k) & \cos(\varphi_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a_\alpha} \\ I_{a_\beta} \\ I_{a_\gamma} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Отримані сигнали завдання активної складової струму статора в нерухомій системі координат, за допомогою фазного перетворювача, перетворюються в сигнали завдання струму в трифазній системі координат. Ці перетворення відбуваються на основі рівнянь:

$$\begin{bmatrix} I_{a_A} \\ I_{a_B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a_\alpha} \\ I_{a_\beta} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$I_{a_C} = -(I_{a_A} + I_{a_B}).$$

Надані співвідношення дозволяють отримати сигнали завдання активних складових струму статора за кожною фазою двигуна окремо.

Контур регулювання потокозчеплення виконується в нерухомій системі координат. При цьому регулювання відбувається за кожною фазою окремо. У даному випадку сигнал завдання потокозчеплення для збереження орієнтації системи за вектором потокозчеплення ротора необхідно надавати трифазною системою синусоїдних впливів з фазовим зрушенням на 120° один відносно одного. Для цієї задачі використовується блок формування направляючих потокозчеплення (рис. 4). У наданому блоці вхідною величиною є сигнал швидкості обертання ротора двигуна, що перетворюється в синусні та косинусні направляючі, які використовуються в ко-

ординатних перетворювачах. Подальше перетворення даних векторів у трифазну систему координат дозволяє отримати необхідні сигнали направляючих потокозчеплення ротора за трьома фазами двигуна.

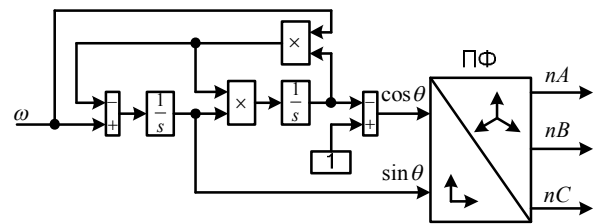


Рисунок 4 – Блок формування направляючих потокозчеплення

Вихідні сигнали регуляторів потокозчеплення надають сигнали завдання реактивних складових струму фаз статора двигуна. Підсумовуючи задані активні та реактивні складові струму статора, за відповідними фазами двигуна отримуємо задані сигнали струму, що порівнюються з реальними сигналами. Вихідні сигнали регуляторів струму надають сигнали завдання напруги двигуна.

Надана система роздільного керування вимагає наявності інформації про потокозчеплення ротора за всіма фазами двигуна. Однак, незважаючи на різноманітність запропонованих методик визначення векторів потокозчеплення ротора, існуючі структури спостерігачів дозволяють виконувати розрахунки лише в ортогональних системах координат, що за наявності координатних та фазних перетворювачів призводить до значних похибок визначення необхідних векторних змінних. Тому для розрахунку потоку АД у нерухомій системі координат можна використати наступне рівняння:

$$\frac{d\dot{\Psi}_r}{dt} = \frac{L_r}{L_\mu} \left(\dot{U}_s - R_s \dot{I}_s - \sigma L_s \frac{d\dot{I}_s}{dt} \right), \quad (3)$$

де \dot{U}_s, \dot{I}_s – напруга та струм статора;

Ψ_r – потокозчеплення ротора; R_s – активний опір статора; L_s, L_r – індуктивні опори статора і ротора; L_μ – головна взаємодуктивність.

Розкладаючи узагальнюючі вектори на складові за окремими фазами, отримаємо рівняння спостережача потокозчеплення ротора в трифазній системі координат.

З урахуванням того, що при побудові системи векторного керування необхідно мати інформацію не тільки про складові векторів потокозчеплення, а й про його модуль, то в даному випадку модуль потокозчеплення ротора асинхронного двигуна може бути розраховано за виразом:

$$|\Psi_r| = \sqrt{\Psi_{rA}^2 + \Psi_{rB}^2 + \Psi_{rC}^2} \quad (4)$$

Ідентифікований сигнал потокозчеплення ротора фази А двигуна зображено на рис. 5.

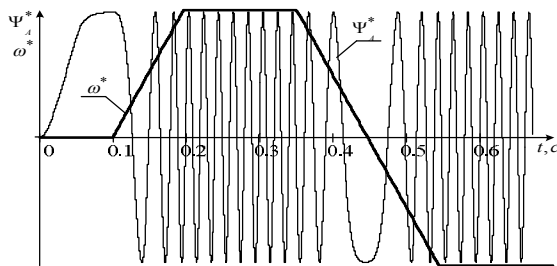


Рисунок 5 – Потокозчеплення ротора фази А

Швидкість обертання ротора двигуна в системі бездатчикового векторного керування електроприводом визначається на основі вимірних сигналів напруги та струму статора за виразом [7]:

$$\omega = \frac{\omega_{0el} - \omega_p}{p_n} \quad (5)$$

де ω_{0el} – частота напруги живлення; ω_p – частота роторної ЕРС; p_n – кількість пар полюсів двигуна.

Надана система роздільного регулювання дозволяє формувати складові струму статора двигуна в кожній фазі окремо, так сигнали завдання активної та реактивної складової струму фази А двигуна зображено на рис. 6.

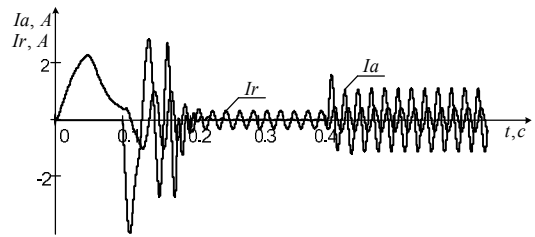


Рисунок 6 – Сигнали завдання активної та реактивної складової струму фази А

Роздільне керування реактивним каналом передачі енергії дає можливість змінювати амплітудне значення намагнічуючої складової струму в окремих фазах статора. Змінюючи сигнал завдання потокозчеплення в одній фазі системи керування, змінюється намагнічуюча складова струму завдання, а отже й напруга відповідної фази двигуна. Змінені напруги, відпрацьовуючи сигнал завдання, відповідним чином впливають на процеси перетворення енергії в самому двигуні.

Проведені у роботі [9] дослідження системи роздільного регулювання показали, що вплив несиметрії обмоток статора АД на енергетичні та динамічні характеристики систем ЕП можна компенсувати за рахунок корекції сигналу завдання потокозчеплення у несиметричній фазі двигуна. Слід також зазначити, що порівняно з ортогональними системами керування, які були розглянуті вище, надана система керування не втрачає працездатності навіть при значних відсотках несиметрії обмоток АД. Так, на рис. 7 зображено порівняння енергетичних характеристик бездатчикових СВК з двома розглянутими спостережачами швидкості при 5% несиметрії обмоток двигуна та при зменшенні сигналу завдання потокозчеплення в несиметричній фазі на 5%.

Результати проведених досліджень показали, що при зменшенні сигналу завдання потокозчеплення несиметричної фази двигуна на величину, яка дорівнює значенню несиметрії активних опорів за фазами взятої у відносних одиницях, енергетичні характеристики системи електроприводу наближаються до значень, рівних відповідним критеріям у системах із симетричним двигуном.

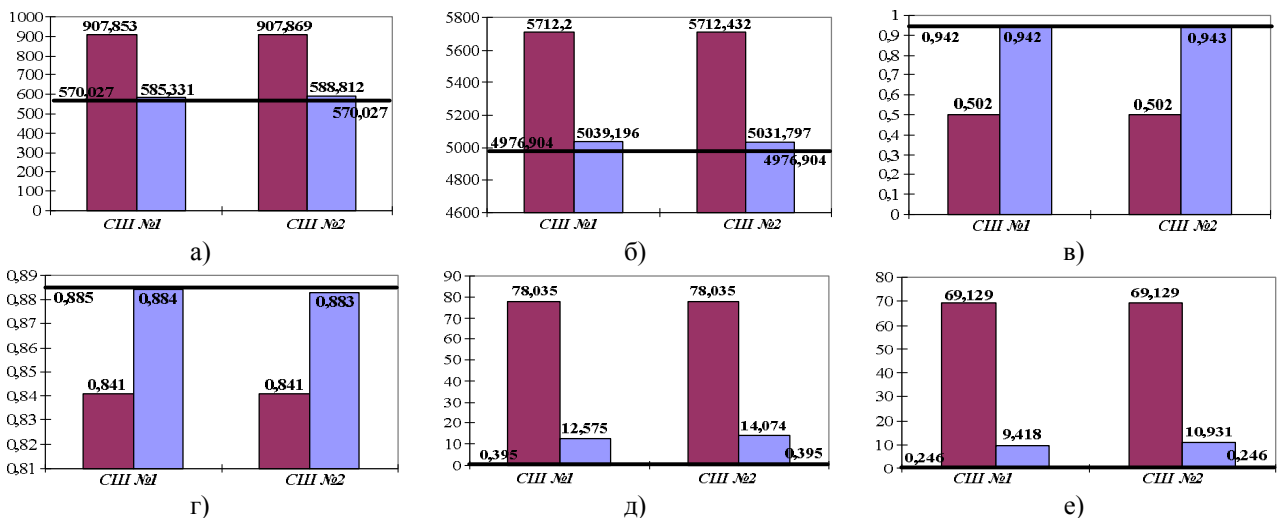


Рисунок 7 – Порівняння енергетичних характеристик систем електроприводу: а) сумарні втрати, Вт; б) споживана потужність, Вт; в) коефіцієнт корисної дії, в.о.; г) коефіцієнт потужності, в.о.; д) змінна складова електромагнітного моменту, в.о.; е) змінна складова потужності, в.о.

ВИСНОВКИ. 1. Використання в бездатчикових СВК непрямих методів визначення потокозчеплення та кутової частоти обертання ротора з двигунами, що мають несиметричні обмотки статора, призводить до суттєвого погіршення енергетичних та динамічних режимів роботи даних систем чи взагалі до втрати працездатності системи електропривода.

2. Розроблено систему бездатчикового векторного керування асинхронними двигунами, в якій регулювання активного та реактивного каналів передачі енергії виконується за трьома фазами двигуна окремо, що дає можливість проводити корекцію режимів роботи електроприводів шляхом зміни сигналів завдання в кожній фазі статора окремо.

3. Розроблена система векторного керування, на відміну від ортогональних систем, не втрачає працездатності навіть при значних відсотках несиметрії обмоток АД.

4. Доведено, що ефективна корекція та поліпшення енергетичних режимів роботи асинхронних двигунів з несиметричними обмотками досягається шляхом зменшення потокозчеплення в несиметричній фазі двигуна на величину, що дорівнює несиметрії активних опорів за фазами, наданої у відносних одиницях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев // *Электротехника*. – 2003. – № 7. – С. 7–17.

2. Recent developments of induction motor drives fault diagnoses using AI techniques / Filipetti Fiorenzo, Giovanni Franciscini, Carla Tassoni // *IEEE Transactions in Industrial electronics*. – USA, 2000. – Iss. 47. – PP. 994–1004.

3. Torque the three-phase asynchronous machine with asymmetry of the phase stator windings / N.G. Nikian, A.S. Padeev, A.B. Omon // *Electricity*. – 2008. – № 2. – PP. 49–54. [in Russian]

4. Mathematical modeling of electrical machines: A textbook for university students / G.A. Sypaylov, A.V. Loos – M.: Vysshaya shkola, 1980. – 176 p. [in Russian]

5. Regeneration-Mode Low-Speed Operation of Sensorless Induction Motor Drive With Adaptive Observer / H. Kubota, K. Matsuse // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2002. – Iss. 38. – №. 4. – PP. 1081–1086.

6. Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder / T. Ohtani, N. Takada, K. Tanaka // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1992. – Iss. 28. – № 1. – PP. 157–165.

7. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. – Oxford: Oxford University Press. – 1998.

8. Мельников В.О., Калинов А.П., Огарь В.О. Дослідження показників якості перетворення енергії в електроприводі з векторним керуванням // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 28. – С. 230–235.

9. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

10. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

11. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

12. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

13. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

14. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

15. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

16. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

17. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

18. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

19. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

20. Мельников В.О., Калинов А.П. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 85–86. – ISSN 1607–7970.

THE ESTIMATION AND ADJUSTMENT OF ENERGETIC OPERATIONAL CONDITIONS OF SENSORLESS VECTOR-CONTROL SYSTEM WORKING UNDER INDUCTION MOTOR STATOR WINDING UNSYMMETRY

V. Melnykov

Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

The estimation of stator windings unsymmetry influence on energetic and dynamic behavior of sensorless vector-control system was done. The three-phase vector-control system was created. This system allow us to compensate induction motor unsymmetry by means of correction the flux linkage control value.

Key words: stator winding unsymmetry, energy behavior, control system.

REFERENCES

1. An adaptive vector control system of an asynchronous electric drive / A.B. Vinogradov, V.L. Chistoserdiv, A.N. Sibirchev // *Electotekhnika*. – 2003. – № 7. – PP. 7–17. [in Russian]

2. Recent developments of induction motor drives fault diagnoses using AI techniques / Filipetti Fiorenzo, Giovanni Franciscini, Carla Tassoni // *IEEE Transactions in Industrial electronics*. – USA, 2000. – Iss. 47. – PP. 994–1004.

3. Torque the three-phase asynchronous machine with asymmetry of the phase stator windings / N.G. Nikian, A.S. Padeev, A.B. Omon // *Electricity*. – 2008. – № 2. – PP. 49–54. [in Russian]

4. Mathematical modeling of electrical machines: A textbook for university students / G.A. Sypaylov, A.V. Loos – M.: Vysshaya shkola, 1980. – 176 p. [in Russian]

5. Regeneration-Mode Low-Speed Operation of Sensorless Induction Motor Drive With Adaptive Observer / H. Kubota, K. Matsuse // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2002. – Iss. 38. – №. 4. – PP. 1081–1086.

6. Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder / T. Ohtani, N. Takada, K. Tanaka // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1992. – Iss. 28. – № 1. – PP. 157–165.

7. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. – Oxford: Oxford University Press. – 1998.

8. Melnykov V.O., Kalinov A.P., Ogar V.O. The research of energy conversion quality indicators of vector-controlled electric drive // *Visnyk NTU «KhPI»*. Problems of automated electric. Theory and Practice. – Harkiv: NTU «KhPI», 2010. – № 28. – С. 230–235. [in Ukrainian]

9. Melnykov V., Kalinov A. The increasing of energy characteristics of vector-controlled electric drives by means of compensation the induction motor parametrical asymmetry // *Technical electrodynamic*. 2012. – № 3. – PP. 85–86. – ISSN 1607–7970. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 13.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.