

УДК 621.311

О.О. Ручка, О.О. Ніколаєв

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ВЕКТОРНЕ УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

*В статті розглянуті варіанти частотно-струмового векторного управління.*

**Ключові слова:** електропривод, асинхронний двигун, векторне управління, потокозчеплення, складовий струму.

### Вступ

Векторне управління частотно-регульованого асинхронного електроприводу пов'язане як із зміною частоти і поточних значень змінних АД, так і з взаємною орієнтацією їх векторів в полярній або декартовій системах координат. Регулюванням амплітудних значень змінних і кутів між їх векторами реалізується повне управління АД як в статичі, так і в динаміці, забезпечуючи тим самим помітне поліпшення якості перехідних процесів в порівнянні з скалярним управлінням.

Інформація про поточні значення і просторове положення векторів змінних АД може бути отримана як прямим їх вимірюванням за допомогою відповідних датчиків, так і побічно на основі математичної моделі АД. Конфігурація і складність такої моделі визначаються технічними вимогами до електроприводу. У загальному випадку подібні системи з непрямим регулюванням координат електроприводу із-за нестабільності параметрів АД і складному їх взаємозв'язку поступаються за своїми статичними і динамічними показниками системам з прямим векторним управлінням. При складності обчислювальних операцій і алгоритмів управління електроприводом гідність систем з непрямим регулюванням в простоті технічних рішень і, відповідно, в практичній надійності.

### Основний розділ

При векторному управлінні АД може житись як від джерела напруги, так і джерела струму. Варіант частотно-струмового векторного управління є найбільш поширеним, оскільки при регулюванні струму незалежно від частоти живлення АД забезпечується регулювання і його моменту. Це не тільки спрощує схему управління, але і одночасно обмежує перегрів двигуна.

При цьому напруги на обмотках статора АД створюються автоматично залежно від його режиму роботи.

Формування моменту АД можливо дією на абсолютних значення векторів потокозчеплення  $\bar{\Psi}_1$ ,  $\bar{\Psi}_\mu$ ,  $\bar{\Psi}_2$ , струмів  $\bar{I}_1$ ,  $\bar{I}_2$ .

Аналіз рис. 1, а дозволяє інтерпретувати АД як еквівалентну машину постійного струму. Якщо ротор АД зіставити якорю двигуна постійного струму (ДПС), а статори обмотки – обмоткам збудження ДПС, то складова струму статора  $I_{1x}$ , синфазна потокозчеплення  $\bar{\Psi}_\mu$  інтерпретується як струм збудження ДПС, складова  $I_{1y}$  – як струм його компенсаційної обмотки, складова  $I_{2y}$  – як поперечна складова поля якоря ДПС, складова  $I_{2x}$  – як розмагнічуюча подовжня реакція якоря.

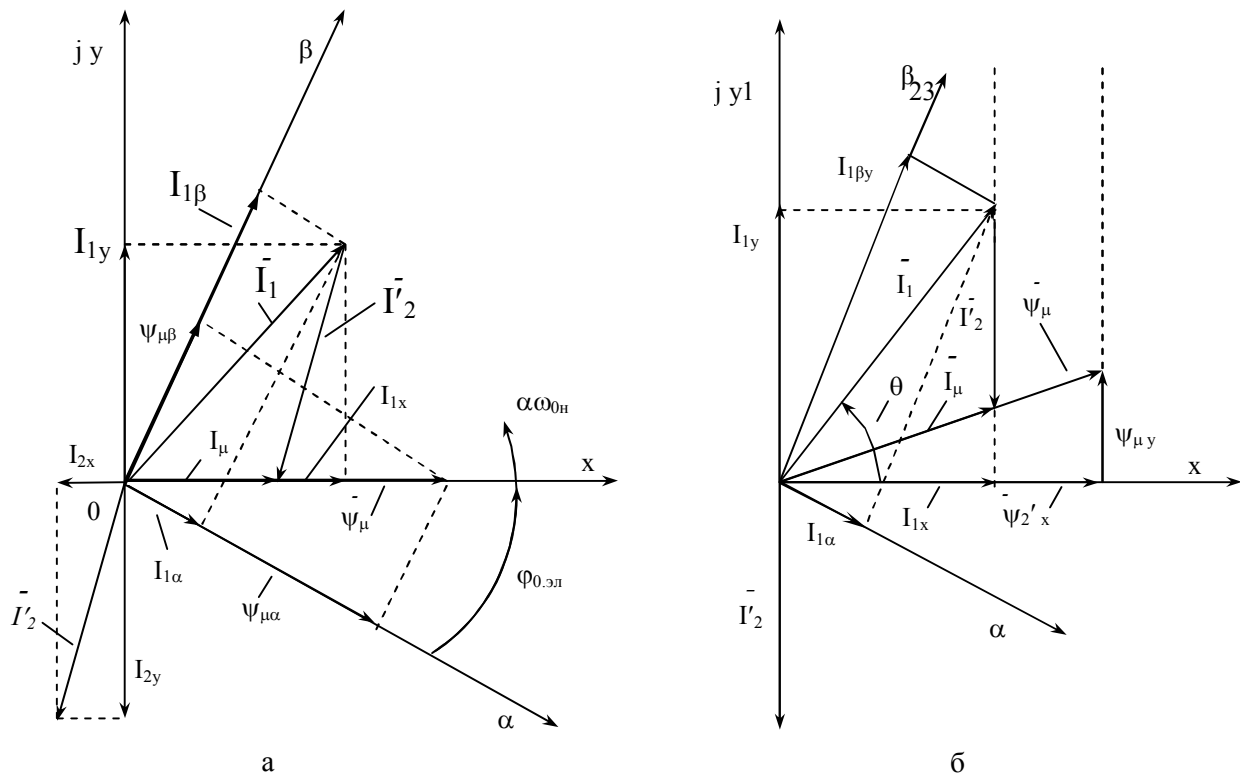


Рис. 1. Векторні діаграми змінних АД при орієнтації системи координат x, y: по основному потокозчепленню – а; по потокозчепленню ротора – б

З рис. 1, а видно, що потокозчеплення  $\bar{\Psi}_\mu$  визначається струмом  $\bar{I}_\mu = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$ . Отже, в системі координат x, y, пов'язаною з вектором потокозчеплення  $\bar{\Psi}_\mu$  складові I1y і I2y рівні і мають різні знаки, а протилежно направлені складові I1x і I2x визначають модуль потокозчеплення  $|\bar{\Psi}_\mu| = L_{12}(I_{1x} + I_{2x})$ .

З приведеної інтерпретації видно відмітні особливості АД від ДПС. На статорі АД немає окремо еквівалентної обмотки збудження і компенсації поперечної реакції якоря (ці обмотки як би суміщені), а вісь x, пов'язана з потокозчепленням  $\bar{\Psi}_\mu$  обертається щодо статора із швидкістю  $\omega_{0н}$

Особливості формування моменту, визначають основні положення при технічній реалізації системи векторного управління АД. Так вектор  $\bar{\Psi}_\mu$  може бути визначений по його складових  $\Psi_{\mu\alpha}$  і  $\Psi_{\mu\beta}$  на осі  $\alpha$  і  $\beta$  (рис. 1, а), як  $\bar{\Psi}_\mu = \bar{\Psi}_{\mu\alpha} + \bar{\Psi}_{\mu\beta}$ . Безпосереднє вимірювання кожною з складових може бути визначено за допомогою датчиків Холу, встановлених в повітряному зазорі між статором і ротором АД. При цьому модуль потокозчеплення, а кут між осями  $\alpha$ ,

$$|\Psi_\mu| = \sqrt{\Psi_{\mu\alpha}^2 + \Psi_{\mu\beta}^2} \quad (1)$$

$\beta$  нерухомої системи координат і осями x, y системи координат, що обертається із швидкістю  $\phi_{0,ел}$ , знаходиться за формулою

$$\phi_{0,ел} = \arccos(\Psi_{\mu\alpha} / \Psi_\mu).$$

Складові вектора  $\bar{I}_1$  у системі координат  $\alpha, \beta$  за умови інваріантності потужності АД в двофазній і трифазній системах координат можуть бути визначені через струми фаз статора  $I_A, I_B, I_C$  як:

$$I_{1\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_{1A}; \quad I_{1\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{1B} - I_{1C}). \quad (2)$$

У систему координат x, y проєкції векторів струму  $I_{1\alpha}$  і  $I_{1\beta}$  перераховуються як

$$\begin{aligned} I_{1x} &= I_{1\alpha} \cos \phi_{0,ел} + I_{1\beta} \sin \phi_{0,ел}; \\ I_{1y} &= -I_{1\alpha} \sin \phi_{0,ел} + I_{1\beta} \cos \phi_{0,ел}. \end{aligned} \quad (3)$$

Вони представлені сигналами постійного струму і не залежать від частоти живлення АД. Враховуючи це, система векторного управління може будуватися аналогічно системам управління двигунами постійного струму, де складова  $I_{1x}$  струму статора визначає потокозчеплення  $\Psi_\mu$  АД (магнітний потік ДПС), а складова  $I_{1y}$  є миттєвою складовою струму статора (подібна до струму якоря ДПС). Таким чином, система векторного управління з опорним вектором потокозчеплення  $\Psi_\mu$  повинна мати канали управління модулем  $\Psi_\mu$  і кутовою швидкістю ротора АД.

По аналогії з ДПС в каналі управління швидкістю слід мати внутрішній контур управління складовою струму статора  $I_{1y}$ , еквівалентною струму якоря ДПС, і зовнішній контур управління кутовою швидкістю ротора. Канал управління модулем потокозчеп-

лення  $\psi_\mu$  повинен містити контур управління складовою струму статора  $I_{1x}$ , еквівалентною струму збудження ДПС. Хоча по своїй функції цей канал і подібний до каналу управління магнітним потоком ДПС, він складніший, оскільки взаємозв'язок модуля  $\psi_\mu$ , складових струму і напруги статора по осі  $x$  характеризується диференціальними рівняннями другого порядку. На цей канал надає вплив і складова струму статора  $I_{1y}$  у вигляді трансформаторних ЕРС, пропорційних розсіянню полів статора і ротора.

Важливою особливістю системи управління з опорним вектором потокозчеплення  $\psi_\mu$  є можливість його прямого вимірювання за допомогою датчиків, встановлених в повітряному зазорі АД.

Подібні системи мають вищі показники якості управління в порівнянні з системами, де використовується непрямий (розрахунковий) шлях визначення сигналів зворотних зв'язків.

У руховому режимі вектор струму статора  $\bar{I}_1$  випереджає вектор  $\bar{\Psi}_2$  на кут  $\theta = \arctg(L_2\omega_{0n}S_a/R_2)$ , його складова  $I_{1x} = \Psi_2/L_{12}$  визначає потокозчеплення ротора  $\Psi_2$ , а  $I_{1y} = \Psi_2 L_2 \omega_{0n} S_a / L_{12} R_2$  компенсує вплив на нього реакції ротора. Електромагнітний момент АД визначається взаємодією ортогональних складових потокозчеплення ротора  $\Psi_2 = \Psi_{2x} = L_{12} I_{1x}$  і струму статора  $I_{1y}$ . Таким чином, при стабілізації  $\Psi_2$ , як і при стабілізації  $\psi_\mu$ , система векторного управління буде подібна до систем управління двигунами постійного струму, де складова  $I_{1x}$  струму статора визначає потокозчеплення  $\Psi_2$  АД (магнітний потік ДПС), а складова  $I_{1y}$  є миттєвою складовою струму статора (аналогічно струму якоря ДПС).

Векторні діаграми на рис. 1 дозволяють дати фізичну інтерпретацію принципу побудови систем векторного управління АД по аналогії з управлінням машиною постійного струму.

Так в системах управління з орієнтацією вектора потокозчеплення  $\Psi_2$  по осі  $x$  за відсутності завдання швидкості АД і статичного навантаження на його валу ( $M_c = 0$ ) система повинна забезпечувати завдання початкового потокозчеплення лише складовою струму статора  $I_{1x}$ . При цьому вектор струму статора  $\bar{I}_1$  рівний по модулю струму  $I_{1x}$  співпадатиме по напрямку з вектором  $\bar{\Psi}_2$  рівним по модулю потокозчепленню  $\Psi_{2x}$ . Якщо подібного збігу не відбудеться, то появу складової  $I_{1y} \neq 0$  викличе формування електромагнітного моменту  $M \neq 0$  і при  $M_c = 0$  початок руху валу ротора АД. Тоді за рахунок зворотного зв'язку за (або по ЕРС) швидкістю двигуна система повинна забезпечити фазовий поворот вектора до його збігу з вектором  $\bar{\Psi}_2$ , при якому електромагнітний момент стане рівним нулю і відбудеться зупинка двигуна. При нерухомому роторі ( $f_1 = 0$ ,  $\alpha \omega_{0n} = 0$ ) і відсутності ста-

тичного навантаження вектор  $\bar{\Psi}_2$  буде нерухомим в просторі, а струм  $I_1$  постійним в часі. Система координат  $x, y$  також буде нерухома. Подібний стан АД аналогічно умові подачі постійного струму в обмотку збудження ДПС без підключення його якірного кола до джерела напруги.

Під час вступу сигналу завдання швидкості АД система управління спочатку забезпечує поворот вектора  $\bar{I}_1$  відносно  $\bar{\Psi}_2$  і, у результаті, формування електромагнітного моменту  $M \neq 0$  і знов при  $M_c = 0$  початок руху валу ротора АД. Цей рух відбуватиметься до тих пір, поки реальна швидкість АД не порівняється із заданим значенням. При їх рівності вектор  $\bar{I}_1$  знов встановлюється по напрямку вектора  $\bar{\Psi}_2$ , а електромагнітний момент рівним нулю. Проте на відміну від попереднього режиму струм статора стає вже змінним в часі, а вектор  $\bar{\Psi}_2$  обертається в просторі з швидкістю, пропорційній частоті струму. З тією ж швидкістю обертається і система координат  $x, y$ . Тому складові  $I_{1x}$  і  $\Psi_{2x}$  залишаються на колишньому рівні. АД працює в режимі ідеального холостого ходу з швидкістю, також пов'язаною із заданою частотою струму статора. Подібний стан АД аналогічно режиму ідеального холостого ходу ДПС, коли при постійному його збудженні і  $M_c = 0$  якірне коло ДПС підключене до регульованого джерела постійної напруги.

При збільшенні навантаження на валу АД система управління повинна забезпечувати поворот вектора  $\bar{I}_1$  щодо вектора  $\bar{\Psi}_2$  так, щоб, по-перше, складова  $I_{1x}$  залишалася незмінною, зберігаючи постійність потокозчеплення  $\Psi_{2x}$  а, по-друге, складова  $I_{1y}$  повинна збільшуватися до значення, при якому електромагнітний момент стане рівним моменту сил опору на валу АД і двигун вийде в сталий режим роботи. На векторній діаграмі рис. 1, б вектор  $\bar{I}_1$  у міру збільшення навантаження ковзатиме по лінії 2, перпендикулярною вектору  $\bar{\Psi}_2$ . Результуюча складова струмів статора і ротора по осі  $y$  створює складову потокозчеплення  $\Psi_{2y}$ . При цьому кінець вектора  $\bar{\Psi}_\mu$  ковзатиме по прямій 3, також перпендикулярною вектору  $\bar{\Psi}_2$ . У результаті, при збільшенні навантаження двигуна його потік намагнічення також збільшується, що необхідно брати до уваги при реалізації системи управління приводом із стабілізацією потокозчеплення ротора.

Особливістю систем управління з опорним вектором потокозчеплення  $\Psi_2$  є простіша, ніж з опорним вектором  $\psi_\mu$ , структура управління. Відповідно до діаграми рис. 1, б вона повинна мати два канали управління: потокозчеплення  $\Psi_2$  і швидкістю двигуна. Канал управління  $\Psi_2$  реалізується двоконтурним:

з внутрішнім контуром управління складовою  $I_{1x}$  струму статора та із зовнішнім – по модулю потокозчеплення ротора. Двоконтурним може бути і канал управління швидкістю АД, що включає внутрішній контур управління складовою  $I_{1y}$  струму статора і зовнішній – по кутовій швидкості ротора.

Недолік систем з опорним вектором потокозчеплення ротора в тому, що його визначення можливе лише розрахунковим шляхом на основі параметрів АД, як правило, відомих не точно і що змінюються при його роботі

### ВИСНОВОК

При стабілізації потокозчеплення ротора (при  $\Psi_2 = \text{const}$ ) механічні характеристики АД подібні до характеристик ДПС незалежного збудження. Оскільки теорія і технічні вирішення замкнених систем управління електроприводом з ДПС незалежного

збудження достатньо апробовані, то зрозуміла привабливість застосування систем векторного управління з управлінням по потоку ротора.

### Список літератури

1. Хамудханов М.З. Частотное управление асинхронным электроприводом при помощи автономного инвертора / М.З. Хамудханов. – Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1959.
2. Горбань / Р.Н. Современный частотно-регулируемый электропривод / Р.Н. Горбань, А.Т. Янукович; под ред. А.В. Гаврилова. – С-Петербург, СПЭК, 2001.
3. Дартау В.А., Рудаков В.В., Столяров И.М. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.А. Дартау, В.В. Рудаков, И.М. Столяров. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.

Надійшла до редколегії 22.08.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А.Е. Ручка, А.А. Николаев

*В статье рассмотрены варианты частотно-токового векторного управления.*

**Ключевые слова:** электропривод, асинхронный двигатель, векторное управление, потокозчепление, составляющий тока.

### VECTORIAL MANAGEMENT OF FREQUENCY MANAGED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

O.O. Ruchka, O.O. Nikolaev

*The variants of frequency-current vectorial management are considered in the article.*

**Keywords:** electric drive, asynchronous engine, vectorial management, flux linkage, making current.