

### ВЫБОР СИСТЕМЫ ПОЛЕОРИЕНТИРОВАНИЯ ПРИ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

С.М.Пересада, докт.техн.наук, С.Н.Ковбаса, канд.техн.наук, А.Ю.Онанко  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: [skovbasa@ukr.net](mailto:skovbasa@ukr.net)

*Разработаны критерии оценивания и представлены результаты теоретического анализа свойств алгоритмов косвенного векторного управления асинхронными двигателями, синтезированных с использованием концепций полеориентирования по вектору потокосцепления статора и ротора. Экспериментально показано, что системы с ориентированием по вектору потокосцепления статора имеют более высокие свойства робастности к параметрическим возмущениям по сравнению со стандартными решениями при ориентации по вектору потокосцепления ротора. Библ. 4, рис. 3.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, косвенное векторное управление, полеориентирование.

**Введение.** Концепция полеориентирования является основой построения систем векторного управления асинхронными двигателями (АД) с короткозамкнутым ротором [1] как прямого, так и косвенного. При этом в большинстве алгоритмов используется ориентированная по вектору потокосцепления ротора система координат, хотя полеориентирование может осуществляться и по другим векторам потокосцепления АД: статора и основного магнитного потока.

Поскольку АД как объект управления является многомерным и нелинейным, то результаты, полученные в 1990-х [2, 3] с использованием упрощенных подходов, не дают определенного ответа о целесообразности применения каждой из систем полеориентирования. В этой связи целью настоящего исследования является разработка критериев оценки, а также анализ свойств алгоритмов векторного управления при ориентации по разным опорным векторам АД.

**Свойства полеориентированных систем координат. Критерии оценки.** Использование в качестве опорного вектора основного магнитного потока, проходящего через воздушный зазор, имеет смысл, если его измерение осуществляется с помощью датчиков в зазоре АД, поэтому здесь не рассматривается.

Основным преимуществом полеориентирования по вектору потокосцепления ротора является простота развязки процессов управления моментом и потоком при измерении токов статора и угловой скорости ротора (в бездатчиковых системах без измерения угловой скорости). При этом в полеориентированной системе координат полевая компонента регулирует поток АД, в то время как момент при постоянном потоке прямо пропорционален моментной компоненте тока статора. Это свойство достигается как при декомпозиции исходной модели АД на две связанные электромеханическую–электромагнитную, так и механическую–электрическую подсистемы. Первая декомпозиция является классической в векторном управлении и достигается за счет полеориентированного преобразования координат. Вторая является следствием строгой пассивности электрической подсистемы АД.

Полеориентирование с ориентацией по вектору потокосцепления статора является более сложным, поскольку динамическое поведение модуля вектора потокосцепления статора зависит как от полевой, так и от моментной компонент вектора тока статора. Впервые задача асимптотической отработки момента и модуля вектора потокосцепления статора решена в [4]. Показано, что при косвенном векторном управлении полеориентирование возможно только при декомпозиции механическая–электрическая подсистемы. В [4] для этой декомпозиции также дано общетеоретическое решение для случая ориентации по вектору потокосцепления ротора.

Для сравнения эффективности алгоритмов векторного управления при ориентации по векторам потокосцепления ротора и статора приняты следующие критерии: достигаемые динамические показатели, вырожденность алгоритма; робастность к параметрическим возмущениям; соотношение момент-ток; характеристики активных потерь; достигаемый максимальный момент при ограничении напряжения, в том числе при ослаблении поля; влияние насыщения магнитной системы АД. Важными также являются сложность практической реализации и настройки системы.

**Алгоритмы косвенного векторного управления моментом и потоком [4].** Структура алгоритмов управления моментом–потоком с асимптотической ориентацией по вектору потокосцепления ротора или статора схожа и включает двумерный регулятор токов, реализованный в синхронной системе координат, и нелинейный регулятор потока, который обеспечивает отработку модуля вектора потокосцепления (статора или ротора) и асимптотическое полеориентирование. Заданное значение моментной компоненты тока статора  $i_{1q}^*$  рассчитывается из заданной траектории момента АД  $M^*$ .

Регуляторы вектора потокосцепления имеют вид

$$i_{id}^* = (\alpha \psi_2^* + \dot{\psi}_2^*) / \alpha L_m, \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega + \omega_2; \omega_2 = \alpha L_m (i_{iq}^* / \psi_2^*) + v_q / \psi_2^* \quad - \quad (2)$$

при ориентации по вектору поткосцепления ротора и

$$i_{id}^* = -\alpha (L_m \beta + 1) i_{id}^* + \omega_2 i_{iq}^* + \alpha z^* + \dot{z}^* + \xi_d, \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega + \omega_2; \omega_2 = [\alpha (L_m \beta + 1) i_{id}^* + i_{iq}^* + \xi_q] / (z^* - i_{id}^*) \quad - \quad (4)$$

при ориентации по вектору потокосцепления статора.

В (1), (2) и (3), (4) обозначено:  $i_{id}^*$ ,  $\varepsilon_0$  – заданные значения полевой компоненты тока статора и углового положения синхронной системы координат;  $\psi_2^* > 0$ ,  $z^* = \sigma^{-1} \psi_1^* > 0$  – заданные значения для модулей вектора потокосцепления ротора и статора;  $v_q$ ,  $\xi_d$ ,  $\xi_q$  – дополнительные корректирующие сигналы;  $(\alpha, L_m, \beta, \sigma)$  – положительные константы модели АД [4].

Уравнения динамики ошибок отработки для алгоритмов регуляторов (1), (2) и (3), (4) в случае точно известных параметров одинаковы, если их преобразовать к одинаковым переменным. Следовательно, при отсутствии параметрических возмущений достигаемые динамические показатели одинаковы. Вместе с тем уравнения регулятора (1), (2) при полеориентировании по вектору потокосцепления ротора проще в сравнении с (3), (4) и не содержат вырожденности при  $\psi_2^* > 0$ , в то время как алгоритм при статорном полеориентировании (3), (4) вырожден при  $z^* = i_{id}^*$ .

Важным свойством алгоритмов регуляторов (1), (2) и (3), (4), которое целенаправленно достигнуто при проектировании, является наличие корректирующих сигналов  $v_q$  и  $(\xi_d, \xi_q)$ , которые могут быть сформированы для коррекции динамики системы и улучшения ее свойств робастности при действии параметрических возмущений. Структура регулятора (3), (4) при статорном полеориентировании позволяет впервые сформировать полный двумерный вектор корректирующих обратных связей, в то время как регулятор (1), (2) имеет лишь один корректирующий сигнал  $v_q$ . Наличие полного вектора корректирующих связей потенциально дает возможность получения новых свойств системы полеориентирования как с позиций ее робастности, так и адаптации к параметрическим возмущениям.

**Результаты экспериментального тестирования.** Полномасштабные экспериментальные исследования выполнены на экспериментальной установке, которая включает в себя: асинхронный двигатель мощностью 0.75 кВт (номинальный момент 2.5 Нм); силовой преобразователь с автономным инвертором напряжения; управляющий контроллер на основе цифрового сигнального процессора TMS320F28335; фотоимпульсный датчик скорости с разрешающей способностью 1000 имп./об; персональный компьютер для программирования и визуализации переходных процессов.

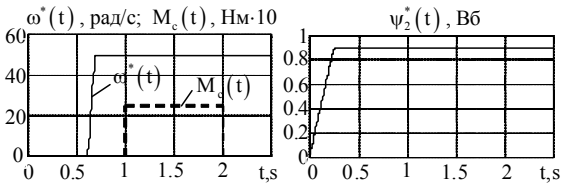
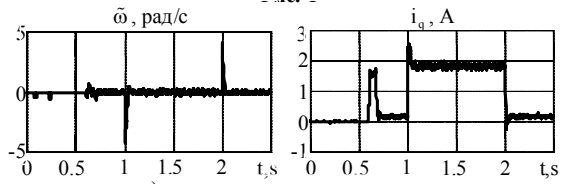
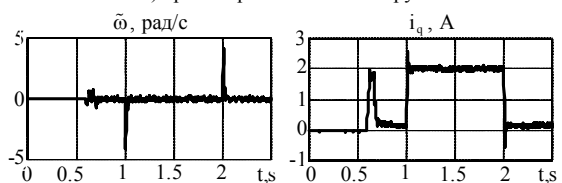


Рис. 1



а) ориентирование по статору



б) ориентирование по ротору

Рис. 2

на рис. 2 показаны графики переходных процессов ошибки отработки угловой скорости, определенной как  $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ , где  $\omega$  – угловая скорость ротора, и моментной составляющей вектора тока статора  $i_q$ .

На рис. 3 показаны динамические процессы в робастифицированных с помощью корректирующих обратных связей системах векторного управления соответственно при статорном и роторном полеориентировании.

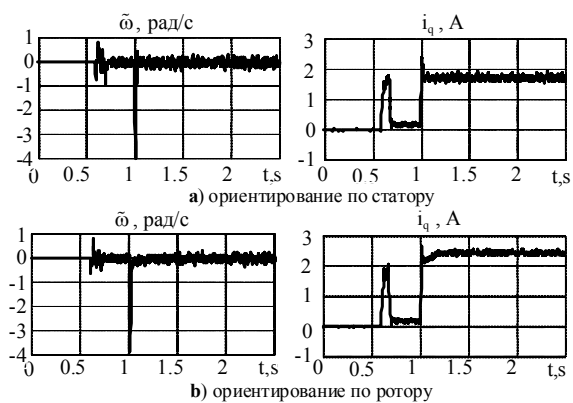


Рис. 3

тока статора по сравнению со случаем, когда параметры известны. Это, в свою очередь, свидетельствует о робастной стабилизации модуля вектора потокозцепления на заданном уровне и поэтому более высокой энергетической эффективности процесса электрохимического преобразования энергии. Показатели качества регулирования угловой скорости в условиях эксперимента сохраняются на номинальном уровне для обоих алгоритмов.

**Вывод.** Как следует из анализа литературных источников, положительные свойства ориентированных по статору систем в полной мере не исследованы. В данной работе обоснованы положительные структурные свойства статорно-ориентированных алгоритмов векторного управления, а также экспериментально подтверждены их повышенные свойства робастности к вариациям активного сопротивления роторной цепи. Результаты исследования обуславливают актуальность разработки и исследования новых алгоритмов векторного управления АД со статорным полеориентированием.

УДК 681.5:62-83

#### ВИБІР СИСТЕМИ ПОЛЕОРІЄНТУВАННЯ ПРИ ВЕКТОРНОМУ КЕРУВАННІ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

С.М.Пересада, докт.техн.наук, С.М.Ковбаса, канд.техн.наук, А.Ю.Онанко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: [skovbasa@ukr.net](mailto:skovbasa@ukr.net)

*Розроблено критерії оцінювання та представлено результати теоретичного аналізу властивостей алгоритмів непрямого векторного керування асинхронними двигунами, синтезованих з використанням концепцій полеорієнтування за вектором потокозчеплення статора і ротора. Експериментально показано, що системи з орієнтуванням за вектором потокозчеплення статора мають більш високі властивості робастності до параметричних збурень у порівнянні зі стандартними системами при орієнтації за вектором потокозчеплення ротора. Бібл. 4, рис. 3.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, непряме векторне керування, полеорієнтування.

#### SELECTION OF FIELD ORIENTATION IN VECTOR CONTROLLED INDUCTION MOTOR DRIVES

S.M.Peresada, S.M.Kovbasa, A.Yu.Onanko

National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”,

pr. Peremohy, 37, Kiev, 03056, Ukraine.

E-mail: [skovbasa@ukr.net](mailto:skovbasa@ukr.net)

*Vector control algorithms that based on stator and rotor flux orientation are considered. Criteria for assessing of algorithms properties are developed. The results of theoretical analysis of indirect field oriented algorithms for induction motors are presented. Experimentally substantiated robust properties of stator field oriented systems with respect to rotor resistance variations. References 4, figures 3.*

**Key words:** induction motor, indirect field oriented control, field orientation.

1. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. – Oxford University Press, USA, 1996. – 456 p.
2. De Doncker R.W., Profumo F., Pastorelli M., Ferraris P. Comparison of Universal Field Oriented (UFO) Controllers in Different Reference Frames // IEEE Trans. On Power Electronics, – 1995. – Vol. 10. – No. 2. – Pp. 205–213.
3. De Doncker R.W. Parameter sensitivity of indirect universal field oriented controllers // Conf. Rec. PESC '91, Boston, MA. – 1991. – Pp. 605–612.
4. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. New passivity based speed-flux tracking controllers for induction motor // Industrial Electronics Society, 26th Annual Conf. of the IEEE, IECON'2000. – 2000. – Pp. 1099–1104.

Надійшла 17.02.2014