

# К ВОПРОСУ О РОБАСТНОСТИ АЛГОРИТМОВ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ К ВАРИАЦИЯМ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРА: ЧАСТЬ 1 – УЛУЧШЕННОЕ КОСВЕННОЕ И ПРЯМОЕ ПОЛЕОРИЕНТИРОВАНИЕ

Пересада С.М., проф., д.т.н.; Луцив-Шумский А.Ю., магистрант; Белецкий О.А., магистрант  
кафедра автоматизации электромеханических систем и электропривода

**Введение.** Эффективность алгоритмов векторного управления асинхронными двигателями (АД) в значительной мере зависит от их чувствительности к наиболее критичному параметру – активному сопротивлению роторной цепи (см. [1], [2], [3], а также список литературы в них). Вариации активного сопротивления ротора приводят к нарушению условий полеориентирования, что в свою очередь ведет к потере асимптотичности регулирования модуля вектора потокосцепления и момента, а также снижению энергетической эффективности процесса электромеханического преобразования энергии.

В [4], [5] ([6]) представлены улучшенные косвенное (прямое) векторные управления АД (I-IFOC – Improved Indirect Field Oriented Control, I-DFOC – Improved Direct Field Oriented Control), которые по сравнению со стандартными косвенным (IFOC) и прямым (DFOC) векторными управлениями [7] имеют повышенные показатели грубости (робастности) по отношению к вариациям параметров роторной цепи. В [8] дано теоретическое и экспериментальное сравнение IFOC и I-IFOC.

Общетеоретическое решение задачи векторного управления АД с наблюдателем полного порядка (FO-DFOC – Full Order DFOC) представлено в [9]. Структура обратных связей наблюдателя и алгоритма управления, который на нем базируется, предоставляет возможность не только достичь глобальной стабилизации системы, спецификации показателей качества управления координатами, но и робастифицировать наблюдатель потокосцепления полного порядка в отношении параметрических возмущений.

Анализ доступных литературных источников свидетельствует о том, что методика исследования свойств робастности алгоритмов I-IFOC, I-DFOC, FO-DFOC в сравнении со стандартными IFOC и DFOC разработана на уровне недостаточном для выработки практических рекомендаций по их использованию.

В настоящем исследовании, состоящем из двух частей, представлены первые результаты полномасштабных исследований свойств грубости рассматриваемого семейства алгоритмов векторного управления АД.

**Методические аспекты исследования робастности.** Семейство алгоритмов улучшенного векторного управления (I-IFOC, I-DFOC, FO-DFOC) синтезировано так, что гарантирует замкнутой системе свойство глобальной экспоненциальной устойчивости. Отметим, что стандартные IFOC и DFOC при токовом управлении АД также являются глобально экспоненциально

асимптотически устойчивыми. Благодаря этому свойству, при действии ограниченных параметрических возмущений система векторного управления остается локально устойчивой. При вариациях активного сопротивления ротора  $\Delta R_2$ ,  $R_2 = R_{2N} + \Delta R_2 > 0$  асимптотичность регулирования вектора потокосцепления ротора и момента АД нарушается. Оценка робастности регулирования потока и момента в динамике и статике проводится с использованием ошибок  $|\tilde{\psi}| = \sqrt{(\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2)}$ ,  $\tilde{M} = M - M^*$ , где  $\tilde{\psi}_d = \psi_d - \psi^*$ ,  $\tilde{\psi}_q = \psi_q$  - ошибки регулирования компонент вектора потокосцепления;  $\psi^* > 0$ ,  $M^*$  - соответствующие заданные значения.

Поведение  $|\tilde{\psi}|$  и  $\tilde{M}$  в общем случае зависит от знака и значений возмущения  $\Delta R_2$ , момента АД и его угловой скорости. Исследование выполнено для асинхронного серводвигателя мощностью 600 Вт со следующими номинальными параметрами: угловая скорость 100 рад/с (33 Гц), потокосцепление ротора  $\psi = 0,94$  Вб, активные сопротивления статора и ротора  $R_1 = 6,6$  Ом и  $R_2 = 5,3$  Ом, индуктивности статора, ротора и намагничивающего контура  $L_1 = 0,475$  Гн,  $L_2 = 0,47$  Гн,  $L_m = 0,45$  Гн.

**Результаты исследования робастности.** Из-за существенно нелинейного характера уравнений динамики потока и момента АД при действии параметрического возмущения  $\Delta R_2$  исследование робастности производится численными методами.

Значения ошибок регулирования потока и момента для стандартных IFOC и DFOC совпадают и являются независимыми от угловой скорости. На Рис. 1 представлены зависимости ошибок регулирования от угловой скорости при номинальном значении момента  $M^* = 6$  Нм для  $\Delta R_2 = -0,5R_{2N}$  и  $\Delta R_2 = R_{2N}$ . На графиках характеристики пронумерованы следующим образом: 1 – IFOC (DFOC), 2 – I-IFOC ( $k_{id} = 750$ ,  $\gamma_1 = 0,05$ ), 3 – I-DFOC ( $k_{id} = 750$ ,  $\gamma_1 = 0,05$ )

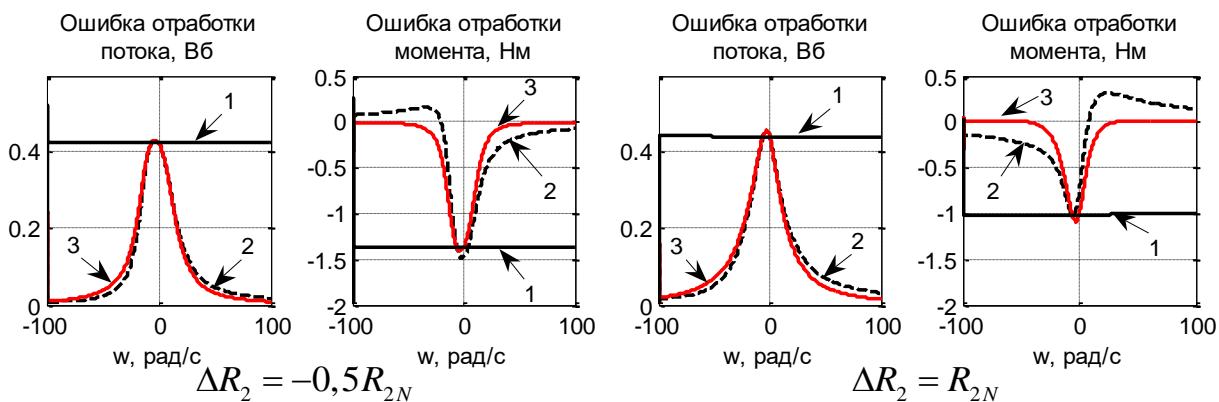


Рис. 1 - Зависимости ошибок регулирования IFOC, I-IFOC, I-DFOC при  $M^* > 0$ ,  $\gamma_1 = 0,05$ ,  $\Delta R_2 = -0,5R_{2N}$  и  $\Delta R_2 = R_{2N}$

Как следует из графиков, представленных на Рис.1, поведение ошибок отработки потокосцепления для I-IFOC и I-DFOC мало отличается, в то же время поведение ошибок отработки момента при I-DFOC несколько

предпочтительнее. Отметим также, что при изменении знака  $\Delta R_2$ , изменяется знак ошибки отработки момента, при этом максимумы (минимумы) колоколообразных характеристик смещены в область генераторного режима. При изменении знака заданного значения момента  $M^* = -6$  Нм, знак ошибки отработки момента  $\tilde{M}$ , как следует из Рис. 2, также изменяется.

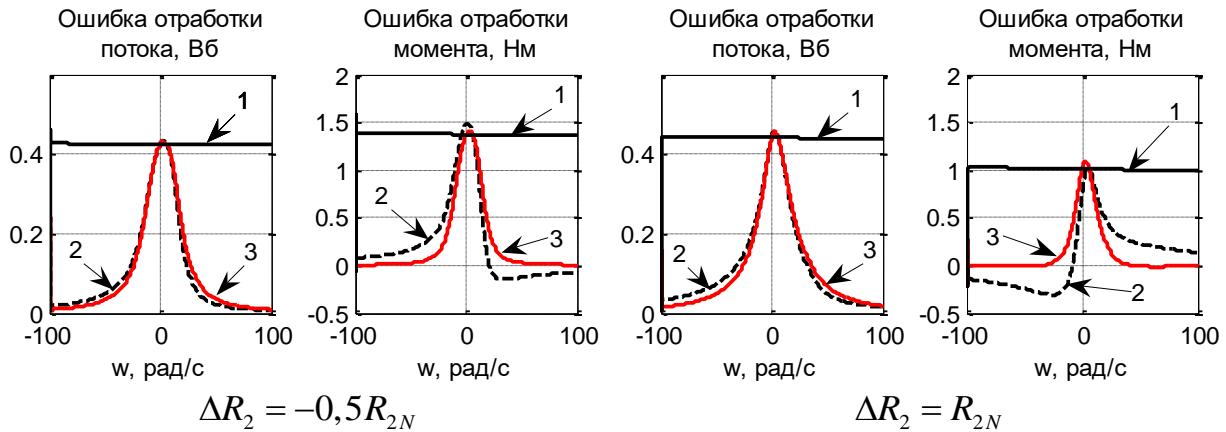


Рис. 2 - Зависимости ошибок регулирования IFOC, I-IFOC, I-DFOC при  $M^* < 0$ ,  $\gamma_1 = 0,05$ ,  $\Delta R_2 = -0,5R_{2N}$  и  $\Delta R_2 = R_{2N}$

На Рис. 3 показаны характеристики для  $M^* = 6$  Нм,  $\Delta R_2 = -0,5R_{2N}$  и  $\Delta R_2 = R_{2N}$  при увеличенном значении настроечного параметра  $\gamma_1 = 0,3$ . Все выводы относительно поведения ошибок регулирования при этом сохраняются. Ширина колоколообразных характеристик с увеличением  $\gamma_1$  уменьшается, а кривые для I-IFOC и I-DFOC приближаются друг к другу.

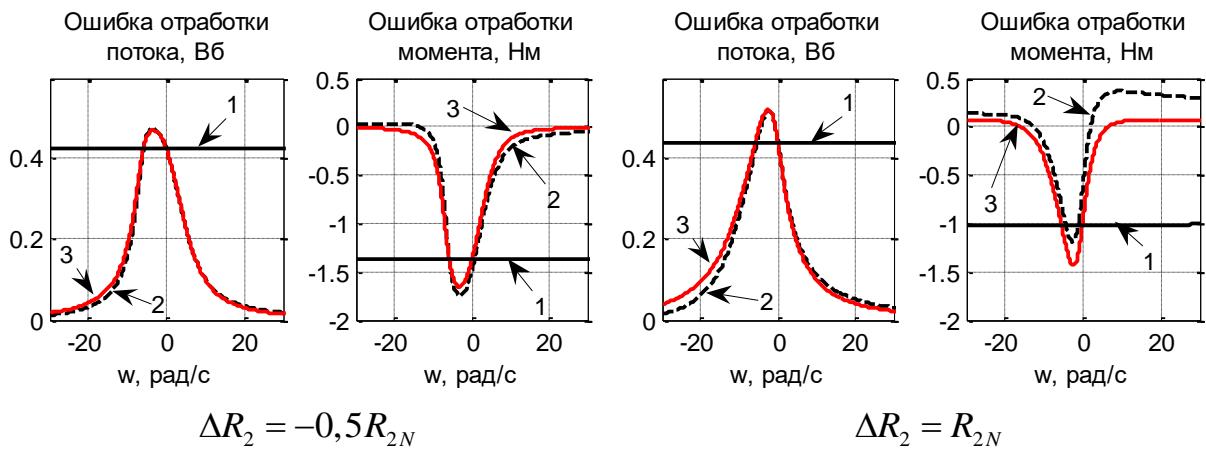


Рис. 3 - Зависимости ошибок регулирования IFOC, I-IFOC, I-DFOC при  $M^* > 0$ ,  $\gamma_1 = 0,3$ ,  $\Delta R_2 = -0,5R_{2N}$  и  $\Delta R_2 = R_{2N}$

**Выводы.** Алгоритмы улучшенного косвенного и прямого векторных управлений обеспечивают более высокие показатели грубости в отношении вариаций активного сопротивления ротора в сравнении со стандартными векторными управлениями. Данный вывод справедлив для всего диапазона

изменения скоростей за исключением интервалов вблизи нулевой скорости, где колоколообразные характеристики имеют экстремумы. При этом улучшенное прямое векторное управление с наблюдателем пониженного порядка дает несколько более предпочтительные характеристики. Повышение точности регулирования за пределами зон экстремумов может быть достигнуто за счет увеличения настроичного параметра  $\gamma_1$ , однако это требует соответствующего уменьшения такта квантования по уровню при практической реализации.

### Перечень ссылок

1. Пересада С. М. Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор // Сб. науч. тр. Донецкого государственного технического университета. –1999. –№ 4. –С. 1–23.
2. Marino R., Peresada S. and Tomei P. Global adaptive output feedback control of induction motors with uncertain rotor resistance // IEEE Trans. on Automatic Control. – May 1999. – Vol. 44, No. 6. –P. 967–983.
3. Marino R., Peresada S. and Tomei P. Output feedback control of current-fed induction motors with unknown rotor resistance // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – 1996. –Vol. 4, No. 4. –P. 336–347.
4. Peresada S., Tonielli A. and Morici R. High performance indirect field-oriented output feedback control of induction motors // Automatica. –1999. –Vol. 35. –P. 1033–1047.
5. Peresada S. and Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor // Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. –2000. –Vol. 14. –P. 177–200.
6. Пересада С. М., Ковбаса С. Н. Прямое векторное управление асинхронным двигателем со свойством глобальной экспоненциальной устойчивости // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". –2002. –Ч. 2. –С. 36–42.
7. Leonhard W. Control of Electrical Drives. (3rd edition). –Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 460p.
8. Peresada S., Tilli A. and Tonielli A. Theoretical and experimental comparison of indirect field-oriented controllers for induction motors // IEEE Trans. on Power Electronics. –2003. –Vol. 18, No. 1. –P. 151–163.
9. Пересада С. М., Ковбаса С. Н. Обобщенный алгоритм прямого векторного управления асинхронным двигателем // Техн. електродинаміка. –2002. –№ 4. –С. 17–22.