



НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

1. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будинків.
2. ГКД 340.000.001-95. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Загальні методичні положення.
3. ДБН В.2.2-3-96. Будинки і споруди. Будинки і споруди навчальних закладів.
4. ДБН В.2.2-4-96. Будинки і споруди. Будинки і споруди дитячих дошкільних закладів.
5. ДБН В.2.2-9-99. Будинки і споруди. Громадські будинки і споруди. Основні положення.
6. ДБН В.2.2-10-2001. Будинки і споруди. Заклади охорони здоров'я.
7. ДБН 79-92. Житлові будинки для індивідуальних забудовників України.
8. СНиП 2.01.01-82 Строительная климатология и геофизика (Будівельна кліматологія і геофізика).

УДК 681.5:62-83

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕКТОРНО-УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЗА СЧЕТ РОБАСТИФИКАЦИИ И АДАПТАЦИИ К ВАРИАЦИЯМ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРА

С. М. Пересада, докт. техн. наук, **С. Н. Ковбаса**, канд. техн. наук,

В. С. Бовкунович, канд. техн. наук,

Национальный технический университет Украины "КПИ".

В. А. Глушенко, канд. техн. наук,

Московский энергетический институт (технический университет).

Рассмотрены вопросы повышения эффективности векторно-управляемых асинхронных электроприводов посредством компенсации влияния вариаций активного сопротивления ротора на процессы управления координатами асинхронного двигателя за счет использования методов теории адаптивных и робастных систем. Представлены результаты анализа и экспериментального тестирования алгоритмов робастного и адаптивного векторного управления угловой скоростью асинхронного двигателя.

An improvement of vector controlled induction motor drives by means of rotor active resistance variation compensation is considered. The compensation is based on the methods of adaptive and robust systems theory. The results of robust and adaptive induction motor vector control algorithms analysis and experimental testing are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Векторно-управляемые асинхронные двигатели (АД) находят широкое применение в технологических объектах с высоким уровнем требований к статической и динамической точности регулирования механических координат. Эффективность алгоритмов векторного управления АД в значительной степени определяется точностью информации о его электрических параметрах — индуктивностях и активных сопротивлениях обмоток статора и ротора, а также индуктивности намагничивающего контура. Наиболее критическим параметром (с точки зрения влияния на показатели качества управления и энергетической эффективности) является активное сопротивление роторной цепи, которое в АД с короткозамкнутым ротором недоступно для непосредственного измерения и может изменяться в широ-

ких пределах в процессе работы машины вследствие ее нагрева.

Компенсация вариаций активного сопротивления ротора в системах векторного управления возможна с применением подходов, базирующихся на теории адаптивных систем [1]. В этом случае достигается полная асимптотическая компенсация вариаций активного сопротивления ротора без ограничений на диапазон его изменений. Альтернативным подходом является использование теории робастных систем, которые обычно обеспечивают более простые решения при частичной компенсации ограниченных вариаций изменяющегося параметра.

Целью данной статьи является обобщение результатов, полученных авторами в цикле исследований [2]...[5], посвященных решению проблемы компенсации влияния

вариаций активного сопротивления ротора на процессы управления координатами АД за счет использования методов теории адаптивных и робастных систем.

АЛГОРИТМЫ РОБАСТНОГО И АДАПТИВНОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ АД

Синтезированный в [2] алгоритм робастного векторного управления моментом и потоком (Robust Indirect Field Oriented Control — R-IFOC) является дальнейшим развитием общетеоретических методов синтеза, представленных в работах [6]...[9]. На рис. 1 показана структурная схема алгоритма R-IFOC при его использовании в системах управления угловой скоростью. На рисунке серым цветом выделены блоки, которые отличаются его от алгоритма стандартного косвенного векторного управления [10] (Indirect Field Oriented Control — IFOC).

На рис. 1 обозначены: (u_a, u_b) , (i_a, i_b) , (u_d, u_q) , (i_d, i_q) — компоненты векторов напряжения и тока статора, представленные в стационарной системе координат $(a-b)$ и вращающейся системе координат $(d-q)$ соответственно; i_{s1}, i_{s2} — измеряемые значения тока статора в трехфазной системе координат; ω — угловая скорость ротора;

$\omega^*, \dot{\omega}^*$ — заданная траектория угловой скорости и ее первая производная; $\psi^*, \dot{\psi}^*, \ddot{\psi}^*$ — заданная траектория магнитного потока и две ее первые производные; i_d^* — заданное значение полевой компоненты тока статора (i_d); i_q^* — заданное значение моментной составляющей тока статора (i_q); $\bar{\omega} = \omega - \omega^*$ — ошибка отработки угловой скорости; $\bar{i}_d = i_d - i_d^*$, $\bar{i}_q = i_q - i_q^*$ — ошибки отработки токов i_d , i_q ; \tilde{i}_d — оценка полевой компоненты тока статора; \tilde{i}_q — ошибка оценивания тока i_d ; ω_0, ε_0 — угловая скорость вращения и угловое положение вращающейся системы координат $(d-q)$ относительно стационарной $(a-b)$; $(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$ — коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора скорости; $(k_i, k_{ii}) > 0$ — коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регуляторов тока; k_1 — коэффициент обратной связи наблюдателя полевой компоненты тока статора; $(\gamma_1, \gamma_2) > 0$ — настроечные коэффициенты подсистемы потока.

Положительные константы, связанные с электрическими и механическими параметрами АД, определены следующим образом: $\sigma = L_1(1 - (L_m^2/L_1L_2))$; $\beta = L_m/L_2\sigma$; α — оцененное значение параметра $\alpha = R_2/L_2$, используемое в алгоритме управления; $\hat{\gamma} = R_1/\sigma + \alpha L_m\beta$ — оцененное значение параметра $\gamma = R_1/\sigma + \alpha L_m\beta$; R_1, R_2, L_1, L_2 — активные сопротивления

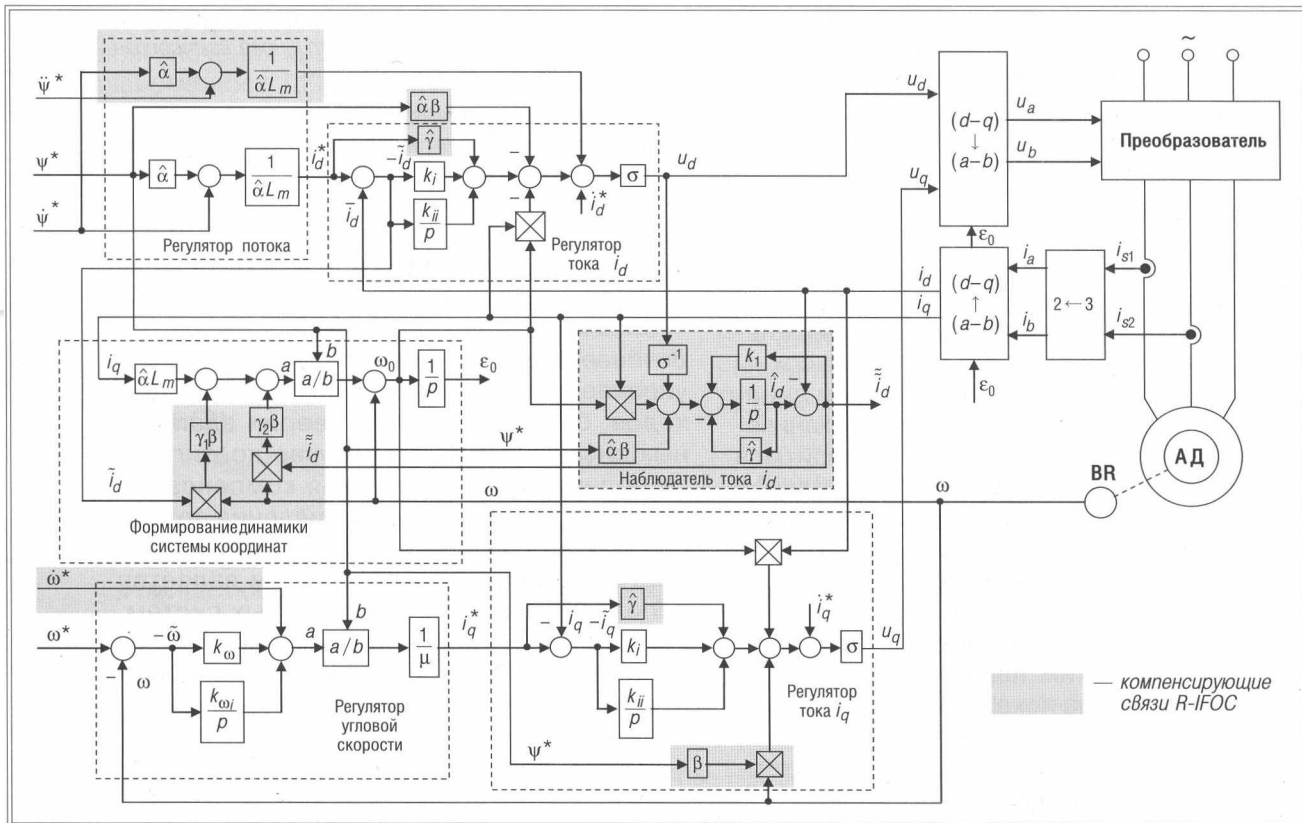


Рис. 1. Структурная схема алгоритма робастного векторного управления R-IFOC



и индуктивности статора и ротора; L_m — индуктивность намагничивающего контура; $\mu=3L_m/2JL_2$, где J — суммарный момент инерции, одна пара полюсов принята без потери общности.

Алгоритм R-IFOC обеспечивает глобальную асимптотическую отработку заданных траекторий скорости-потокосцепления, асимптотическую развязку процессов управления скоростью и потоком, асимптотическую линеаризацию подсистемы управления угловой скоростью, а также грубость к вариациям параметров роторной цепи [2].

Адаптивный к изменению активного сопротивления ротора алгоритм векторного управления может быть построен с использованием наблюдателя [4], который, на основании измеряемой информации об угловой скорости ротора, токах и напряжениях статора обеспечивает асимптотическое оценивание компонент вектора тока статора, потокосцепления ротора, а также неизвестного параметра в условиях, когда электромагнитный момент не равен нулю или модуль вектора потокосцепления ротора не является постоянным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛГОРИТМОВ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Целью проведения экспериментального тестирования является исследование динамических и энергетических характеристик алгоритмов робастного и адаптивного управления [2], [4] в условиях вариаций активного сопротивления роторной цепи, а также их сравнение с характеристиками стандартного алгоритма векторного управления IFOC [10].

Экспериментальное тестирование алгоритмов векторного управления выполнялось на станции быстрого прототипного тестирования алгоритмов управления электроприводами [11]. Параметры использованного в экспериментальной установке АД следующие: номинальная мощность 0,75 кВт, номинальный момент 2,5 Нм, $R_1=11$ Ом, $R_2=5,51$ Ом, $I_1=L_2=0,95$ Гн, $L_m=0,91$ Гн, кг·м².

При тестировании использовались следующие настройки алгоритмов управления: коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора скорости $k_{\omega}=150$, $k_{\omega i}=11250$; коэффициенты пропорциональной и интегральной составля-

ющих регуляторов тока: $k_i=700$, $k_{ii}=122000$. Корректирующие коэффициенты подсистемы потока и коэффициент наблюдателя полевой компоненты тока статора алгоритма R-IFOC приняты равными $\gamma_1=\gamma_2=0,1$, $k_1=700$.

При выполнении тестов использовалась стандартная последовательность операций управления [9]:

– во время начального интервала времени 0...0,25 с машина возбуждается, траектория заданного потока начинается с $\psi^*(0)=0,02$ Вб и достигает значения 0,92 Вб с первой производной, равной 3,52 Вб/с;

– начиная с $t=0,6$ с двигатель без нагрузки разгоняется по заданной траектории скорости, которая имеет нулевое начальное значение и достигает 50 рад/с с первой и второй производными, равными 714 рад/с² и 23810 рад/с³ соответственно;

– в момент времени $t=0,8$ с к валу двигателя прикладывается постоянный момент нагрузки, равный номинальному значению.

Заданные траектории для скорости и потока представлены на рис. 2 сплошными линиями, а пунктирной линией показан профиль момента нагрузки.

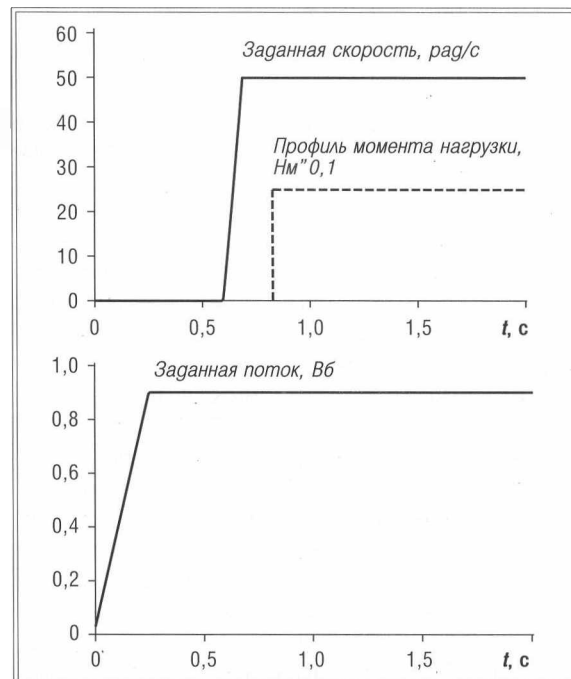


Рис. 2. Заданные траектории скорости и потока

Исследование динамических показателей качества. Графики переходных процессов ошибки отработки угловой скорости и моментной составляющей тока статора при отсутствии вариаций активного сопротивления ротора, то есть, когда $\alpha=\alpha_r=\alpha_H=5,8$ с⁻¹, для R-IFOC и IFOC показаны на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

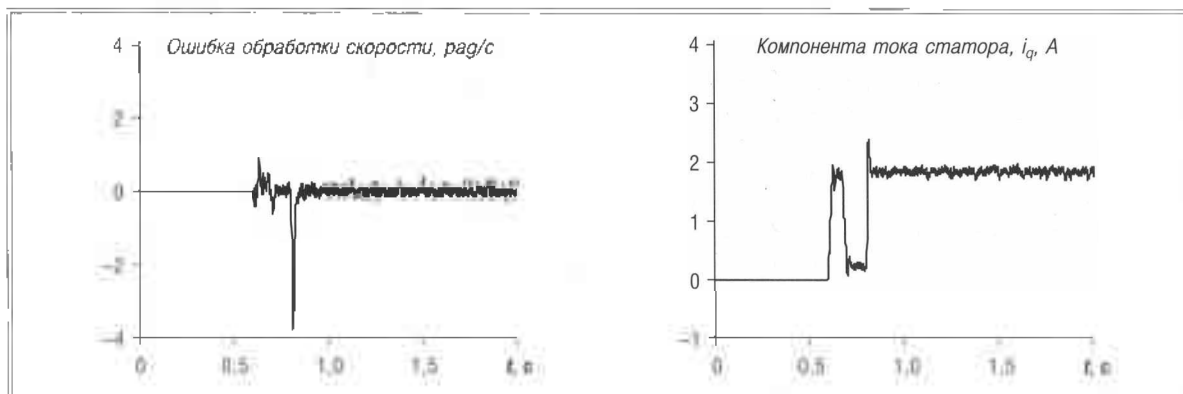


Рис. 3. Графики переходных процессов ошибки отработки угловой скорости и моментной составляющей тока статора при отсутствии вариаций активного сопротивления ротора для R-IFOC

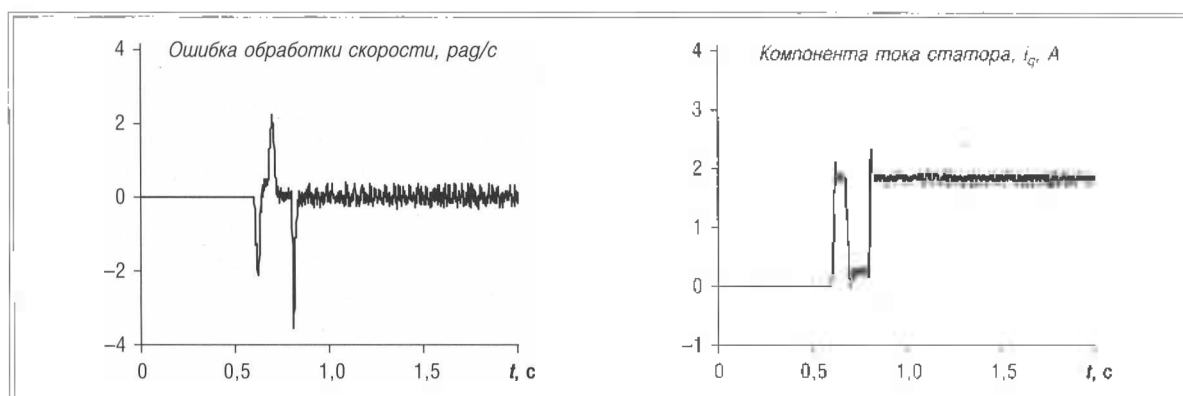


Рис. 4. Графики переходных процессов ошибки отработки угловой скорости и моментной составляющей тока статора при отсутствии вариаций активного сопротивления ротора для IFOC

Из сравнения рис. 3 и рис. 4 видно, что при известных параметрах R-IFOC обеспечивает более высокие (по сравнению с IFOC) показатели отработки заданных траекторий скорости-потокосцепления. Ошибка отработки заданной траектории угловой скорости при использовании R-IFOC находится примерно на нулевом уровне, в то время как при использовании IFOC отработка заданной траектории скорости происходит с ошибкой, равной примерно 2 рад/с, что, в основном, объясняется отсутствием заданного ускорения в регуляторе скорости. Динамическое поведение ошибки отработки угловой скорости и моментной составляющей тока статора при компенсации постоянного номинального момента нагрузки одинаково для исследуемых вариантов.

Следующий набор тестов проводился для сравнения динамических характеристик исследуемых алгоритмов при вариации активного сопротивления ротора. Результаты теста, полученные при $\dot{\alpha} = 101/\text{с}$ ($1,7\alpha_H$) для R-IFOC представлены на рис. 5, а для IFOC — на рис. 6.

Анализируя графики переходных процессов на рис. 3, 4 и рис. 5, 6, устанавливаем, что динамические показатели качества отработки угловой скорости и установившееся значение моментной составляющей тока статора АД при использовании R-IFOC практически не изменяются при указанных вариациях параметра $\dot{\alpha}$. В то же время, при использовании алгоритма IFOC наблюдается существенное ухудшение динамических показателей качества, а установившееся значение моментной составляющей тока статора увеличивается примерно на 40% по сравнению со случаем номинальных параметров (см. рис. 4). Следует отметить, что показатели качества процессов, представленных на рис. 6 для IFOC при $\dot{\alpha} = 101/\text{с}$, нельзя считать удовлетворительными для высокودинамических систем.

Исследование энергетических характеристик. Для сравнения энергетической эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в установившемся режиме работы АД была проведена третья серия тестов. При изменении

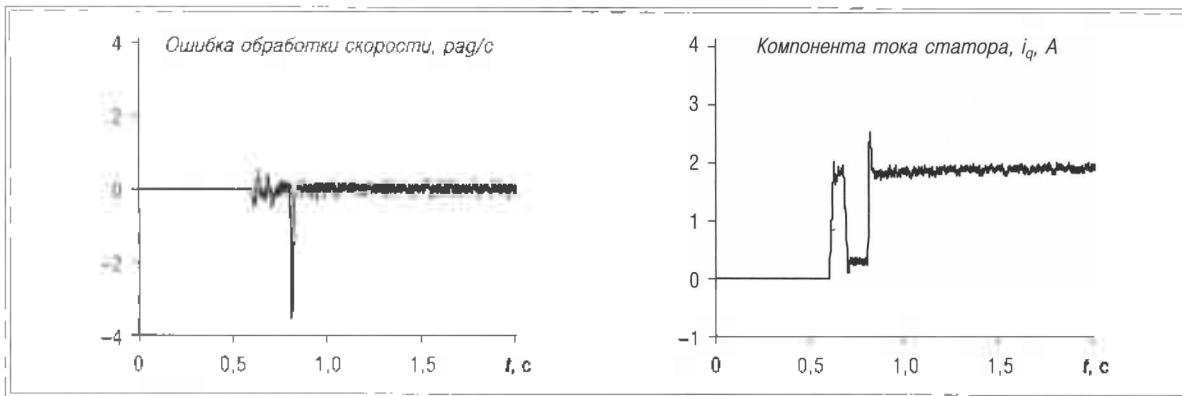


Рис. 5. Графики переходных процессов ошибки отработки угловой скорости и моментной составляющей тока статора при вариации активного сопротивления ротора для R-IFOC

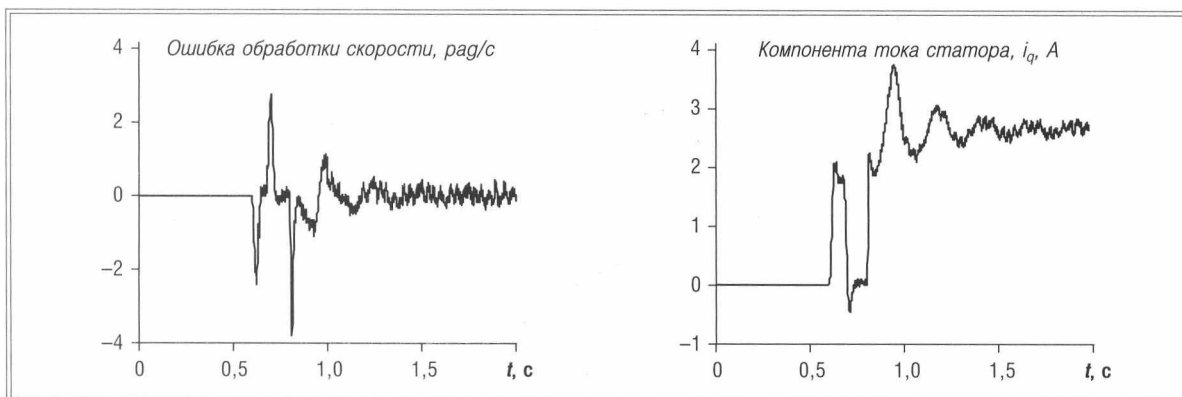


Рис. 6. Графики переходных процессов ошибки отработки угловой скорости и моментной составляющей тока статора при вариации активного сопротивления ротора для IFOC

значения $\hat{\alpha}$ от $0,35\alpha_H$ до $1,7\alpha_H$ для каждого значения α фиксировались установившиеся значения моментной составляющей тока статора и выходной активной мощности инвертора при компенсации номиналь-

ного момента нагрузки, что при скорости $\omega=50$ рад/с соответствует механической мощности на валу АД, равной 125 Вт. Результирующие зависимости приведены на рис. 7.

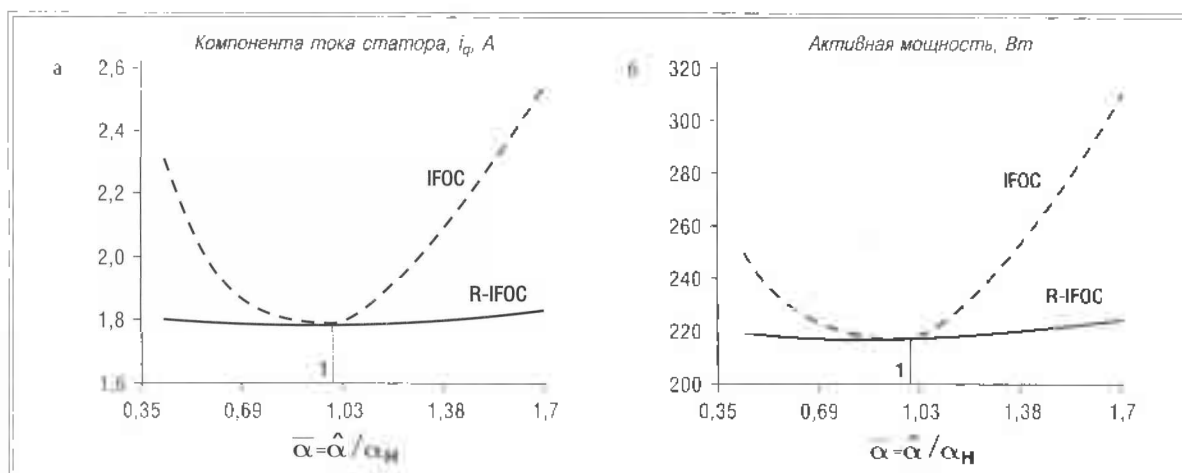


Рис. 7. Зависимости от относительного значения параметра: а — компоненты тока статора; б — активной мощности

Из рис. 7а видно, что использование R-IFOC даже при больших отклонениях параметра от номинального значения позволяет поддерживать моментную составляющую тока статора практически на постоянном уровне. В то же время при IFOC эта компонента значительно возрастает. Такой результат свидетельствует о том, что R-IFOC гарантирует робастность регулирования вектора потокосцепления, в результате чего в большинстве режимов работы для компенсации момента нагрузки необходим меньший ток.

Как следует из рис. 7б, при вариации $\alpha=1,7$ потери активной мощности в АД при использовании IFOC увеличиваются примерно в два раза. В то же время использование R-IFOC позволяет сохранить энергетическую

эффективность процесса электрохимического преобразования энергии практически на номинальном уровне.

Необходимо отметить, что свойства робастности к вариациям активного сопротивления ротора, полученные в [2], достигаются, когда угловая скорость ротора не равна нулю. При работе со скоростями, близкими к нулевой, динамические и энергетические характеристики алгоритмов R-IFOC и IFOC становятся практически одинаковыми.

Исследование адаптивного алгоритма векторного управления. Графики переходных процессов при адаптивном алгоритме R-IFOC, то есть, когда значение $\hat{\alpha}$, используемое в алгоритме управления, является выходом адаптивного наблюдателя [4], показаны на рис. 8. При выполнении

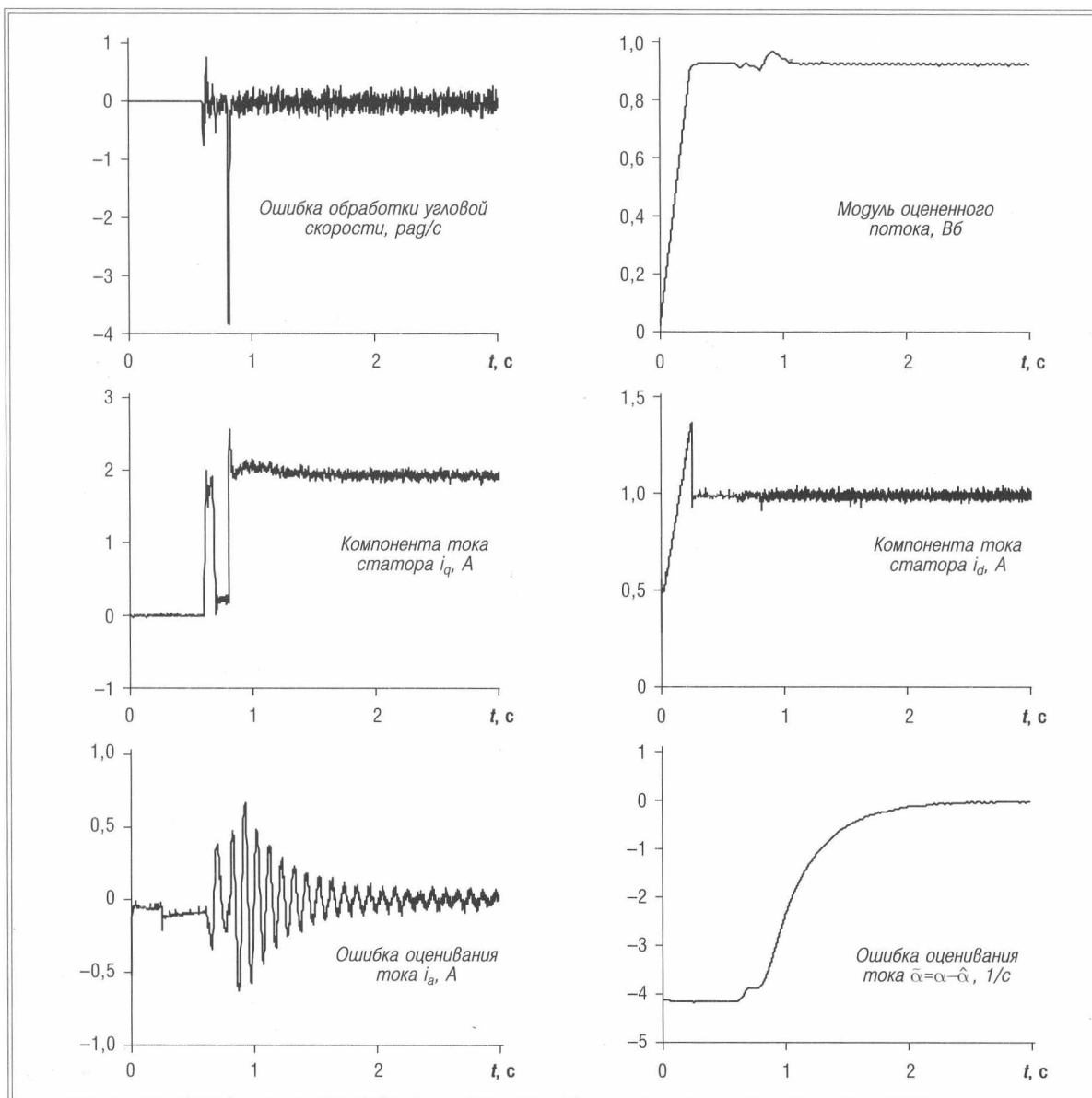


Рис. 8. Графики переходных процессов при адаптивном алгоритме R-IFOC



теста в момент инициализации контроллера задавалось начальное значение параметра $\alpha(0) = 1,7\alpha_{н}$. Как следует из рис. 8, в процессе работы с постоянным моментом нагрузки происходит асимптотическое оценивание параметра α за время, примерно равное 2 с. При этом показатели качества обработки угловой скорости и уровень установившегося моментного тока статора остаются на номинальном уровне (см. рис. 3).

Такой результат позволяет сделать вывод о том, что использование адаптивного наблюдателя [4] в составе алгоритма грубого векторного управления [2] позволяет обеспечить полную компенсацию влияния вариаций активного сопротивления ротора на процессы управления угловой скоростью и потокосцеплением АД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты анализа и экспериментального тестирования алгоритмов

робастного и адаптивного векторного управления угловой скоростью АД.

Как следует из результатов исследований, робастный алгоритм векторного управления АД обеспечивает глобальную асимптотическую обработку заданных траекторий скорости-потокосцепления, асимптотическую развязку процессов управления скоростью и потоком, асимптотическую линеаризацию подсистемы управления угловой скоростью, а также грубость к вариациям параметров роторной цепи в случае, когда угловая скорость ротора не равна нулю.

Показано, что адаптивная версия робастного векторного управления позволяет обеспечить полную компенсацию влияния вариаций активного сопротивления ротора на процессы управления угловой скоростью и вектором потокосцепления АД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Marino R. Global adaptive output feedback control of induction motors with uncertain rotor resistance / R. Marino, S. Peresada and P. Tomei // *IEEE Trans. on Automatic Control*. — May, 1999. — Vol. 44, No. 6. — P. 967–983.
2. Пересада С.М. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя / С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, В.С. Бовкунович // *Технічна Електродинаміка*. — 2010. — № 1. — С. 60–66.
3. Пересада С.М. Сравнительное экспериментальное тестирование алгоритмов косвенного векторного управления моментом асинхронного двигателя / С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, В.С. Бовкунович // *Технічна Електродинаміка*. — 2010. — № 2. — С. 33–40.
4. Пересада С.М. Адаптивный наблюдатель Матсусе: новый синтез, гарантирующий асимптотичность оценивания вектора потокосцепления и активного сопротивления ротора асинхронного двигателя / С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, В.С. Бовкунович // *Технічна Електродинаміка*. — 2010. — № 3. — С. 28–32.
5. Пересада С.М. Экспериментальное тестирование адаптивного к вариациям активного сопротивления роторной цепи наблюдателя потокосцепления асинхронного двигателя / С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, В.С. Бовкунович // *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. — 2010. — № 25. — С. 68–71.
6. Пересада С.М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть I. Проблема векторного управления в асинхронном электроприводе: краткий обзор и формулировка проблемы / С.М. Пересада // *Техническая электродинаміка*. — 1999. — № 2. — С. 27–32.
7. Пересада С.М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть II. Синтез алгоритма обработки модуля потока и угловой скорости / С.М. Пересада // *Техническая электродинаміка*. — 1999 — № 4. — С. 26–31.
8. Peresada S. High performance robust indirect field-oriented control of induction motors / S. Peresada, A. Tonielli // *International Journal of Adaptive Control and Signal Proc.* — 2000. — Vol. 14, No. 2-3. — P. 177–200.
9. Peresada S. Theoretical and Experimental Comparison of Indirect Field-Oriented Controllers for Induction Motors / S. Peresada, A. Tilli, A. Tonielli // *IEEE Trans. On Power Electronics*. — 2003. — Vol. 18, No 1. — P. 151–163.
10. Leonhard W. *Control of Electric Drives* / W. Leonhard. — Berlin: Springer-Verlag, 1995.
11. Пересада С. Станция быстрого моделирования алгоритмов управления электроприводом / С. Пересада, С. Ковбаса, А. Тонизли // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. — 1999. — С. 190–193.