

УДК 622:621.313-83

Е.К.Ещин

УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный электродвигатель является вполне управляемым объектом. Качество управления зависит от идеологии построения систем управления, которые уже подробно описаны в учебниках, например в [1,2,3], и некоторых обзорных публикациях [4,5].

Вместе с тем нельзя утверждать, что в смысле обеспечения максимального качества управления - уже предел. Подтверждение этому - многочисленные публикации, например [6,7,8], вслед за базовыми работами [9,10,11]. Предлагаемая - одна из них.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{sa}}{dt} &= U_{sa} - R_{sa}i_{sa} + \omega_k(\Psi_{sb} - \Psi_{sc})/\sqrt{3}, \\ \frac{d\Psi_{sb}}{dt} &= U_{sb} - R_{sb}i_{sb} + \omega_k(\Psi_{sc} - \Psi_{sa})/\sqrt{3}, \\ \frac{d\Psi_{sc}}{dt} &= U_{sc} - R_{sc}i_{sc} + \omega_k(\Psi_{sa} - \Psi_{sb})/\sqrt{3}, \\ \frac{d\Psi_{ra}}{dt} &= U_{ra} - R_{ra}i_{ra} + (\Psi_{rb} - \Psi_{rc})(\omega_k - p\omega)/\sqrt{3}, \\ \frac{d\Psi_{rb}}{dt} &= U_{rb} - R_{rb}i_{rb} + (\Psi_{rc} - \Psi_{ra})(\omega_k - p\omega)/\sqrt{3}, \\ \frac{d\Psi_{rc}}{dt} &= U_{rc} - R_{rc}i_{rc} + (\Psi_{ra} - \Psi_{rb})(\omega_k - p\omega)/\sqrt{3}. \end{aligned} \right\}$$

Состояние асинхронного электродвигателя (АД) будем описывать совокупностью дифференциальных и алгебраических связей, например, по [12,13] в 3-х фазном варианте.

Эти совокупности определяют характер изменения фазовых координат (потокосцеплений: $\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}, \Psi_{ra}, \Psi_{rb}, \Psi_{rc}$) с выделением в них управляющих воздействий - проекций вектора напряжения статора $U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}, U_{ra}, U_{rb}, U_{rc}$ на оси системы координат a, b, c .

В этих записях коэффициенты, начинающиеся с R и индексами s, r - активные сопротивления обмоток статоров и роторов АД соответствующих фаз (a, b, c), L с индексами s, r - индуктивности соответствующих фазных обмоток, L_m - индуктивность цепи намагничивания, ω - геометрическая угловая скорость вращения ротора электродвигателя, ω_k - электрическая угловая скорость вращения координатной системы, i с индексами s, r и a, b, c - токи.

$$\left. \begin{aligned} L_{sa}i_{sa} - \frac{1}{2}L_mi_{sb} - \frac{1}{2}L_mi_{sc} + L_mi_{ra} - \frac{1}{2}L_mi_{rb} - \frac{1}{2}L_mi_{rc} &= \Psi_{sa}, \\ -\frac{1}{2}L_mi_{sa} + L_mi_{sb} - \frac{1}{2}L_mi_{sc} - \frac{1}{2}L_mi_{ra} + L_mi_{rb} - \frac{1}{2}L_mi_{rc} &= \Psi_{sb}, \\ -\frac{1}{2}L_mi_{sa} - \frac{1}{2}L_mi_{sb} + L_mi_{sc} - \frac{1}{2}L_mi_{ra} - \frac{1}{2}L_mi_{rb} + L_mi_{rc} &= \Psi_{sc}, \\ L_mi_{sa} - \frac{1}{2}L_mi_{sb} - \frac{1}{2}L_mi_{sc} + L_{ra}i_{ra} - \frac{1}{2}L_mi_{rb} - \frac{1}{2}L_mi_{rc} &= \Psi_{ra}, \\ -\frac{1}{2}L_mi_{sa} + L_mi_{sb} - \frac{1}{2}L_mi_{sc} - \frac{1}{2}L_mi_{ra} + L_mi_{rb} - \frac{1}{2}L_mi_{rc} &= \Psi_{rb}, \\ -\frac{1}{2}L_mi_{sa} - \frac{1}{2}L_mi_{sb} + L_mi_{rc} - \frac{1}{2}L_mi_{ra} - \frac{1}{2}L_mi_{rb} + L_mi_{rc} &= \Psi_{rc}, \end{aligned} \right\}$$

где P_{zi}, P_i - необходимое и мгновенное значения управляемой переменной АД (в качестве P_{zi}, P_i могут выступать, например, электромагнитный момент АД, потокосцепления ротора, статора АД и др.), a_i - коэффициенты значимости переменных (весовые коэффициенты).

Решение такой задачи с использованием известных методов оптимизации, например, принципа максимума Л.С.Понtryгина позволяет найти алгоритмы формирования векторов напряжений статора (в случае управления АД со стороны статора) и ротора (для двигателя двойного питания), обеспечивающих

$$J = \inf_{\forall U, U \in U_{\max}} \int_0^t \sum_{i=1}^n \alpha_i (P_{zi} - P_i)^2 dt$$

Например, для функционала -

$$J = \int_0^t \sum_{i=1}^n \alpha_i (P_{zi} - P_i)^2 dt = \int_0^t (\alpha_1 (M_z - M)^2 + \alpha_2 (\Psi_{rz} - \Psi_r)^2) dt,$$

они выглядят так:

$$U_{sa} = \begin{cases} -U_{\max} & \text{if } \alpha_1(M_z - M)(\Psi_{sc} - \Psi_{sb}) + \alpha_2 \left(\frac{\Psi_{rz}}{\sqrt{(\Psi_{ra}^2 + ((\Psi_{rb} - \Psi_{rc})/\sqrt{3})^2)}} - 1 \right) \Psi_{ra} \leq 0 \\ U_{\max} & \text{if } \alpha_1(M_z - M)(\Psi_{sc} - \Psi_{sb}) + \alpha_2 \left(\frac{\Psi_{rz}}{\sqrt{(\Psi_{ra}^2 + ((\Psi_{rb} - \Psi_{rc})/\sqrt{3})^2)}} - 1 \right) \Psi_{ra} > 0, \end{cases}$$

$$U_{sb} = \begin{cases} -U_{\max} & \text{if } \alpha_1(M_z - M)(\Psi_{sa} - \Psi_{sc}) + \alpha_2 \left(\frac{\Psi_{rz}}{\sqrt{(\Psi_{ra}^2 + ((\Psi_{rb} - \Psi_{rc})/\sqrt{3})^2)}} - 1 \right) \Psi_{rb} \leq 0 \\ U_{\max} & \text{if } \alpha_1(M_z - M)(\Psi_{sa} - \Psi_{sc}) + \alpha_2 \left(\frac{\Psi_{rz}}{\sqrt{(\Psi_{ra}^2 + ((\Psi_{rb} - \Psi_{rc})/\sqrt{3})^2)}} - 1 \right) \Psi_{rb} > 0, \end{cases}$$

$$U_{sc} = \begin{cases} -U_{\max} & \text{if } \alpha_1(M_z - M)(\Psi_{sb} - \Psi_{sa}) + \alpha_2 \left(\frac{\Psi_{rz}}{\sqrt{(\Psi_{ra}^2 + ((\Psi_{rb} - \Psi_{rc})/\sqrt{3})^2)}} - 1 \right) \Psi_{rc} \leq 0 \\ U_{\max} & \text{if } \alpha_1(M_z - M)(\Psi_{sb} - \Psi_{sa}) + \alpha_2 \left(\frac{\Psi_{rz}}{\sqrt{(\Psi_{ra}^2 + ((\Psi_{rb} - \Psi_{rc})/\sqrt{3})^2)}} - 1 \right) \Psi_{rc} > 0, \end{cases}$$

Здесь M_z, M - задаваемое и текущее значение электромагнитного момента АД, Ψ_{rz}, Ψ_r - амплитуды задаваемого и текущего значения потокосцепления ротора, U_{\max} - максимально возможное амплитудное значение напряжения питания АД.

Результаты применения этих алгоритмов для различных режимов работы АД с параметрами:

$$R_{sa}, R_{sb}, R_{sc} = 0.516 \text{ Ом}, R_{ra},$$

$$R_{rb}, R_{rc} = 0.406 \text{ Ом},$$

$$X_{sa}, X_{sb}, X_{sc} = 1.419 \text{ Ом},$$

$$X_{ras}, X_{rb}, X_{rc} = 1.109 \text{ Ом},$$

$$X_m = 35.0 \text{ Ом}, p = 2, GD^2 = 0.7 \text{ кГ м}^2$$

приведены на рис. 1-4.

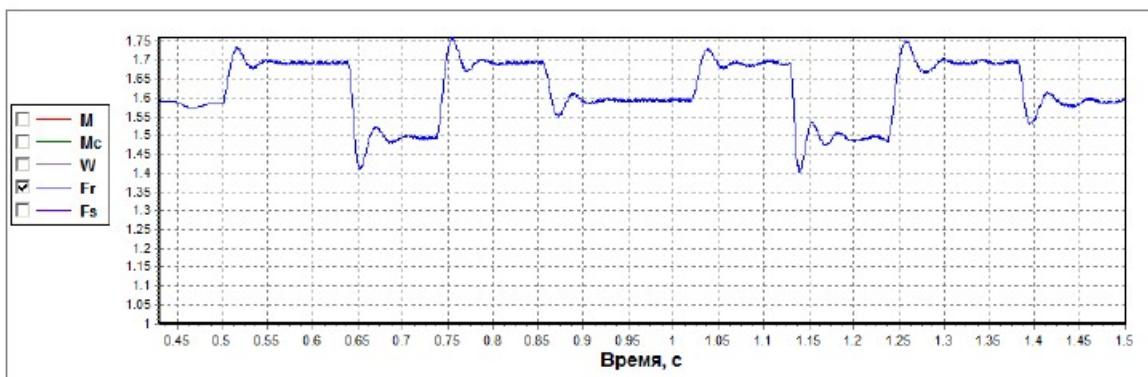


Рис. 1 Изменение амплитуды потокосцепления ротора Ψ_r при ступенчатом задании значений Ψ_{rz} последовательно: 1.7; 1.5; 1.7; 1.6; 1.7; 1.5; 1.7; 1.6. (без учета насыщения магнитной цепи).

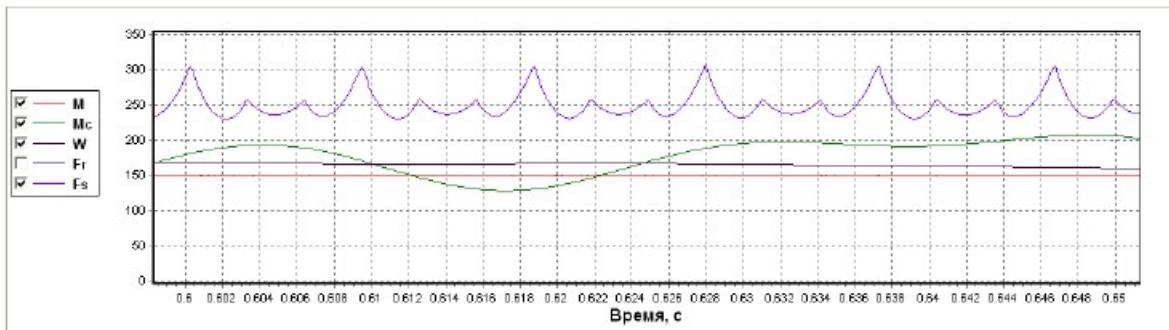


Рис. 2 Типичная форма изменения амплитуды потокосцепления статора (верхняя линия) в идеальном варианте управления. $F_s=150 \Psi_r$.

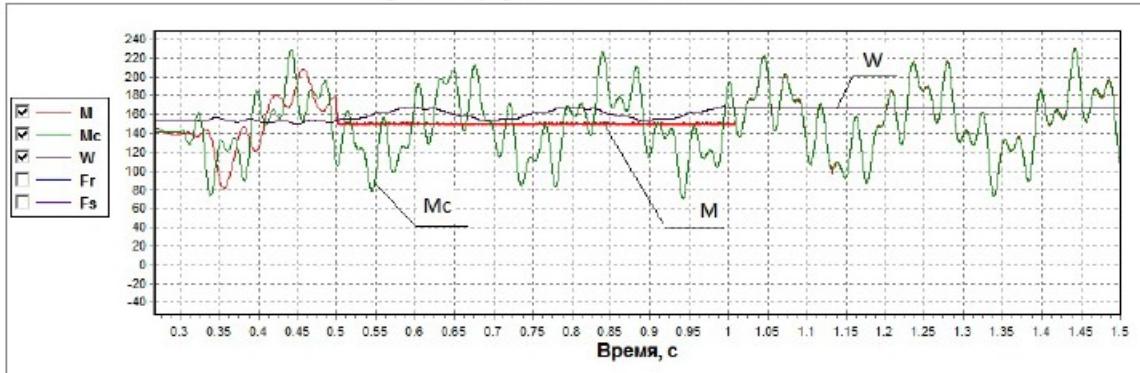


Рис. 3 Режимы работы АД при изменении Ψ , по рис.2: до 0.5 с - неуправляемый; 0.5–1.01 - стабилизация электромагнитного момента; от 1.01 - стабилизация скорости.

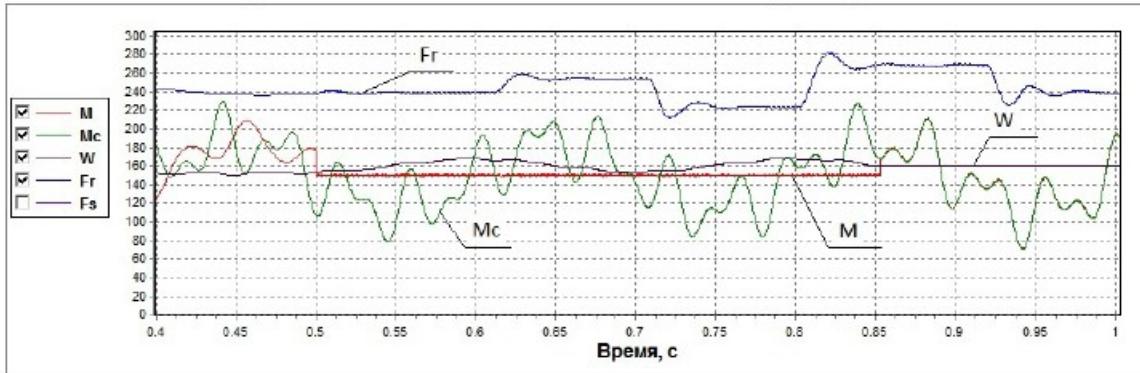


Рис. 4 Сохранение качества управления электромагнитным моментом (время от 0.5 до 0.855) и скоростью АД (время от 0.855) при изменении задания потокосцепления ротора. Идеальный вариант управления. Задержка формирования управлений U_α U_β U_c – 0 мкс. $Fr=150 \Psi_r$.

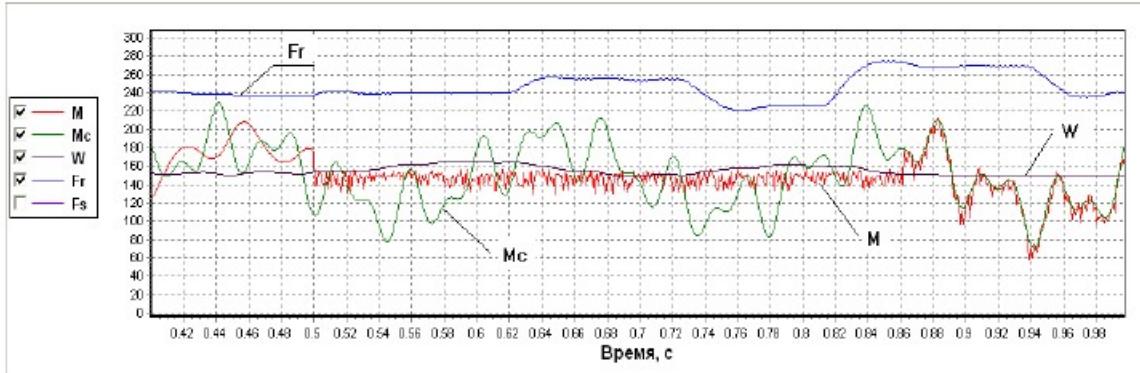


Рис. 5 Качество управления электромагнитным моментом (время от 0.5 до 0.855) и скоростью АД (время от 0.855) при изменении задания потокосцепления ротора. Задержка формирования управлений U_α U_β U_c – 10 мкс. $Fr=150 \Psi_r$.

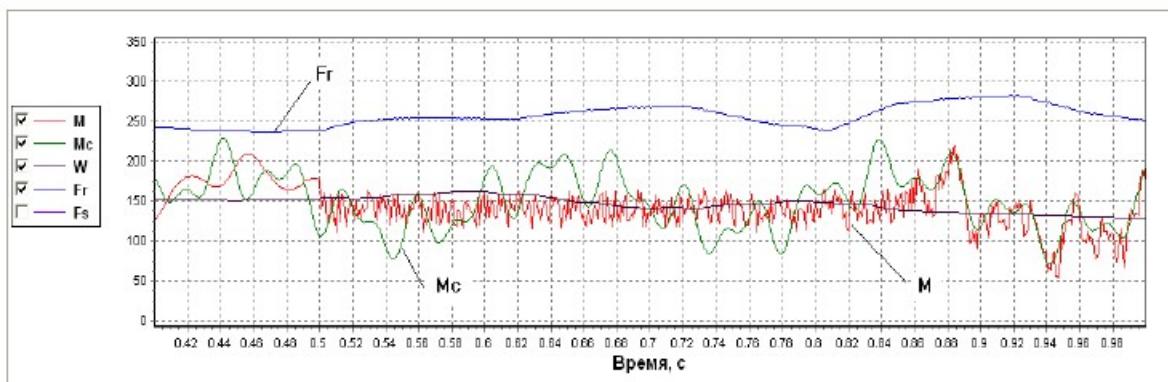


Рис. 6 Качество управления электромагнитным моментом (время от 0.5 до 0.855) и скоростью АД (время от 0.855) при изменении задания потокосцепления ротора. Задержка формирования управлений $U_a, U_b, U_c - 25 \text{ мкс}$. $Fr = 150 \Psi_r$.

Следует отметить, что найденные алгоритмы формирования векторов напряжений обеспечивают приемлемое качество управления во всех возможных режимах работы АД (пуск, торможение, основной технологический) в идеальном варианте. Эти алгоритмы при раздельном задании необходимых значений электромагнитного момента и потока близки к способу управления известному как Direct Self Control (DSC) [10].

Вместе с тем, наличие запаздывания в системе управления при формировании управляющих воздействий (U_a, U_b, U_c) приводит к довольно значительной погрешности при обеспечении качества управления (рис. 5,6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Trzynadlowski A.M. Control of induction motor / London, Academic Press, 2001. – 228 с.
3. Tze-Fun Chan, Keli Shi. Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives / John Wiley & Sons, 2011. 432 р.
4. Бичай В. Г. Состояние, тенденции и проблемы в области методов управления асинхронными двигателями / Бичай В. Г., Пиза Д. М., Потапенко Е. Е., Потапенко Е. М. // "Радіоелектроніка, інформатика, управління" № 1, 2001.
5. Delaleau E. Modeling and control of induction motors / Delaleau E., Louis J.-P., Ortega R. // Int.J Appl. Math. Comput. Sci., 2001. Vol.11, No 1, 105-129.
6. Chen F., Dunnigan M.W. Sliding-mode torque and flux control of an induction machine / IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 150, No.2, March 2003.
7. Bonnet F. Direct torque control of doubly fed induction machine / F. Bonnet, P.E. Vidal, M. Pietrzak-David. // Bulletin of the polish academy of sciences. Technical sciences. Vol. 54, No.3, 2006.
8. Ещин Е.К. Общая задача управления асинхронным электродвигателем / Ещин Е.К., Григорьев А.В. // ИВУЗ, Электромеханика, 2010. №1. С.39-43.
9. Blaschke, F., "The principle of field orientation applied to the new trans-vector closed-loop control system for rotating field machines" Siemens-Review 39, 1972, pp. 217-220.
10. Depenbrock M. Direct self-control of the flux and rotary moment of a rotary-field machine // United States Patent, Patent Number 4,678,248 Date of Patent Jul. 7, 1987.
11. Takahashi I., Naguchi T., "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor," IEEE Trans. IA, 1986.
12. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / М.: Высшая школа, 2001. -327 с.
13. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока -М.-Л: Госэнергоиздат, 1963. -744 с.

□ Автор статьи

Ещин
Евгений Константинович,
докт. техн. наук, проф. каф.
прикладных информационных
технологий КузГТУ
Email: eke@kuzstu.ru