УДК 622:621.313-83

Е.К.Ещин

УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный электродвигатель является вполне управляемым объектом. Качество управления зависит от идеологий 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.

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

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.

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

Задача управления АД может рассматриваться как задача минимизации функционала, записанного в интегральной форме и выражающего цель управления, например, в виде функционала:

$$J = \int_0^t \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\mathrm{P}_{zi} - \mathrm{P}_i\right)^2 dt,$$

где $\mathbf{P}_{zi}$, $\mathbf{P}_i$ – необходимое и мгновенное значения управляемой переменной АД (в качестве $\mathrm{P}_{zi}, \mathrm{P}_i$ могут выступать, например, электромагнитный момент АД, потокосцепления ротора, статора АД и др.), α_i – коэффициенты значимости переменных (весовые коэффициенты).

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

$$J = \inf_{\forall U_s, U_r \in U_{\max}} \int_0^t \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\mathrm{P}_{zi} - \mathrm{P}_i\right)^2 dt$$

Например, для функционала –

$$J = \int_0^t \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\mathrm{P}_{zi} - \mathrm{P}_i\right)^2 dt = \int_0^t \left(\alpha_1 \left(M_z - M\right)^2 + \alpha_2 \left(\Psi_{rz} - \Psi_r\right)^2\right) dt,$$

они выглядят так:

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

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

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

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 Ом, R_{ra},
R_{rb}, R_{rc} =0.406 Ом,
X_{sa}, X_{sb}, X_{sc}=1.419 Ом,
X_{ra}, X_{rb}, X_{rc} =1.109 Ом,
X_m=35.0 Ом, p=2, GD^2=0.7 кГм^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).

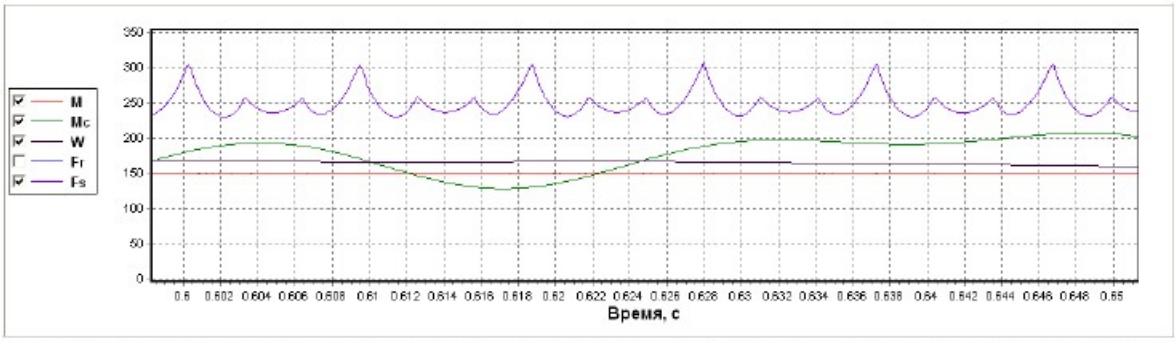

Рис. 2 Типичная форма изменения амплитуды потокосцепления статора (верхняя линия) в идеальном варианте управления. $Fs=150\Psi_s$.

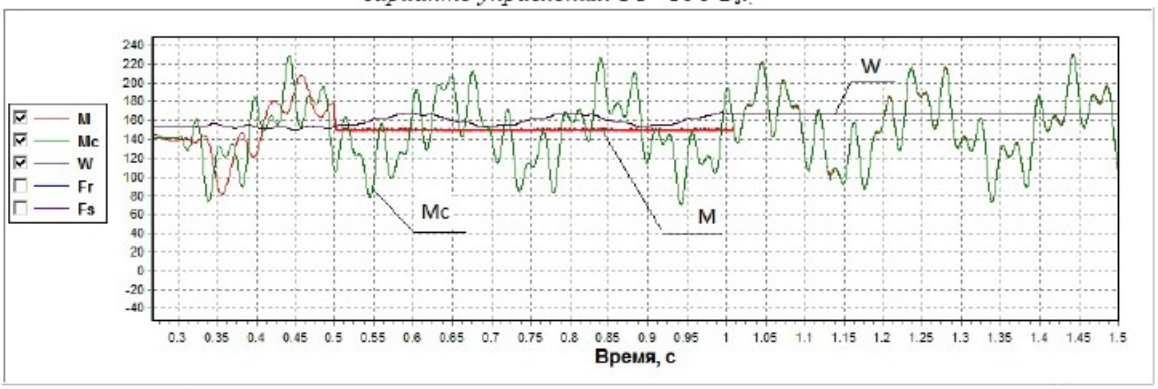

Рис. 3 Режимы работы АД при изменении Ψ_r по рис.2: до 0.5 с - неуправляемый; 0.5÷1.01 - стабилизация электромагнитного момента; от 1.01 - стабилизация скорости.

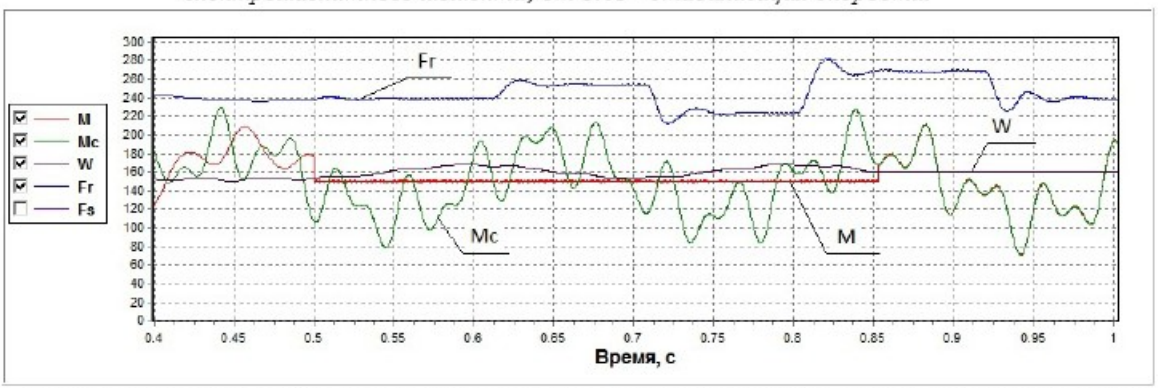

Рис. 4 Сохранение качества управления электромагнитным моментом (время от 0.5 до 0.855) и скоростью АД (время от 0.855) при изменении задания потокосцепления ротора. Идеальный вариант управления. Задержка формирования управлений U_a, U_b, U_c – 0 мкс. $Fr=150\Psi_r$.

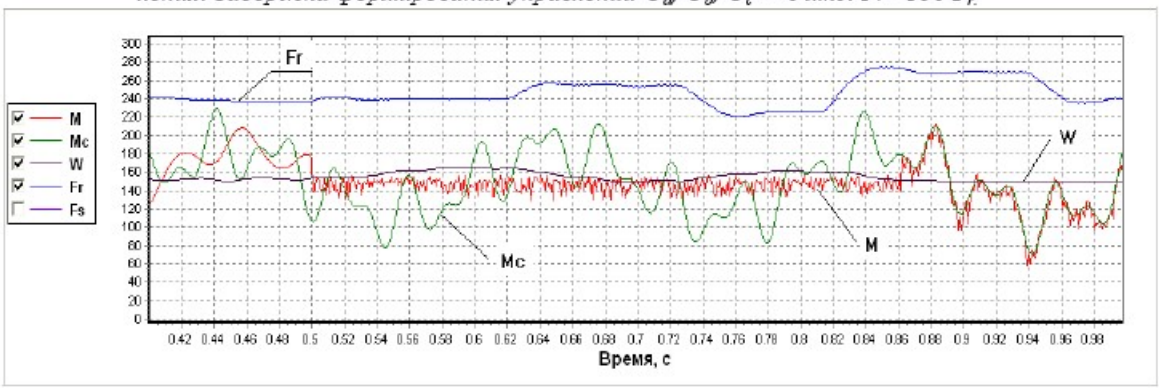

Рис. 5 Качество управления электромагнитным моментом (время от 0.5 до 0.855) и скоростью АД (время от 0.855) при изменении задания потокосцепления ротора. Задержка формирования управлений U_a, U_b, U_c – 10 мкс. $Fr=150\Psi_r$.

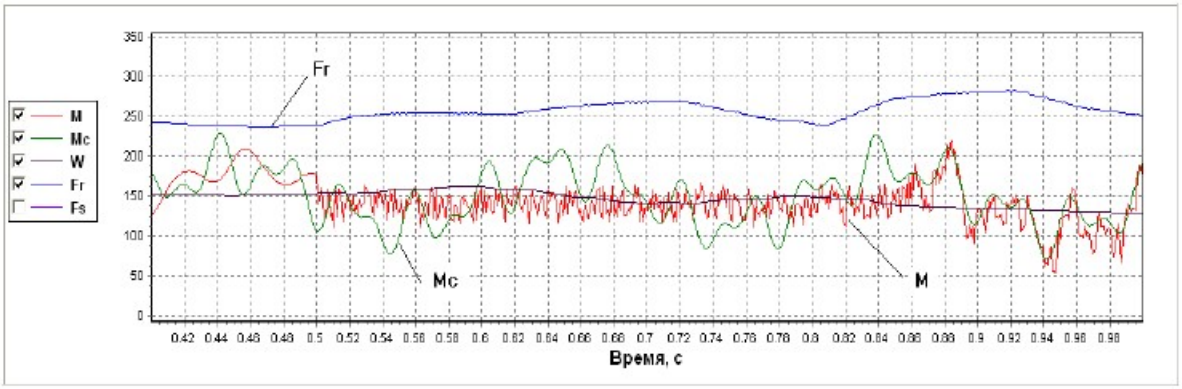

Рис. 6 Качество управления электромагнитным моментом (время от 0.5 до 0.855) и скоростью АД (время от 0.855) при изменении задания потокосцепления ротора. Задержка формирования управлений U_a, U_b, U_c – 25 мкс. $Fr=150\Psi_r$.

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 p.

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. Csi., 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 шк., 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