

УДК 622:621.313-83

Е.К.Ещин

О ВЗАИМНОСТИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный электродвигатель (АД) является вполне управляемым объектом. Известно значительное количество работ, посвященных нахождению аналитических связей между управляющим(и) воздействием(ями) и фазовыми координатами АД. Цель нахождения этих связей – практическая реализация устройства управления электроприводом [1-4].

При выборе в качестве управляющего воздействия напряжения питания статора АД в [5,6] установлены варианты упомянутых аналитических связей. Например, для функционала

$$J = \int_0^t (\alpha_1(M_z - M)^2 + \alpha_2(\Psi_{rz} - \Psi_r)^2) dt, \quad \text{они выглядят так (для фазы } a, \text{ здесь } M_z, M \text{ - задаваемое и}$$

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):

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

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

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

$R_{sb}, R_{sc}=0.516 \text{ Ом}; R_{ra}, R_{rb}, R_{rc}=0.406 \text{ Ом}; X_{sa}, X_{sb}, X_{sc}=1.419 \text{ Ом}; X_{ra}, X_{rb}, X_{rc}=1.109 \text{ Ом}; X_m=35.0 \text{ Ом}; p=2;$

Используемая при этом исходная математическая модель АД представлена совокупностью дифференциальных и алгебраических связей, например, по [7,8] в трехфазном 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 амагничивания, 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.

Понятно, что последовательность U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} определит изменения потокосцепления статора и его угловую частоту вращения – ω_s . Однако, в явном виде ω_s в исходной математической модели отсутствует, но может быть определена при численном решении уравнений движения АД.

Для АД с параметрами: R_{sa} ,

$GD^2=0.7$ кГм² результаты введения управления приведены на рисунке 1, а изменения угла поворота вектора Ψ_s и электрического угла поворота ротора приведены на рисунок 2.

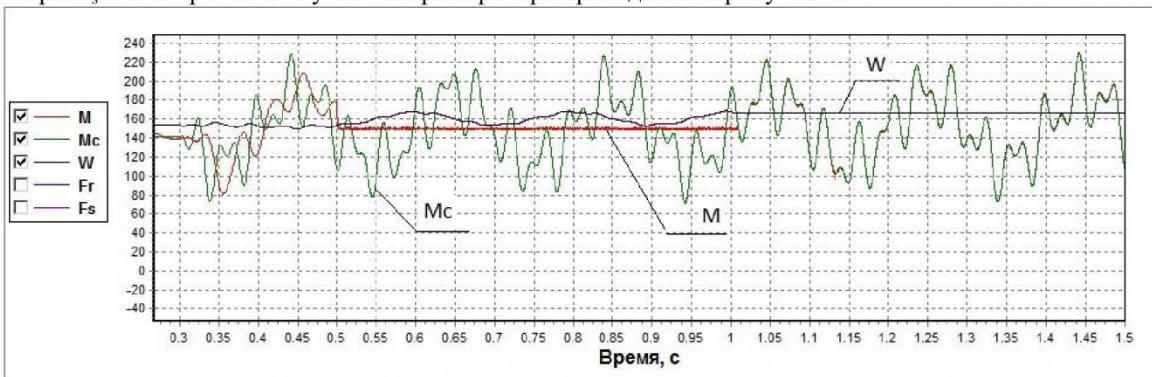


Рис.1 Режимы работы АД при изменении Ψ_r по рис.2: до 0.5 с - неуправляемый; 0.5÷1.01 - стабилизация электромагнитного момента; от 1.01 - стабилизация скорости.



Рис. 2 Изменения угла поворота вектора Ψ_s и электрического угла поворота ротора АД

Для удобства анализа угловых движений вектора Ψ_s АД и угловых перемещений ротора АД преобразуем графики их изменения к удобному для анализа виду. Для этого разместим фрагменты графика, соответствующие повороту соответствующей переменной на угол равный 2π на одном уровне (Рисунок 3).

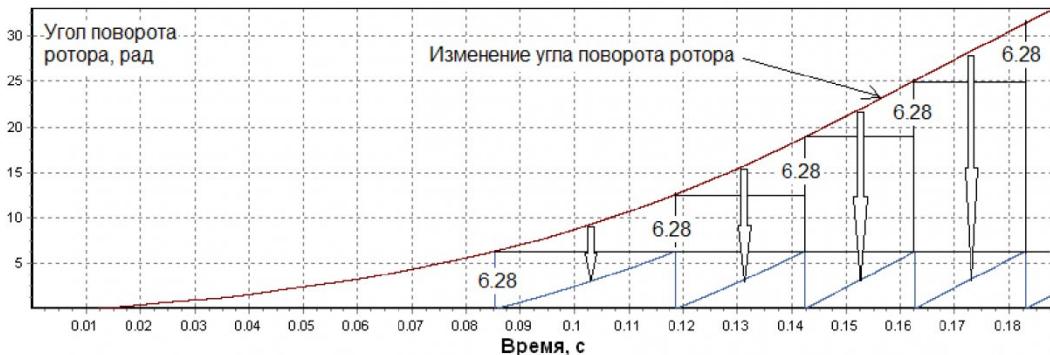
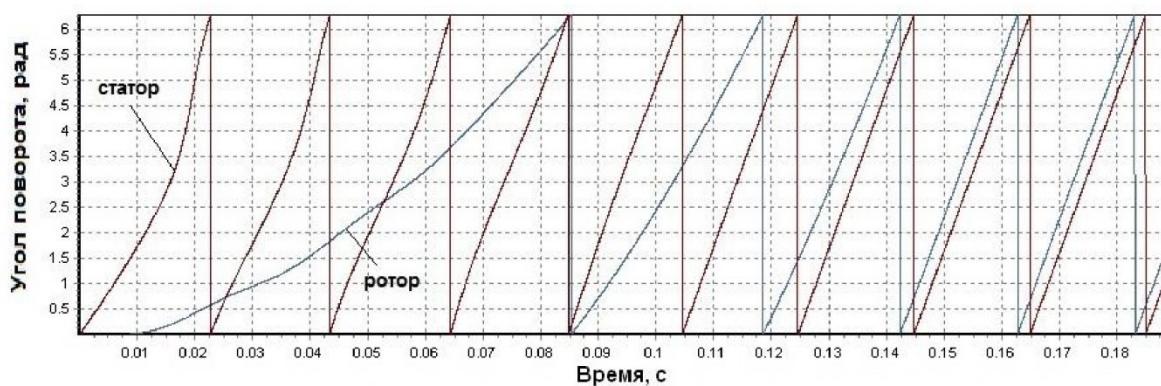
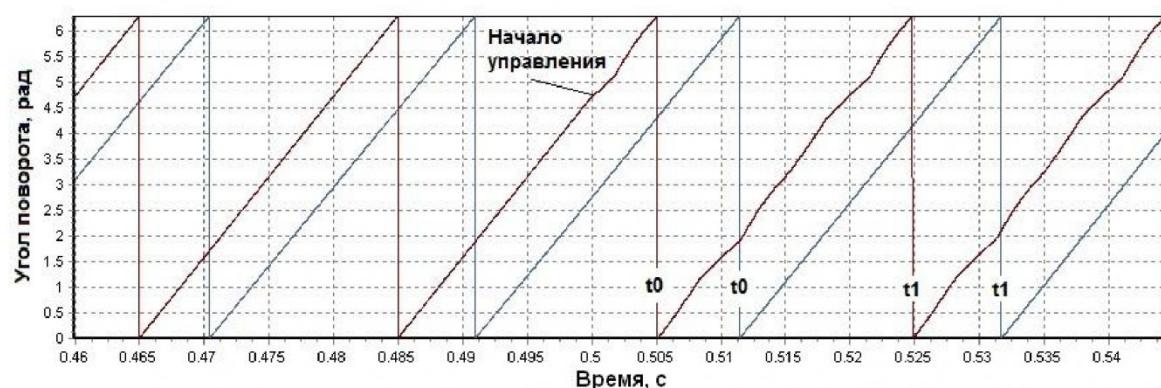
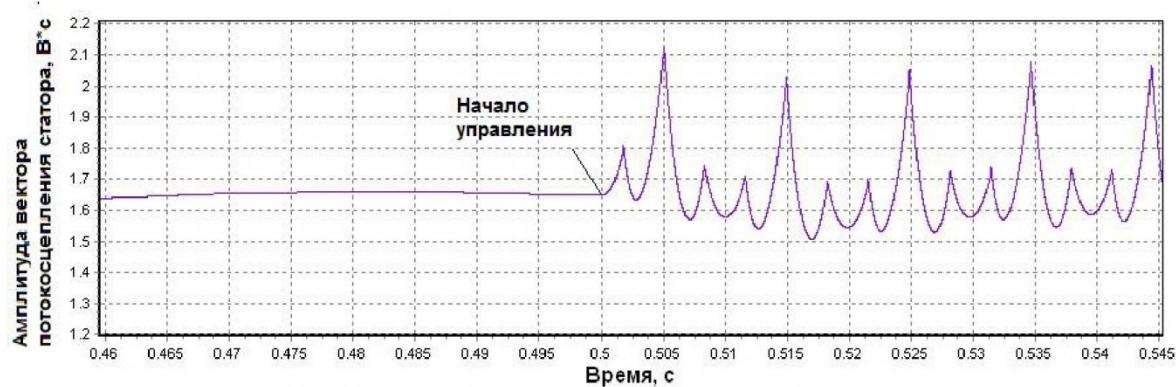


Рисунок 3 - Преобразование зависимости изменения угла поворота ротора АД к последовательности угловых поворотов ротора на угол 2π (1 оборот – 6.28...)

В результате получим последовательности угловых перемещений на угол 2π вектора Ψ_s АД и угловых перемещений ротора АД с возможностью определения затрачиваемого на это перемещение времени (Рис. 4). Видно, что при пуске прямым включением в сеть без нагрузки за первые 4-е оборота вектора потокосцепления статора ротор АД поворачивается на 1 оборот за 0.085 с.

Изменение формы угла поворота вектора Ψ_s при включении управления показано на рисунке 5. Соответствующее изменение амплитуды вектора Ψ_s – на рисунке 6.

Рис. 4 Пуск АД. Характер изменения углов поворота вектора Ψ_s и ротора АД для анализа их движенийРис. 5 Изменение характера движения вектора Ψ_s при введении управления состоянием АД (0.5 с)Рис. 6 Типичная форма изменения амплитуды вектора Ψ_s в идеальном варианте управления.

Анализ периодов изменения на угол 2π вектора Ψ_s и ротора АД в начале управляемого режима и в конце рассматриваемого временного интервала управления (см. таблицу) показывает, что при обеспечении полной управляемости электромагнитным моментом АД и потокосцеплением ротора в варианте стабилизации M дополнительно сохраняется постоянство величины абсолютного скольжения β .

Параметры	t0	t1	Δt	Частота, Гц	Угловая скорость вращения, 1/с	Абсолютное скольжение
Поле статора	0.505	0.525	0.02	50.00	314.00	0.024
Ротор	0.512	0.533	0.021	47.62	299.05	
.....
Поле статора	0.906	0.926	0.02	50.00	314.00	0.024
Ротор	0.902	0.923	0.021	47.62	299.05	

Следует отметить, что сам факт сопровождения задачи стабилизации электромагнитного момента АД стабилизацией величины абсолютного значения не нов. Известны идентичные связи, обеспечивающая постоянство M на уровне M_z как при частотном управлении электродвигателем [9], так и при векторном варианте управления [10] -

$$\alpha = p \frac{\omega}{\omega_n} + R_r \frac{(M_z + M)}{3p\omega_n\Psi_r^2}, \text{ где } \alpha \text{ - относительная частота вращения вектора } \Psi_s. \text{ Величина}$$

абсолютного скольжения в этом случае определяется выражением - $\beta = R_r \frac{(M_z + M)}{3p\omega_n\Psi_r^2} = const.$ что

обеспечивает линейную связь между относительной частотой вращения вектора Ψ_s и относительной электрической частотой вращения ротора - $\alpha_p = p\omega/\omega_n$, которая с достаточной для практики точностью и эффективностью в реализации может быть реализовано по [11]. По достижении цели управления $J = \int_0^t (\alpha_1(M_z - M)^2 + \alpha_2(\Psi_{rz} - \Psi_r)^2) dt$, когда $M=M_z$ и $\Psi_r=\Psi_{rz}$ величина абсолютного значения постоянна.

Последнее позволяет говорить о взаимности задач управления электромагнитным моментом АД при частотном, векторном и различных вариантах DTC - прямого управления моментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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.
3. *Takahashi I., Naguchi T.*, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor," IEEE Trans. IA, 1986.
4. *Tze-Fun Chan, Keli Shi.* Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives / John Wiley & Sons, 2011. 432 p.
5. Ещин Е.К. Общая задача управления асинхронным электродвигателем / Ещин Е.К., Григорьев А.В. // ИВУЗ, Электромеханика, 2010. №1. С.39-43.
6. Ещин Е.К. Управление состоянием асинхронного электродвигателя /Вестник КузГТУ, 2012. №5 С.72-75.
7. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / М.:Высшая шк., 2001.-327 с.
8. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока /М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. -744 с.
9. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (моделирование и управление). –Кемерово: Кузбасский гос.техн.ун-т, 2003. -347 с.
10. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами. –Новосибирск: Изд-во НГГУ, 1999. -66 с.
11. Ещин Е.К. Устройство для регулирования частоты скольжения асинхронного электродвигателя / Ещин Е.К., Гаврилов П.Д., Грасс В.А., Ивонин Г.И., Манохин П.И., Янцен В.И// А.с. СССР, Н 02 Р 7/42(СССР). -N2692727/24-07; Заявлено 06/12/78; Опубл. 23/11/80, Бюл.№43.

□Автор статьи

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