

УДК 62-83-52:621.3.025.3

В.М. Завьялов, А.А. Неверов, И.Ю. Семыкина

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Электроприводы на базе асинхронных электродвигателей занимают доминирующее положение в большинстве отраслей промышленности, что вызвано хорошими технико-экономическими показателями асинхронного электродвигателя, а так же интенсивным внедрением в последние годы регулируемых асинхронных электроприводов с преобразователями частоты. В то же время асинхронный двигатель, как объект управления, является сложной многосвязной нелинейной системой. Для получения высококачественного управления им, необходимо одновременное решение ряда задач управления.

Рассмотрим случай, когда основная задача управления – регулирование момента как некоторой функции времени или координат. Такая задача может возникнуть при поддержании заданного ускорения исполнительного органа или заданного усилия у манипуляторов, для ограничения напряжения в трансмиссиях установок, работающих с резкопеременной нагрузкой и т.д.

Помимо обозначенной выше основной задачи управления можно сформулировать дополнительные, второстепенные задачи, выполнение которых в общем случае необязательно, но желательно, для улучшения энергетических показателей качества регулирования. К ним можно отнести регулирование или стабилизацию величины магнитного потока, для исключения режима насыщения магнитной системы, и как следствие ограничение потерь в стали, и минимизация потерь электроэнергии в активных сопротивлениях проводников обмоток двигателя.

Рассмотрим решение поставленной многокритериальной задачи методом скоростного градиента [1]. Для описания АД возьмем математическую модель обобщенной электрической машины, записанную для неподвижной системы координат  $\alpha\beta$  [2]. Представим ее в виде уравнения линейной по входам системы:

$$\dot{x} = A(x, t) + B(x, t)u \quad , \quad (1)$$

где

$$A(x, t) = \begin{bmatrix} -\sigma L_2 R_1 \psi_{1\alpha} + \sigma L_{12} R_1 \psi_{2\alpha} \\ -\sigma L_2 R_1 \psi_{1\beta} + \sigma L_{12} R_1 \psi_{2\beta} \\ \sigma L_{12} R_2 \psi_{1\alpha} - \sigma L_1 R_2 \psi_{2\alpha} - p\omega \psi_{2\beta} \\ \sigma L_{12} R_2 \psi_{1\beta} - \sigma L_1 R_2 \psi_{2\beta} + p\omega \psi_{2\alpha} \\ 1/J [1,5pk_2 / L'_1 (\psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}) - M_c] \end{bmatrix}$$

$$B(x, t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T ;$$

$$x = [\psi_{1\alpha} \quad \psi_{1\beta} \quad \psi_{2\alpha} \quad \psi_{2\beta} \quad \omega]^T ;$$

$$u = [u_{1\alpha} \quad u_{1\beta}]^T ;$$

$u_{1\alpha}, u_{1\beta}$  – составляющие вектора напряжения статора;  $\psi_{1\alpha}, \psi_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$  – составляющие векторов потокосцепления статора и ротора;  $R_1, R_2$  – активное сопротивление статора и ротора соответственно;  $L_1, L_2$  – индуктивность обмотки статора и ротора соответственно;  $L_{12}$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;  $\omega$  – частота вращения вала двигателя;  $p$  – число пар полюсов;  $J$  – момент инерции ротора двигателя;  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя;

$$k_2 = \frac{L_{12}}{L_{12} + L_2};$$

$$L'_1 = L_1 + k_2 L_2; \sigma = \frac{1}{L_1 L_2 - L_{12}^2}.$$

В качестве критериев управления примем следующие:

1) стабилизация электромагнитного момента на валу двигателя как основная задача управления:

$$M = 1,5pk_2 / L'_1 (\psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}) \rightarrow M_3 \quad (2)$$

2) стабилизация потокосцепления статора для исключения режима насыщения электротехнической стали магнитопровода машины:

$$\psi_1^2 = \psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2 \rightarrow \psi_{1\alpha}^2; \quad (3)$$

3) снижение омических потерь за счет минимизации квадрата тока:

$$I_1^2 = (L_2 \sigma \psi_{1\alpha} - L_{12} \sigma \psi_{2\alpha})^2 + (L_2 \sigma \psi_{1\beta} - L_{12} \sigma \psi_{2\beta})^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Представим цель управления в виде квадратичного локального целевого функционала:

$$Q(x, t) = 0,5 [y - y^*(t)]^T H [y - y^*],$$

где  $y$  – гладкая вектор-функция  $l$  критериев;  $y^*(t)$  – желаемая траектория выхода;  $H$  – матрица весовых коэффициентов  $l \times l$ .

Применительно к рассматриваемой задаче можно записать:

$$[y - y_*] = \begin{bmatrix} 1,5pk_2/L'_1(\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}) \\ -M_3 \\ \psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2 - \psi_{13} \\ (L_2\sigma\psi_{1\alpha} - L_{12}\sigma\psi_{2\alpha})^2 + \\ + (L_2\sigma\psi_{1\beta} - L_{12}\sigma\psi_{2\beta})^2 \end{bmatrix};$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & 0 \\ 0 & h_{22} & 0 \\ 0 & 0 & h_{33} \end{bmatrix}.$$

Для модели, линейной по управлению, и квадратичного локального целевого функционала алгоритм скоростного градиента имеет вид [1]:

$$\frac{du}{dt} = -\Gamma B(x, t)^T C^T H [y - y_*], \quad (5)$$

где  $C = \frac{\partial y}{\partial x}$  и  $\Gamma$  – диагональная матрица усиления.

Решив матричное уравнение (5) для системы (1) и задач управления (2)-(4), получим уравнения для составляющих напряжения статора по осям  $\alpha$ - $\beta$ :

$$u_{1\alpha}^* = -\gamma_1 \times$$

$$\times \int \left( -h_{11}1,5pk_2/L'_1(\times 1,5pk_2/L'_1(\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}) - M_3)\psi_{2\beta} + + 2h_{22}(\psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2 - \psi_{13}^2)\psi_{1\alpha} + + 2h_{33}((L_2\sigma\psi_{1\alpha} - L_{12}\sigma\psi_{2\alpha})^2 + + (L_2\sigma\psi_{1\beta} - L_{12}\sigma\psi_{2\beta})^2) \times \times (L_2\sigma\psi_{1\alpha} - L_{12}\sigma\psi_{2\alpha})L_2\sigma \right) dt;$$

$$u_{1\beta}^* = -\gamma_2 \times$$

$$\times \int \left( -h_{11}1,5pk_2/L'_1(1,5pk_2/L'_1(\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}) - M_3)\psi_{2\alpha} + + 2h_{22}(\psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2 - \psi_{13}^2)\psi_{1\beta} + + 2h_{33}((L_2\sigma\psi_{1\alpha} - L_{12}\sigma\psi_{2\alpha})^2 + + (L_2\sigma\psi_{1\beta} - L_{12}\sigma\psi_{2\beta})^2) \times \times (L_2\sigma\psi_{1\beta} - L_{12}\sigma\psi_{2\beta})L_2\sigma \right) dt; \quad (6)$$

Произведя замену:

$$i_{1\alpha} = L_2\sigma\psi_{1\alpha} - L_{12}\sigma\psi_{2\alpha};$$

$$i_{1\beta} = L_2\sigma\psi_{1\beta} - L_{12}\sigma\psi_{2\beta};$$

$$1,5pk_2/L'_1(\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}) =$$

$$= 1,5p/(\psi_{1\alpha}i_{1\beta} - \psi_{1\beta}i_{1\alpha});$$

$$\psi_{2\alpha} = \frac{L_2}{L_{12}}\psi_{1\alpha} - i_{1\alpha} \frac{1}{\sigma L_{12}};$$

$$\psi_{2\beta} = \frac{L_2}{L_{12}}\psi_{1\beta} - i_{1\beta} \frac{1}{\sigma L_{12}};$$

и учитывая, что  $L_2/L_{12} \approx 1$ ;  $1/\sigma L_{12} \ll 1$ , запишем закон управления (6) в упрощенном варианте:

$$u_{1\alpha}^* = -\gamma_1 \int \begin{cases} -h_{11}'(\psi_{1\alpha}i_{1\beta} - \psi_{1\beta}i_{1\alpha}) - \\ -M_3)\psi_{1\beta} + h_{22}'(\psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2 - \psi_{13}^2) \\ -\psi_{13}^2)\psi_{1\alpha} + h_{33}'I_1^2i_{1\alpha} \end{cases} dt;$$

$$u_{1\beta}^* = -\gamma_2 \int \begin{cases} -h_{11}'(\psi_{1\alpha}i_{1\beta} - \psi_{1\beta}i_{1\alpha}) - \\ -M_3)\psi_{1\alpha} + h_{22}'(\psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2 - \psi_{13}^2) \\ -\psi_{13}^2)\psi_{1\beta} + h_{33}'I_1^2i_{1\beta} \end{cases} dt, \quad (7)$$

где

$$h_{11}' = 2,25h_{11}p^2k_2/L'_1;$$

$$h_{22}' = 2h_{22}; \quad h_{33}' = 2h_{33}L_2\sigma.$$

Структурная схема, соответствующая закону управления (7) представлена на рис. 1. Учитывая, что для реализации полученного управления необходимо иметь информацию о текущих значениях потокосцеплений статора, структурная схема дополнена наблюдющим устройством, которое производит их оценку в соответствии с зависимостями [3]:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} + \psi_{1\alpha} &= \tau_1(u_{1\alpha} - i_{1\alpha}R_1); \\ \tau_1 \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} + \psi_{1\beta} &= \tau_1(u_{1\beta} - i_{1\beta}R_1). \end{aligned} \right\}$$

Проверка полученного закона управления (6) производилась с использованием компьютерного моделирования. При моделировании использовались параметры асинхронного двигателя марки 4A80A4SY3 со следующими величинами задающих воздействий:  $M_3=7$  Нм;  $\Psi_3=1$  Вб.

Учитывая то, что рекомендаций по выбору элементов матриц  $\Gamma$  и  $H$  в [1] не приводится, настройка системы управления осуществлялась в интерактивном режиме.

В результате диагональные элементы матрицы  $\Gamma$  были приняты равными 1000.

Элементы матрицы  $H$  определяют вес участия

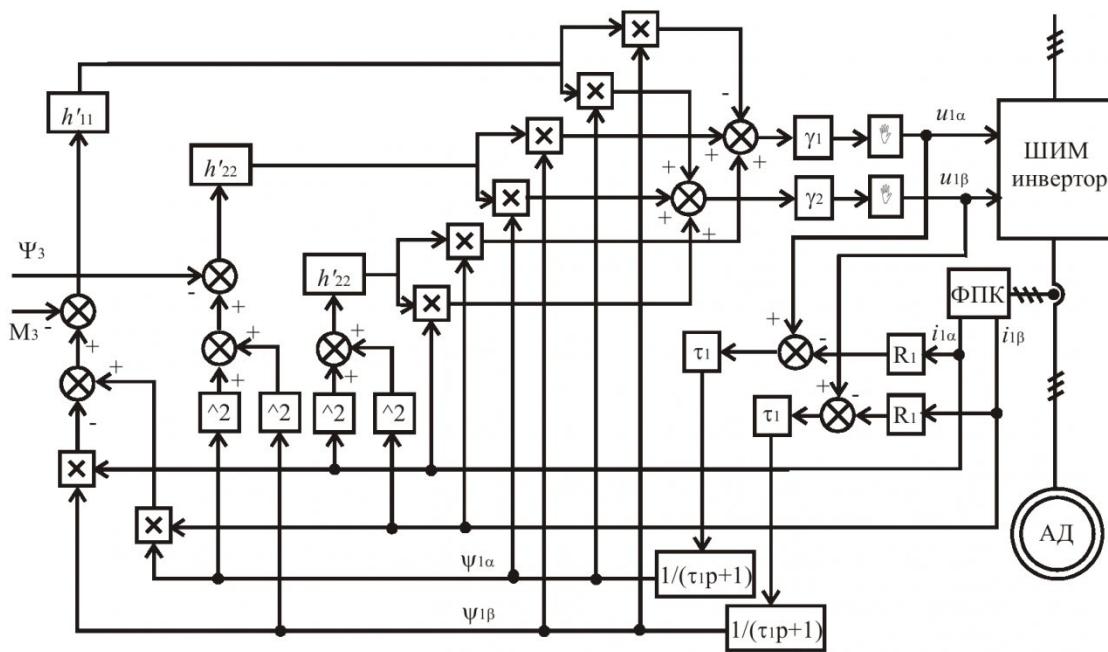


Рис. 1. Структурная схема многокритериальной системы управления асинхронным двигателем

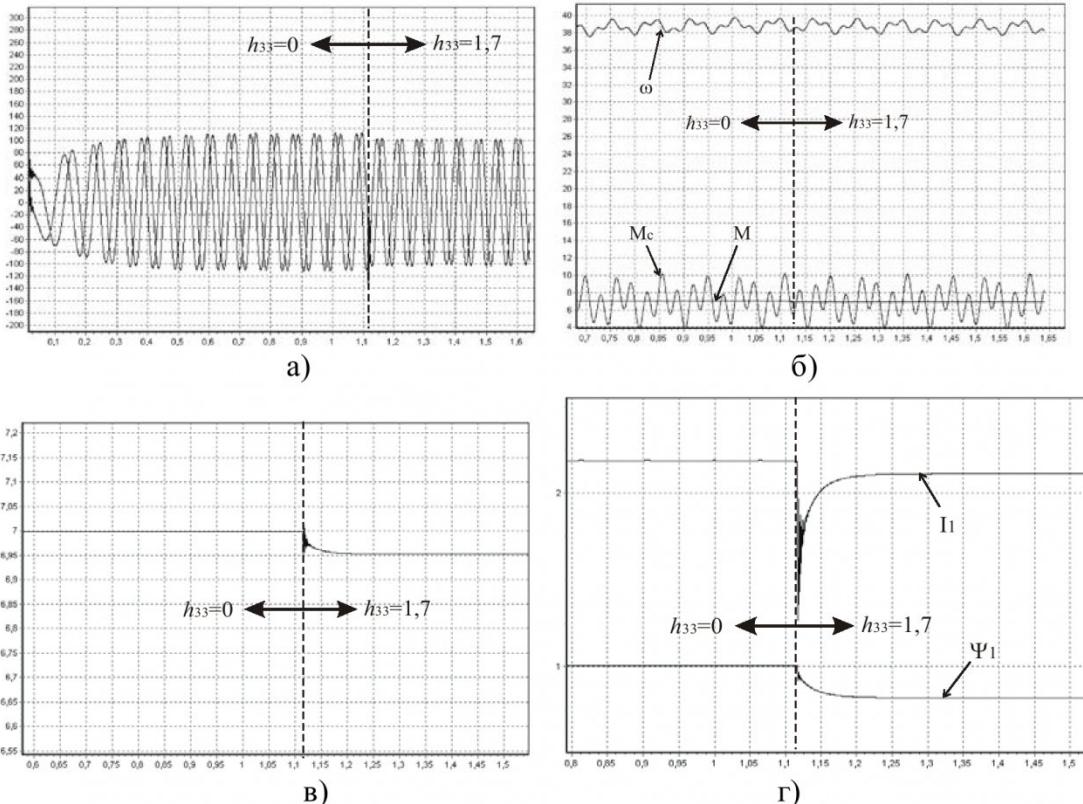


Рис. 2. Результаты моделирования: а) зависимости составляющих вектора напряжения статора  $u_{1\alpha}$  и  $u_{1\beta}$  от времени; б) зависимости момента сопротивления  $M_c$ , электромагнитного момента  $M$  и частоты вращения  $\omega$  от времени; в) зависимость электромагнитного момента от времени; г) зависимости вектора тока статора  $I_1$  и вектора потокосцепления статора  $\Psi_1$  от времени.

выбранных критериев управления в формировании вектора управляющего напряжения. В результате настройки были выбраны следующие величины коэффициентов:  $h_{11}=2000$ ;  $h_{22}=250$ ;  $h_{33}=1,7$ .

Результаты моделирования представлены на

рис. 2. Для наглядности на рисунках также представлены результаты моделирования без критерия минимизации тока статора ( $h_{33}=0$ ). Анализируя полученные данные можно увидеть, что основная цель управления, стабилизация электромагнитного момента, выполняется с достаточно хорошей

точностью. Введение критерия минимизации тока снижает точность регулирования момента с 0,05 до 0,64%, что приемлемо для большинства практических задач управления.

В то же время введение критерия минимума тока статора снижает ток статора на 4,5%, а также снижает величину потокосцепления статора на 21%. В результате происходит снижение потерь

энергии, как в меди статора, так и существенное снижение потерь энергии в стали машины.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования показали работоспособность полученного многокритериального закона управления АД с выполнением всех поставленных целей управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирошник И.В. Нелинейное адаптивное управление сложными динамическими системами / Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. – Спб.: "Наука", 2000г. 549 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
2. Proceedings of the IEEE. Sensorless Control of Induction Motor Drives, Joachim Holtz, Vol. 90, No. 8, Aug. 2002, pp. 1359 – 1394.

□ Авторы статьи:

Завьялов  
Валерий Михайлович  
- канд.техн.наук, доц. каф. электропривода и автоматизации

Неверов  
Андрей Александрович  
- ассистент каф. электропривода и автоматизации

Семыкина  
Ирина Юрьевна,  
- студентка

**УДК 621.313.332**

**Г.И. Разгильдеев, Р.А. Храмцов**

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ИНДИВИДУАЛЬНУЮ СЕТЬ СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В последние годы, в связи с поисками путей энергосбережения в различных отраслях хозяйства, возник интерес к энергетическим комплексам, потребляющим нетрадиционные энергоресурсы. При электроснабжении небольших животноводческих комплексов, например, в качестве первично-го энергоносителя можно рассматривать биогаз, а в качестве генератора - асинхронный двигатель, приводимый двигателем внутреннего сгорания. Возможностями применения простого в эксплуатации асинхронного генератора (АГ) в небольших по мощности (до 100 кВт) электростанциях посвящено ряд исследований, в которых отмечаются трудности поддержания частоты генерируемого напряжения при наличии индуктивной нагрузки.

Для возбуждения АГ применяют конденсаторы емкостью, зависящей от характера и режима нагрузки. Найти законы регулирования емкости конденсаторов можно моделированием работы АГ с разным характером и уровнем нагрузки.

Анализ публикаций, посвященных разработкам математических моделей АГ, показывает разнообразие методов преобразований и описаний электрической машины. Различия в математических описаниях АГ заключаются в результате исследования, т.е. какой результат необходимо получить при моделировании. Определив объект исследования, технические условия, точность результатов расчета, что позволит сделать возможные допущения, получим интересующую нас математическую модель.

На основе математического описания АГ [1] составлена модель с помощью средства визуального моделирования Simulink из пакета Matlab (рис. 1).

В предложенной модели АГ влияние насыщения моделируется путем использования динамических индуктивностей, а потери в стали учитываются с помощью дополнительной (фиктивной) обмотки статора.

Дифференциальные уравнения АГ в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$  имеют вид:

для обмотки статора

$$\begin{aligned} -u_{1\alpha} &= i_{1\alpha}r_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_{1\alpha}}{dt} + \frac{d\Psi_{\delta\alpha}}{dt}, \\ -u_{1\beta} &= i_{1\beta}r_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_{1\beta}}{dt} + \frac{d\Psi_{\delta\beta}}{dt}; \end{aligned}$$

для фиктивной обмотки статора

$$\begin{aligned} 0 &= i_{\mu\alpha}r_{\mu\alpha} + L_{\sigma\mu\alpha} \frac{di_{\mu\alpha}}{dt} + \frac{d\Psi_{\delta\alpha}}{dt}, \\ 0 &= i_{\mu\beta}r_{\mu\beta} + L_{\sigma\mu\beta} \frac{di_{\mu\beta}}{dt} + \frac{d\Psi_{\delta\beta}}{dt}; \end{aligned}$$

для обмотки ротора

$$\begin{aligned} 0 &= i_{2\alpha}r_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_{2\alpha}}{dt} + \\ &+ \frac{d\Psi_{\delta\alpha}}{dt} + \omega_p L_{\sigma 2} i_{2\beta} + \omega_p \Psi_{\delta\beta}, \end{aligned}$$