УДК 621.313.323

МЕТОДИКА СИНТЕЗА СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЕКТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА КООРДИНАТ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАШИН

В.Ф. ГЛАЗУНОВ, В.В. ПИКУНОВ, А.А. РЕПИН

(Ивановский государственный энергетический университет)

При решении задач автоматизации текстильного производства широкое распространение среди электроприводов (ЭП) текстильных машин получили ЭП переменного тока, в частности, синхронные ЭП [5]. В прядильных машинах типа ПП, МФ и других синхронные ЭП вращают прядильные диски, дозирующие насосы и фрикционные цилиндры.

Среди синхронных двигателей в ЭП малой мощности широкое распространение получили двигатели, в которых для создания поля возбуждения используются постоянные магниты [3].

Постоянное совершенствование современных микропроцессорных средств сделало возможной программную реализацию весьма сложных законов управления ЭП с синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ), в частности, законов многоканального (векторного) управления. Теория синтеза многоканального управления, снимающая практически все ограничения по размерности управляемого объекта и характеру нелинейных взаимодействий в нем, получила свое продолжение в рамках синергетического подхода, разработанного А.А. Колесниковым [2].

Развитие синергетического подхода создало реальные предпосылки к разработке и реализации более эффективных законов управления в управляемом ЭП переменного тока как пути дальнейшего наращивания его качественных характеристик. В этой связи широкое использование СДПМ в ЭП малой мощности обусловило актуальность применения синергетического подхода при синтезе векторных регуляторов для ЭП на базе таких двигателей.

На основе общепринятых допущений и упрощений [4] получим вначале нелинейную математическую модель СДПМ в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши.

В системе координат dq [3], вращающейся вместе с ротором, с учетом уравнений баланса напряжений обмоток статора, уравнений для компонентов вектора потокосцепления обмоток статора и уравнения движения ротора [4] нелинейная модель СДПМ будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d\gamma_{эл}}{dt} = \omega_{эл}, \\ \dfrac{d\omega_{эл}}{dt} = \dfrac{3p_п^2(L_d - L_q)}{2J} i_d i_q + \dfrac{3p_п^2\Psi_{пм}}{2J} i_q - \dfrac{p_п}{J} M_c, \\ \dfrac{di_d}{dt} = \dfrac{1}{L_d} U_d - \dfrac{R}{L_d} i_d + \dfrac{L_q}{L_d} i_q \omega_{эл}, \\ \dfrac{di_q}{dt} = \dfrac{1}{L_q} U_q - \dfrac{R}{L_q} i_q - \dfrac{L_d}{L_q} i_d \omega_{эл} - \dfrac{\Psi_{пм}}{L_q}\omega_{эл}, \end{cases} \quad (1)$$

где R – активное сопротивление обмотки статора; L_d, L_q – индуктивности обмотки статора по осям d и q; i_d, i_q – компоненты вектора тока статора по осям d и q; U_d, U_q – компоненты вектора напряжения статора по осям d и q; $\omega_{эл}$ – электрическая скорость вращения ротора; $\gamma_{эл}$ – электрический угол поворота ротора; $\Psi_{пм}$ – потокосцепление постоянных магнитов; $p_п$ – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя; M_c – статический момент сопротивления на валу двигателя.

Представим (1) в форме пространства состояний [1]:

$$\dot{x} = A(x)x + Bu - G\vartheta, \qquad (2)$$

где $x \in \Re^4$ – вектор фазовых координат: $x_1 = \gamma_{эл}$, $x_2 = \omega_{эл}$, $x_3 = i_d$, $x_4 = i_q$; $u \in \Re^2$ – вектор управляющих воздействий: $u_1 = U_d$, $u_2 = U_q$; $\vartheta = M_c$ – постоянное измеряемое возмущение;

$$A(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{3p_п^2\left(L_d - L_q\right)}{2J}x_4 & \dfrac{3p_п^2\Psi_{пм}}{2J} \\ 0 & 0 & -\dfrac{R}{L_d} & \dfrac{L_q}{L_d}x_2 \\ 0 & -\dfrac{\Psi_{пм}}{L_q} & -\dfrac{L_d}{L_q}x_2 & -\dfrac{R}{L_q} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \dfrac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{L_q} \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{p_п}{J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Определим далее типы инвариантов, которые должна отрабатывать синтезируемая система управления СДПМ.

Из синергетической теории управления известно, что совокупность критериев управления или набор желаний проектировщика системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов [2].

СДПМ как объект управления имеет только два управляющих канала, поэтому для него можно задать не более двух инвариантов. Первым определим технологический инвариант, в качестве которого примем стабилизацию частоты вращения вала двигателя:

$$\phi_1 = x_2 - x_{20} = 0, \qquad (3)$$

где x_{20} – заданная частота вращения вала.

Для обеспечения максимального электромагнитного момента при фиксированном токе статора необходимо, чтобы продольная составляющая тока статора i_d была равна нулю. Исходя из этого второй (электромагнитный) инвариант будет выглядеть следующим образом:

$$\phi_2 = x_3 = 0. \qquad (4)$$

Согласно процедуре аналитического конструирования агрегированных регуляторов [2] для модели (2) вводится вектор агрегированных макропеременных $\Psi^1 \in \Re^2$. Очевидно, что на данном этапе синтеза возможно решение задачи выполнения инварианта (4). Тогда вектор макропеременных выбираем в следующем виде [1]:

$$\Psi^1 = P\left(x^1 + \varphi^1\right), \qquad (5)$$

где $\Psi^1 = \begin{bmatrix}\Psi_1^1 & \Psi_2^1\end{bmatrix}^T$ – вектор макропеременных; $\varphi^1 = \begin{bmatrix}0 & \varphi_2^1\end{bmatrix}^T$ – вектор внутренних управлений; $x^1 = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$; $P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}$ – числовая матрица.

При этом вектор макропеременных (5) должен удовлетворять решению векторного дифференциального уравнения [1]:

$$\dot{\Psi}^1 + \Lambda^1\Psi^1 = 0, \qquad (6)$$

где $\Lambda^1 = \mathrm{diag}\left(\lambda_1^1, \lambda_2^1\right)$.

Для обеспечения асимптотической устойчивости решения уравнения (6) необходимо выполнение следующего условия [1]:

$$\lambda_1^1, \lambda_2^1 > 0.$$

По окончании переходных процессов ($\psi^1 = 0$), скорость протекания которых обусловливается величинами λ_1^1 и λ_2^1, происходит динамическая декомпозиция замкнутой системы [1]. Тогда движение изображающей точки замкнутой системы управления СДПМ может быть представлено векторным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\dot{\bar{x}}^1 = \tilde{A}\bar{x}^1 + \tilde{B}^1(\mathbf{x})\varphi_2^1 - \tilde{G}^1\vartheta, \qquad (7)$$

где $\bar{x}^1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ – декомпозированный вектор состояния; $\tilde{A}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\tilde{B}^1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{3p_п^2(L_d - L_q)}{2J} \end{bmatrix}$;

$\tilde{G}^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{p_п}{J} \end{bmatrix}$.

На следующем этапе синтеза для системы (7) вводится макропеременная :

$$\Psi_1^2 = x_2 - x_{20}, \qquad (8)$$

которая должна удовлетворять решению дифференциального уравнения

$$\dot{\Psi}_1^2 + \lambda_1^2\Psi_1^2 = 0, \qquad (9)$$

где $\lambda_1^2 > 0$ обеспечивает асимптотически устойчивое решение уравнения (9).

Очевидно, что решением дифференциального уравнения (9) является $\Psi_1^2 = 0$. Из чего следует, что в замкнутой системе при попадании изображающей точки в окрестность многообразия $\Psi_1^2 = 0$ будет выполняться технологический инвариант (3).

Из совместного решения (7)…(9) определим внутреннее управление:

$$\varphi_2^1 = \frac{2\lambda_1^2 J}{3p_п^2\Psi_{пм}}(x_2 - x_{20}) - \frac{2}{3p_п\Psi_{пм}}\vartheta. \qquad (10)$$

Далее, совместно решая (2), (5) и (6) с учетом (10), определим элементы вектора управляющего воздействия:

$$u = -(B^1)^{-1}\left[A^1(x)x + \frac{d\varphi^1}{dt} + P^{-1}\Lambda^1\Psi^1\right], \qquad (11)$$

где $A^1(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\dfrac{R}{L_d} & \dfrac{L_q}{L_d}x_2 \\ 0 & -\dfrac{\Psi_{пм}}{L_q} & -\dfrac{L_d}{L_q}x_2 & -\dfrac{R}{L_q} \end{bmatrix}$; $B^1 = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{L_q} \end{bmatrix}$.

Объединяя векторные дифференциальные уравнения (2) и (11), получаем систему, решение которой обеспечит требуемое качество переходных процессов:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x)x + Bu - G\vartheta, \\ u = -(B^1)^{-1}\left[A^1(x)x + \dfrac{d\varphi^1}{dt} + P^{-1}\Lambda^1\Psi^1\right]. \end{cases} \qquad (12)$$

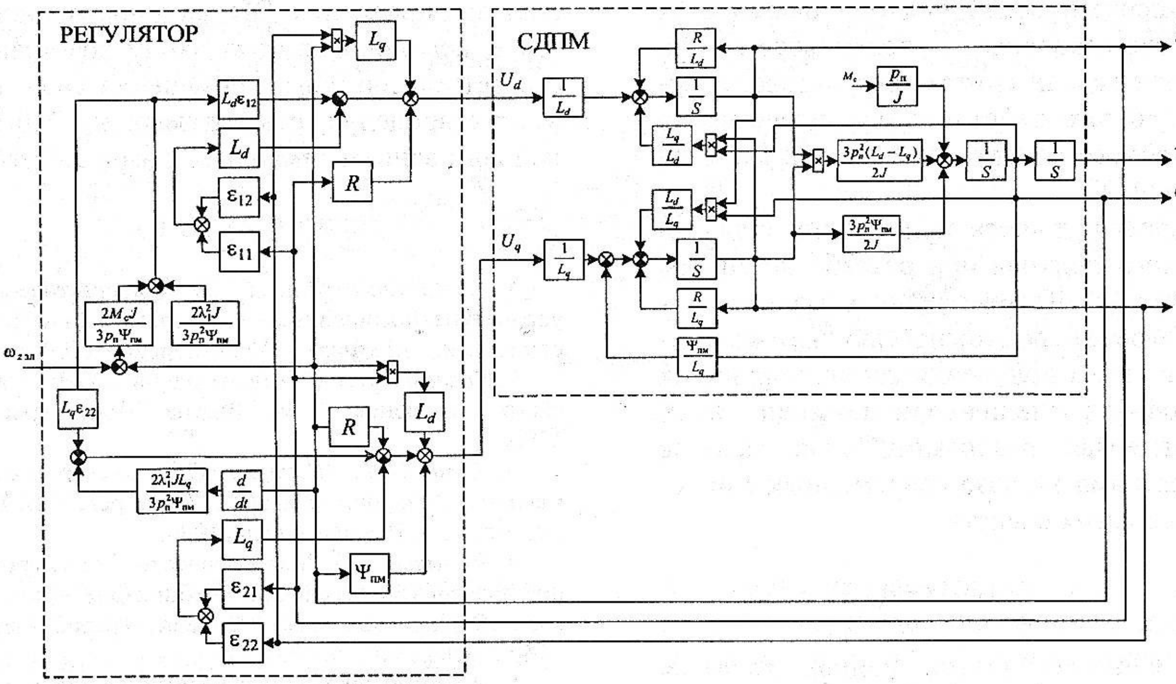

Рис. 1

Если представить (12) после некоторых преобразований в виде системы обычных дифференциальных уравнений, можно получить структурную схему математической модели на базе СДПМ с синергетическим векторным регулятором (рис. 1). На этой схеме приняты следующие обозначения:

$\omega_{z\text{эл}}$ – заданная величина электрической скорости ротора СДПМ;

$$\varepsilon_{11} = \frac{p_{11}p_{22}\lambda_1^1 - p_{12}p_{21}\lambda_2^1}{p_{11}p_{22} - p_{12}p_{21}};$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{p_{12}p_{22}\left(\lambda_1^1 - \lambda_2^1\right)}{p_{11}p_{22} - p_{12}p_{21}};$$

$$\varepsilon_{21} = \frac{p_{11}p_{21}\left(\lambda_1^1 - \lambda_2^1\right)}{p_{11}p_{22} - p_{12}p_{21}};$$

$$\varepsilon_{22} = -\frac{p_{12}p_{21}\lambda_1^1 - p_{11}p_{22}\lambda_2^1}{p_{11}p_{22} - p_{12}p_{21}}.$$

Результаты расчета динамических характеристик разработанной математической модели, полученные в среде Simulink MATLAB 6.1, представлены на рис. 2.

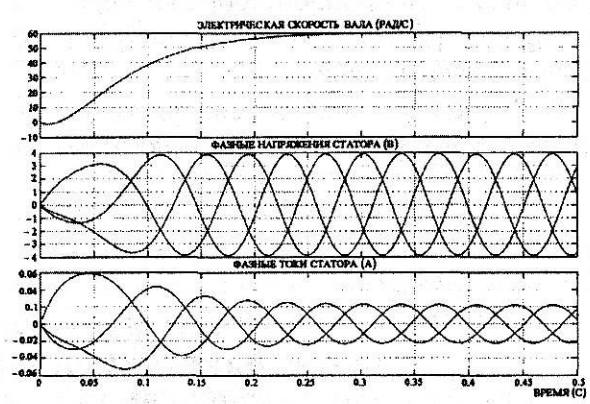

Рис. 2

Расчет проводился при следующих параметрах СДПМ, системы управления и нагрузки: $R = 39{,}81$ (Ом); $L_d = 7{,}757$ (мГн); $L_q = 6{,}5$ (мГн); $\Psi_{\text{пм}} = 0{,}061$ (Вб); $p_{\text{п}} = 4$; $J = 1{,}247 \cdot 10^{-4}$ (кг $\cdot$ м^2); $\omega_{z\text{эл}} = 60$ (рад/с); $M_c = 0{,}01$ (Н $\cdot$ м); $\lambda_1^1 = 30$; $\lambda_2^1 = 40$; $\lambda_1^2 = 20$; $p_{11} = 1$; $p_{12} = 3$; $p_{21} = 3$; $p_{22} = 1$.

Полученные результаты расчета позволяют сделать вывод о том, что синтезированная система управления СДПМ удовлетворяет введенным инвариантам (3), (4) и с высокой точностью отрабатывает заданные технологические уставки.

Синергетический подход показал себя высокоэффективным инструментом при решении задачи синтеза регулятора, координирующего работу такого существенно нелинейного объекта управления, как синхронный ЭП.

Перспективность применения синергетического подхода при разработке систем управления ЭП текстильных машин обусловливается возможностью автоматизации процесса получения координирующих законов управления при помощи ЭВМ. Практическая реализация этих законов осуществима на базе современных микропроцессорных средств.

ВЫВОДЫ

1. Синергетический подход является эффективным инструментом при решении задачи синтеза и реализации на базе современных микропроцессорных средств векторных регуляторов для синхронного ЭП текстильных машин.

2. Методика синтеза синергетических регуляторов применима при построении систем управления ЭП как постоянного, так и переменного тока ввиду возможности автоматического применения аналитических процедур, реализуемых на ЭВМ с использованием символьных вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Колесников А.А. и др.* Синергетическое управление нелинейными электромеханическими системами. – М.: Фирма "Испо-Сервис", 2000.

2. *Колесников А.А.* Основы теории синергетического управления. – М.: Фирма "Испо-Сервис", 2000.

3. *Осин И.Л., Шакарян Ю.Г.* Электрические машины: Синхронные машины / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1990.

4. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов по спец. "Электромеханика". – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1994.

5. Автоматизированный электропривод в текстильной и легкой промышленности // Тр. 1-й Всесоюз. конф. – М.: Энергия, 1972.

Рекомендована кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок. Поступила 31.01.05.