

УДК 621.313.323

МЕТОДИКА СИНТЕЗА РОБАСТНОЙ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАШИН

*В.Ф. ГЛАЗУНОВ, А.А. РЕПИН**(Ивановский государственный энергетический университет)*

В текстильной промышленности синхронные электроприводы (ЭП) широко используются в прядильном производстве. В частности, такие ЭП вращают прядильные диски, дозирующие насосы и фрикционные цилиндры прядильных машин [1].

На сегодняшний день в развитии синхронного ЭП малой и средней мощности (до нескольких десятков киловатт) прослеживается тенденция к применению синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) [2]. Такие двигатели, являясь бесконтактными, имеют большой воздушный зазор, что значительно повышает их надежность, высокие энергетические и массогабаритные показатели, высокую стабильность частоты вращения.

Указанные достоинства открывают возможность построения на основе СДПМ высокоточных прецизионных ЭП с широким диапазоном регулирования скорости и момента.

Точность поддержания постоянства толщины волокна, вырабатываемого прядильной машиной, напрямую зависит от стабильности скорости вращения синхронного ЭП. Данное обстоятельство обуславливает высокие требования к системе управления, в первую очередь, в отношении инвариантности к изменениям параметров нагрузки на валу, а также к изменениям параметров самого двигателя, неизбежным в процессе эксплуатации.

В связи с вышесказанным задача обеспечения робастности системы ЭП, то есть малой чувствительности к разбросам параметров и различным погрешностям [3], приобретает особую актуальность.

Одним из концептуально новых и наиболее перспективных подходов, позволяющих синтезировать системы, обладающие свойством робастности, является синергетический подход. Этот подход, по мнению академика РАН А.А. Красовского, должен занять одно из центральных мест в современной прикладной теории управления [3].

Наиболее ценными сторонами синергетического подхода в управлении являются:

- минимальное вмешательство в естественное движение управляемых объектов, определяемое физическими законами управления;
- нелинейная и неоднозначная динамика, поиск наилучших вариантов;
- самоорганизация;
- использование аттракторов и других естественных многообразий, инвариантов, соответствующих законам сохранения, бифуркаций.

Значимая особенность синергетических систем управления заключается в отсутствии необходимости строго поддерживать внутренние параметры. Важным является лишь то, чтобы система попадала на заданное инвариантное многообразие – аттрактор, на котором обязательно поддерживается желаемое соотношение между

координатами объекта [3]. Другими словами, несмотря на разного рода внутренние шумы и параметрические возмущения, синергетическая система решает поставленную перед ней задачу – неизбежно устремляется к желаемому аттрактору и достигает его через некоторое время.

Согласно принципам синергетики именно в этом проявляется свойство самоорганизации, а указанный аттрактор связан с "параметрами порядка", которым подчиняются все другие переменные системы. Сама же система всегда асимптотически и экспоненциально устойчива в целом относительно этого аттрактора.

Из теории устойчивости известно, что такое свойство устойчивости является грубым свойством динамических систем. Отсюда следует, что синергетические системы обладают робастной устойчивостью к параметрическим возмущениям.

Замечательное свойство робастности синергетических систем управления стало одним из определяющих факторов, обусловивших актуальность применения синергетического подхода при разработке перспективных синхронных ЭП текстильных машин. Ранее в [4] нами была предложена методика синтеза синергетического векторного регулятора (СВР) координат ЭП на базе СДПМ, обеспечивающего высокую стабильность частоты вращения вала при максимальном моменте (продольная составляющая тока статора i_d поддерживается равной нулю).

Математическое моделирование замкнутой системы ЭП с СВР подтвердило удовлетворительную ее робастность. Изменение параметров двигателя или нагрузки на валу вызывало лишь изменение времени отработки системой сигнала задания по скорости. Технологический инвариант стабилизации скорости выполнялся в любом случае.

Однако был выявлен следующий недостаток – вариация сопротивления фазы статорной цепи в относительно небольших пределах значительно (на порядок (!)) за-

тягивало переходный процесс по скорости. Также при выводе векторных законов управления ЭП с СДПМ [4] информация о моменте нагрузки на валу двигателя полагалась заранее известной. Очевидно, что в реальных условиях сколь-нибудь точное прямое измерение момента практически невозможно.

Указанные выше недостатки обуславливают необходимость постановки задачи о косвенной оценке величин сопротивления фазы статора R и момента нагрузки M_c . Это позволит улучшить робастность системы и, что очень важно, сохранить ее высокое быстродействие.

Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), являющийся основой теории синергетического управления, позволяет осуществлять идентификацию координат и параметров объекта управления при помощи асимптотических наблюдателей состояния и воздействий. Совместное решение задач управления и идентификации в соответствии с процедурой метода АКАР получило название нелинейной адаптации на многообразиях [3].

Прежде чем приступить к построению наблюдателя, необходимо привести здесь дифференциальные уравнения замкнутой системы СДПМ – СВР. В векторно-матричной форме эти уравнения будут иметь вид [4]:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x)x + Bu - G\vartheta; \\ u = -(B^1)^{-1} \left[A^1(x)x + \frac{d\varphi^1}{dt} + P^{-1}\Lambda^1\Psi^1 \right], \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

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

$$A(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3p_p^2(L_d - L_q)}{2J}x_4 & \frac{3p_p^2\Psi_{\text{пм}}}{2J} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L_d} & \frac{L_q}{L_d}x_2 \\ 0 & -\frac{\Psi_{\text{пм}}}{L_q} & -\frac{L_d}{L_q}x_2 & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ p_p \\ J \\ 0 \end{bmatrix};$$

$\gamma_{\text{эл}}$ – электрический угол поворота ротора;
 $\omega_{\text{эл}}$ – электрическая скорость вращения ротора;
 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;
 M_c – момент сопротивления на валу двигателя;
 R – активное сопротивление фазы обмотки статора;
 L_d, L_q – индуктивности обмотки статора по осям d и q;
 $\Psi_{\text{пм}}$ – эквивалентное потокосцепление постоянных магнитов;
 p_p – число пар полюсов;
 J – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя;
 $\varphi^1 = \begin{bmatrix} 0 & \varphi_2^1 \end{bmatrix}^T$ –

вектор внутренних управлений;
 $\Psi^1 = P(x^1 + \varphi^1)$ – вектор агрегированных макропеременных;
 $x^1 = [x_3 \ x_4]^T$;
 $\Lambda^1 = \text{diag}(\lambda_1^1, \lambda_2^1)$; $\varphi_2^1 = \frac{2\lambda_2^1 J}{3p_p^2 \Psi_{\text{пм}}}(x_2 - x_{20}) - \frac{2}{3p_p \Psi_{\text{пм}}} \vartheta$;
 λ_1^1, λ_2^1 и λ_2^1 – коэффициенты, обеспечивающие асимптотическую устойчивость и требуемую скорость переходных процессов замкнутой системы;
 $x_{20} = \omega_{z\text{эл}}$ – заданная частота вращения вала;

$$A^1(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{R}{L_d} & \frac{L_q}{L_d}x_2 \\ 0 & -\frac{\Psi_{\text{пм}}}{L_q} & -\frac{L_d}{L_q}x_2 & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix}, \quad B^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ L_d & 1 \\ 0 & L_q \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \text{ – числовая матрица.}$$

В первую очередь для построения наблюдателя необходимо расширить исходное математическое описание объекта управления, дополнив его уравнениями, описывающими реальные параметры как частные решения некоторых дифференциальных уравнений [5].

Для нашего случая правомерно принять на интервале наблюдения момент нагрузки M_c и сопротивление фазы статора R постоянными. Тогда с учетом (1) расширенную систему уравнений СДПМ можно представить в следующем виде [5]:

$$\begin{cases} \dot{y} = g(y, v, u), \\ \dot{v} = h(y, v, u), \end{cases} \quad (3)$$

где y – вектор измеряемых координат объекта;
 v – вектор неизменяемых координат объекта;
 u – вектор управления;
 g, h – непрерывные нелинейные функции.

Задача синтеза наблюдателя заключается в построении асимптотической оценки вектора v по измеряемым значениям вектора y и известному как функции времени вектору u [5].

Очевидно, что в рассматриваемом здесь случае

$$\begin{cases} y = x, \\ v = [M_c \quad R]^T, \\ g(y, v, u) = A(y)y + Bu - G\vartheta, \\ h(y, v, u) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Предположим, что для заданных функций $g(y, v, u)$ и $h(y, v, u)$ найдутся такие векторы $\varphi(y, v)$, $\gamma(y, u)$ и матрицы $\Gamma(y)$, $L(y)$, что оказывается выполненным равенство [5]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial y} g(y, v, u) + \frac{\partial \varphi}{\partial v} h(y, v, u) - L(y)\varphi(y, v) = \\ = \Gamma(y)g(y, v, u) + \gamma(y, u). \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда задача синтеза наблюдателя сводится к нахождению функций $\varphi(y, v)$, $\Gamma(y)$, $L(y)$ и $\gamma(y, u)$, удовлетворяющих соотношению (5), подстановка которых в приведенные ниже уравнения наблюдателя обеспечит требуемую идентификацию вектора v .

Уравнения наблюдателя приведем здесь без вывода [5]:

$$\begin{cases} \dot{z} = L(y)z - L(y) \int_0^y \Gamma(y) dy - \gamma(y, u), \\ \varphi(y, \hat{v}) = \int_0^y \Gamma(y) dy - z, \end{cases} \quad (6)$$

где \hat{v} – асимптотическая оценка вектора неизмеряемых координат v объекта; z – вектор промежуточных переменных.

Если принять $\varphi(y, v) = \varphi(v) = v$, то с учетом (4) уравнение (5) в нашем случае примет вид:

$$-L(y)v = \Gamma(y)[A(y)y + Bu - G\vartheta] + \gamma(y, u). \quad (7)$$

Определить $L(y)$, $\Gamma(y)$ и $\gamma(y, u)$ можно различными способами. Наиболее простые выражения для наблюдателя получаются, если выбрать вышеуказанные функции в виде:

$$\begin{aligned} L(y) = L = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix}; \quad \Gamma(y) = \begin{bmatrix} 0 & \Gamma_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_{23} & 0 \end{bmatrix}; \\ \gamma(y, u) = \begin{bmatrix} -\Gamma_{12} \left[\frac{3p_{\Pi}^2(L_d - L_q)}{2J} y_3 y_4 + \frac{3p_{\Pi}^2 \Psi_{\text{пм}}}{2J} y_4 \right] \\ -\Gamma_{23} \left[\frac{1}{L_d} u_1 + \frac{L_q}{L_d} y_2 y_4 \right] \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

При подстановке этих выражений в (7) находим

$$\begin{aligned} \Gamma(y) = L\Gamma^1(y); \quad \Gamma^1(y) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{J}{p_{\Pi}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_d}{y_3} & 0 \end{bmatrix}; \\ \gamma(y, u) = -L\gamma^1(y, u); \quad \gamma^1(y, u) = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} p_{\Pi} [(L_d - L_q) y_3 y_4 + \Psi_{\text{пм}} y_4] \\ \frac{1}{y_3} [u_1 + L_q y_2 y_4] \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Согласно (6) с учетом полученных функций $\Gamma(y)$ и $\gamma(y, u)$ и матрицы L иско-

мые уравнения наблюдателя будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{z} = L[z - L\Gamma^2(y) + \gamma^1(y, u)], \\ \hat{v} = L\Gamma^2(y) - z, \end{cases} \quad (8)$$

где $y = x$; $z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$, $\hat{v} = \begin{bmatrix} \hat{M}_c \\ \hat{R} \end{bmatrix}$;

$$\Gamma^2(y) = \int_0^y \Gamma^1(y) dy = \begin{bmatrix} \frac{J}{p_{11}} y_2 \\ L_d \ln y_3 \end{bmatrix}.$$

Очевидно, что совокупность систем уравнений (1), (2) и (8) представляет собой полную нелинейную математическую модель замкнутой синергетической системы управления ЭП на базе СДПМ.

Результаты расчета динамических характеристик разработанной модели при вариации параметров двигателя и набросе нагрузки на валу, полученные в среде Simulink MATLAB 6.5, представлены на рис. 1.

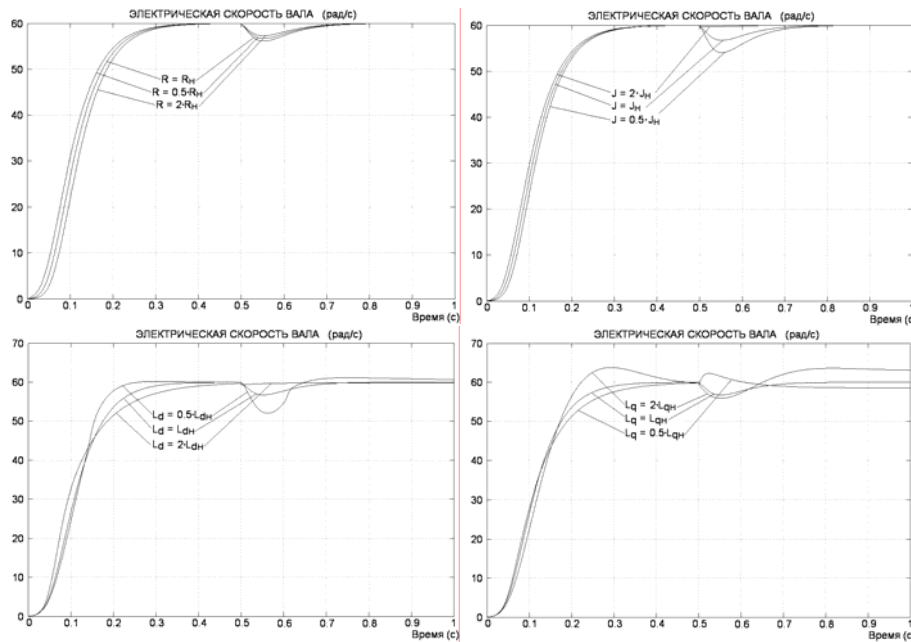


Рис. 1

ВЫВОДЫ

Расчет проводился при следующих параметрах замкнутой системы ЭП: $R = 39,81(\text{Ом})$; $L_d = 7,757(\text{мГн})$; $L_q = 6,5(\text{мГн})$; $\Psi_{\text{пм}} = 0,061(\text{Вб})$; $p_{11} = 4$; $J = 1,247 \cdot 10^{-4}(\text{кг} \cdot \text{м}^2)$; $M_c = 0,01(\text{Н} \cdot \text{м})$; $\lambda_1^1 = 30$; $\lambda_2^1 = 40$; $\lambda_1^2 = 20$; $p_{11} = 1$; $p_{12} = 3$; $p_{21} = 3$; $p_{22} = 1$; $L_1 = -1000$; $L_2 = -100$.

Из результатов моделирования можно заключить, что синтезированная система управления обеспечивает высокую стабильность скорости вращения при малой чувствительности к изменениям параметров двигателя и нагрузки на валу.

1. Принцип синергетического управления, совмещенный с асимптотической идентификацией (принцип нелинейной адаптации на многообразиях), позволяет обеспечить робастность синхронного электропривода к изменениям его параметров при сохранении высокой стабильности скорости вращения и максимального быстродействия системы управления.

2. Применение синергетического подхода при синтезе систем управления может существенно улучшить характеристики синхронного электропривода, что обеспечит высокую точность отработки текстильной машиной поставленных технологических задач.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

3. Синергетика и проблемы теории управления // Сб. науч. тр.: Под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004.

4. Глазунов В.Ф., Пикунов В.В., Репин А.А. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005, № 4.

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

Рекомендована кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок. Поступила 26.12.05.
