Таблица 2

Характеристики потока в сечение $\bar{z} = \bar{z}_c \approx 6,5$ **в камере с** $\bar{L}_к = 18,25$

$\bar{r}$	$\bar{w}_\varphi$	$\bar{P}_с$	$\bar{P}_п$	$\bar{w}_\varphi \bar{r}$	$\bar{w}_\varphi / \bar{r}$	$\bar{w}_\varphi^2 / \bar{r}$
0,0	0,15	-0,28	-0,26	0	-	-
0,2	0,32	-0,04	0,06	0,06	1,6	0,5
0,4	0,30	0,09	0,18	0,12	0,7	0,22
0,6	0,30	0,16	0,24	0,18	0,5	0,17
0,8	0,30	0,21	0,3	0,23	0,35	0,1
1,0	0,27	0,23	0,28	0,22	0,2	0,05

Как видно из табл. 2 распределения $\bar{w}_\varphi$ и $\bar{P}_с$ в сечение $\bar{z}_c$ соответствуют вышеприведенным данным. Значение $\bar{w}_\varphi / \bar{r}$ повышается, а $\bar{w}_\varphi \bar{r}$ снижается с уменьшением $\bar{r}$. Угловая скорость при малых $\bar{r}$ приобретает очень большую величину. В слабопроточной приосевой зоне у глухого торца угловая скорость имеет практически постоянное значение, что является признаком квазетвердого индуцированного вращения. При $\bar{r} = \bar{r}_я$ (при $\bar{w}_\varphi = \bar{w}_{\varphi я}$) независимо от $\bar{z}$ значение безразмерной угловой скорости и циркуляции равны соответственно 0,65 и 0,11.

Таким образом, в результате выполненных исследований

1. Установлены новые особенности формирования потока в рабочем объеме относительно длинных циклонных камер.

2. Получены расчетные соотношения для основных аэродинамических характеристик относительно длинных циклонных камер в диапазоне $\bar{L}_к =$ $= 6,25…18,25$.

Литература

1. *Абрамович, Г.Н.* Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М., 1960.

2. *Карпов, С.В.* Высокоэффективные циклонные устройства / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров. – Архангельск, 2002.

3. *Осташев, С.И.* Аэродинамика циклонных секционных нагревательных устройств / С.И. Осташев, Э.Н. Сабуров. – Архангельск, 2005.

4. *Сабуров, Э.Н.* О влиянии относительной длины циклонно-вихревых нагревательных камер на аэро-динамику греющего потока / Э.Н. Сабуров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 3. – С. 35 – 38.

5. *Сабуров, Э.Н.* Теория и практика циклонных сепараторов, топок и печей. / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов. – Архангельск, 2000.

6. *Сабуров, Э.Н.* Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э.Н. Сабуров. – Архангельск, 1995.

7. *Сабуров, Э.Н.* Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов. – М., 1993.

8. *Шлихтинг, Г.* Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М., 1969.

УДК 681.05.015

Т.Н. Кочнева, А.В. Кожевников, Н.В. Кочнев

СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДВУХМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье разработана математическая модель системы управления двухмассовой электромеханической системы с использованием модального регулятора желаемой эталонной формы на примере электропривода рольганга широкополосного листового прокатного стана. Проведено исследование показателей качества переходных процессов при управлении автоматизированной нелинейной двухмассовой электромеханической системой традиционной структуры подчиненного регулирования и с модальным регулятором. Показана высокая эффективность использования модального управления электроприводами в металлургических агрегатах с нежесткой механикой по сравнению с традиционными регуляторами и способами управления.

Модальное управление, синтез модального регулятора, электропривод рольганга широкополосного стана, нелинейная двухмассовая электромеханическая система, исследование качества переходных процессов.

In this paper, a mathematical model of the two-mass electromechanical control systems with the use of modal controller of desired reference is developed on the example of the drive roller conveyor of broadband sheet rolling mill. The study of quality of transient processes in the management of automated non-linear two-mass electromechanical system of traditional structure of the subordinate regulation and with the modal controller is carried out. The high efficiency of using the modal control of electric drives in metallurgical aggregates with non-rigid mechanics compared to traditional controllers and control methods is presented in the paper.

Modal control the synthesis of modal controller, the drive roller conveyor wide-strip, non-linear two-mass electromechanical system, the study of the quality of transients.

Одним из наиболее перспективных методов синтеза управляющих устройств, используемых в системах автоматизации, является модальное управление, предоставляющее разработчику широкие возможности в обеспечении требуемых показателей качества протекания процессов: повышение быстродействия, устранение колебательности при наличии упругости и люфтов в кинематических связях. В связи с этим в последнее время вопросы анализа и синтеза систем модального управления (СМУ) электроприводами становятся все более актуальными, им уделяется большое внимание [1].

В работе [2] описана математическая модель определения параметров модального регулятора желаемой формы, проведено исследование показателей качества переходных процессов при управлении электродвигателем рольганга прокатного стана, оценены показатели эффективности применения модальных регуляторов в системах управления электрических приводов.

В рамках развития исследовательской работы [2] выполним синтез модального регулятора (МР) для двухмассового электропривода с упругим механическим звеном. Упругое звено с коэффициентом жесткости C_{12} связывает две массы: ротора и рабочего органа с моментами инерции J_1 и J_2. В подобной системе при определенном соотношении параметров возможен резко колебательный характер движения. Задача управления: обеспечение заданных показателей в статике и динамике, обеспечение устойчивости и стабилизации движения.

Функциональная схема двухмассовой электромеханической системы с МР приведена на рис. 1.

Основные элементы схемы:

– усилитель У с коэффициентом усиления $K_у$;

– тиристорный преобразователь ТП с ЭДС $E_п$, коэффициентом усиления $K_п$ и постоянной времени $T_п$;

– двигатель постоянного тока независимого возбуждения Д с коэффициентом передачи $К_д$, сопротивлением якорной цепи $R_я$, электромагнитной $T_э$ и электромеханической $T_м$ постоянными времени, угловой скоростью ω и моментом трения $M_{с1}$;

– модальный регулятор с коэффициентами передачи входов $K_{о1} – K_{о5}$;

– упругое звено кинематическая цепь (КЦ) с коэффициентом жесткости C_{12};

– рабочий орган РО с моментом инерции J_2 и моментом сопротивления $M_{с2}$.

Напряжение управления $U_у$ формируется сравнением напряжения задания $U_з$ и напряжения модального регулятора $U_{мр}$.

Составим исходную систему уравнений:

$$\left.\begin{array}{l}(T_п \cdot p+1)\cdot E_п = K_у \cdot K_п \cdot U_у;\\ (T_э \cdot p+1)\cdot I_я = (E_п - \omega_1 / K_д)/R_я;\\ J_1 \cdot p\omega_1 = I_я / K_д - M_{с1} - M_{12};\\ M_{12} = C_{12}\cdot(\varphi_1 - \varphi_2);\\ J_2 \cdot p\omega_2 = M_{12} - M_{с2};\\ \omega_1 = p\varphi_1;\\ \omega_2 = p\varphi_2.\end{array}\right\}$$

Здесь M_{12} – упругий момент , ω_1 и φ_1 – угловая скорость и угол поворота двигателя, ω_2 и φ_2 – угловая скорость и угол поворота рабочего органа.

Выбираем переменные состояния:

$$x_1 = E_п, x_2 = I_я, x_3 = \omega_1, x_4 = M_{12}, x_5 = \omega_2 .$$

Решая систему уравнений относительно ω_2, получаем уравнение разомкнутого электропривода:

$$(d_0 p^5 + d_1 p^4 + d_2 p^3 + d_3 p^2 + d_4 p + d_5)\omega_2 =$$

$$K_0 U_y - b_0 M_{c1}/\beta - (b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + b_4 p + b_5)M_{c2}/\beta; \quad (2)$$

где $K_0 = K_y \cdot K_n \cdot K_\partial$.

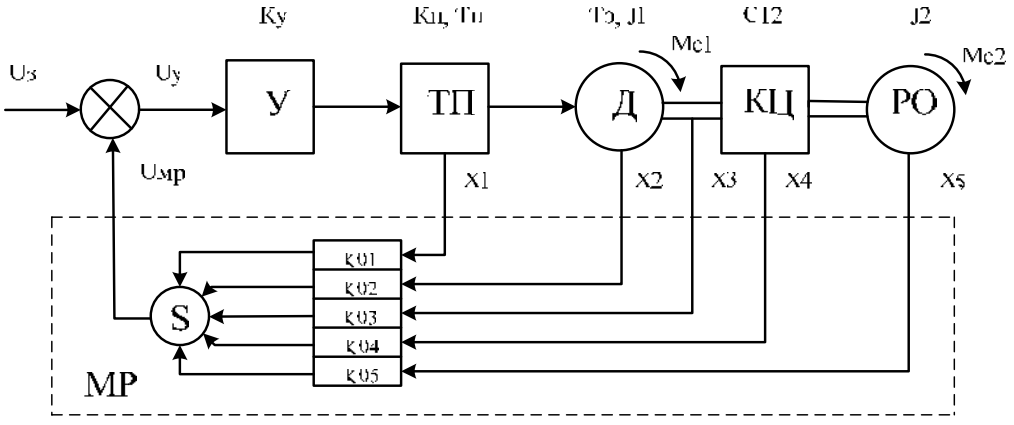


Рис. 1. Функциональная схема двухмассовой ЭМС с МР

Формируем коэффициенты:

$$d_0 = T_п \cdot T_м \cdot T_э \cdot T_2^2;$$
$$d_1 = (T_п + T_э) \cdot T_м \cdot T_2^2;$$
$$d_2 = T_м \cdot T_2^2 + T_п \cdot (\gamma \cdot T_э \cdot T_м + T_2^2);$$
$$d_3 = T_2^2 + \gamma \cdot T_м \cdot (T_п + T_э);$$
$$d_4 = \gamma \cdot T_м + T_п;$$
$$d_5 = 1;$$

$$b_0 = 1;$$
$$b_1 = T_п \cdot T_э \cdot T_1^2;$$
$$b_2 = (T_п + T_э) \cdot T_1^2;$$
$$b_3 = T_1^2 + T_п \cdot (T_э + \beta / C_{12});$$
$$b_4 = T_п + T_э + \beta / C_{12};$$
$$b_5 = 1.$$

Здесь $T_м = J_1/\beta$ – механическая постоянная времени двигателя; $T_2 = \sqrt{J_2 / C_{12}} = 1/\Omega_2$ – резонансная постоянная времени РО, Ω_2 – резонансная частота РО; $T_1 = \sqrt{J_1 / C_{12}} = 1/\Omega_1$ – резонансная постоянная времени ротора, Ω_1 – резонансная частота ротора; $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$ – коэффициент распределения моментов инерции; β – жесткость механической характеристики разомкнутого электропривода.

Составим уравнение замыкания:

$$U_у = U_з + \sum k_{0i} \cdot x_i = U_з - (k_{01} \cdot E_п + k_{02} \cdot I_я + k_{03} \cdot \omega_1 + k_{04} \cdot M_{12} + k_{05} \cdot \omega_5).$$

Выразив переменные через ω_2, получаем:

$$(D_0 \cdot p^5 + D_1 \cdot p^4 + D_2 \cdot p^3 + D_3 \cdot p^2 + D_4 \cdot p + D_5) \cdot \omega_2 = K_0 \cdot U_y - B_0 \cdot M_{c1} / \beta - (B_1 \cdot p^4 + B_2 \cdot p^3 + B_3 \cdot p^2 + B_4 \cdot p + B_5) \cdot M_{c2} / \beta;$$

где коэффициенты будут равны:

$$D_0 = d_0;$$
$$D_1 = d_1 + k_1 \cdot T_э \cdot T_м \cdot T_2^2;$$
$$D_2 = d_2 + (k_1 + k_2) \cdot T_2^2;$$
$$D_3 = d_3 + k_1 \cdot (\gamma \cdot T_э \cdot T_м + T_2^2) + k_3 \cdot T_2^2;$$
$$D_4 = d_4 + (k_1 + k_2) \cdot \gamma \cdot T_м + k_4 \cdot (\gamma - 1) \cdot T_м + k_3 \cdot \beta / C_{12};$$
$$D_5 = 1 + k_1 + k_3 + k_5;$$

$$B_0 = 1 + k_1 + k_2;$$
$$B_1 = b_1;$$
$$B_2 = b_2 + k_1 \cdot T_э \cdot T_1^2;$$
$$B_3 = b_3 + (k_1 + k_2) \cdot T_1^2;$$
$$B_4 = b_4 + k_1 \cdot (T_э + \beta / C_{12});$$
$$B_5 = 1 + k_1 + k_2 + k_4.$$

Коэффициенты передачи системы модального управления:

$$k_1 = K_у \cdot K_п \cdot k_{01};$$
$$k_2 = K_у \cdot K_п \cdot k_{02} / R_я;$$
$$k_3 = K_у \cdot K_п \cdot K_д \cdot k_{03};$$
$$k_4 = K_у \cdot K_п \cdot k_{04} / (R_я \cdot K_д);$$
$$k_5 = K_у \cdot K_п \cdot K_д \cdot k_{05}.$$

Далее необходимо выбрать нормированное уравнение эталонной модели 5 порядка (см. таблицу) для замкнутого по обратным связям электропривода по желаемым значениям перерегулирования $\sigma_{жел}$ и времени переходных процессов $t_{пп.жел}$:

$$S^5 + c_1 \cdot S^4 + c_2 \cdot S^3 + c_3 \cdot S^2 + c_4 \cdot S + 1 = 0.$$

Находим общие коэффициенты усиления МР:

$$\left.\begin{aligned} k_1 &= \left(d_0 \cdot c_1 \cdot \omega_б - d_1\right) / \left(T_м \cdot T_э \cdot T_2^2\right); \\ k_2 &= \left(d_0 \cdot c_2 \cdot \omega_б^2 - d_2\right) / \left(T_м \cdot T_2^2\right) - k_1; \\ k_3 &= [\left(d_0 \cdot c_3 \cdot \omega_б^3 - d_3\right) - k_1 \cdot (\gamma \cdot T_м \cdot T_э + T_2^2)] / T_2^2; \\ k_4 &= [\left(d_0 \cdot c_4 \cdot \omega_б^4 - d_4\right) - (k_1 + k_2) \cdot \gamma \cdot T_м] / T_м \cdot (\gamma - 1); \\ k_5 &= [\left(d_0 \cdot c_5 \cdot \omega_б^5 - d_5\right) - (k_1 + k_3). \end{aligned}\right\}$$

При определении k_i желательно выполнение условия $k_i > 0$, что соответствует отрицательным обратным связям и обеспечивает робастность системы (низкую чувствительность к изменениям параметров режима внутри контуров x_i). При $k_1 \geq 0$ ограничивается величина частоты:

$$\omega_б \geq d_1 / \left(d_0 \cdot c_1\right) = \frac{1/T_э + 1/T_п}{c_1}.$$

Определяем коэффициенты собственно МР:

$$\left.\begin{aligned} k_{01} &= k_1 / (K_у \cdot K_п); \\ k_{02} &= k_2 \cdot R_я / (K_у \cdot K_п); \\ k_{03} &= k_3 / (K_у \cdot K_п \cdot K_д); \\ k_{04} &= k_4 \cdot K_д \cdot R_я / (K_у \cdot K_п); \\ k_{05} &= k_5 / (K_у \cdot K_п \cdot K_д). \end{aligned}\right\}$$

Механическая характеристика замкнутого электропривода:

$$\omega_2 = \frac{K_0 \cdot U_з}{1 + k_1 + k_3 + k_5} - \frac{(1 + k_1 + k_2) M_{c1} + (1 + k_1 + k_2 + k_4) M_{c2}}{\beta(1 + k_1 + k_3 + k_5)}.$$

Здесь $M_с$ – момент трения в двигателе и передаче, M_{c2} – момент сопротивления рабочего органа, приведенный к двигателю.

Если пренебречь моментом трения, то жесткость механической характеристики замкнутой системы:

$$\beta_э = \frac{\beta \cdot (1 + k_1 + k_3 + k_5)}{1 + k_1 + k_2 + k_4}.$$

Таким образом, выбранные переменные состояния различно воздействуют на $\beta_э$:

– обратные связи по току и моменту уменьшают жесткость;

– обратные связи по скорости увеличивают жесткость механической характеристики.

Чтобы МР повышал $\beta_з$ при любой настройке, надо выбрать другой набор переменных состояния, например:

$$x_1 = dI_я/dt; \quad x_2 = \varepsilon_1 = d\omega_1/dt;$$
$$x_3 = \omega_1; \quad x_4 = \varepsilon_2 = d\omega_2/dt; \quad x_5 = \omega_2.$$

В этом случае жесткость увеличится до величины

$$\beta_з = \beta \cdot (1 + k_1 + k_3 + k_5) > \beta.$$

Структурная схема моделирования двухмассовой системы ТП – Д для двух вариантов МР приведена на рис. 2 и 3.

Расчеты проведем для электропривода рольганга с нежесткой механикой широкополосного стана горячей прокатки мощностью 25 кВт, 1000 об./мин. Показатели качества переходных процессов подобных устройств определяют эффективность, производительность и надежность работы прокатного оборудования. Для сравнения основных параметров качества переходных режимов аналогичные вычисления выполним для стандартной двухконтурной системы подчиненного регулирования (СПР). Схемы моделирования переходных режимов в математическом программном пакете *MATLAB Simulink* приведены на рис. 4 и 5.

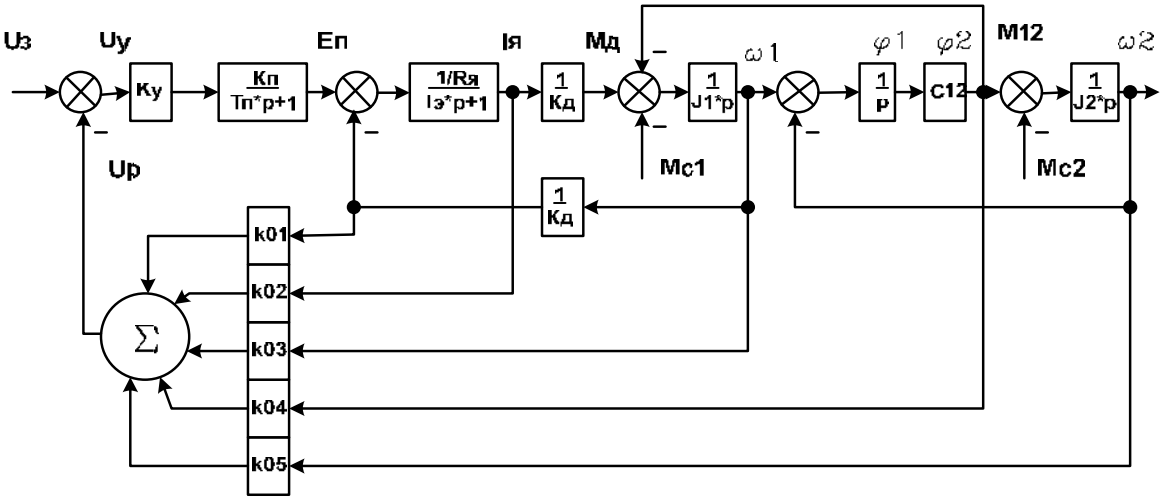


Рис. 2. Структурная схема моделирования двухмассовой ЭМС с МР (вариант 1)

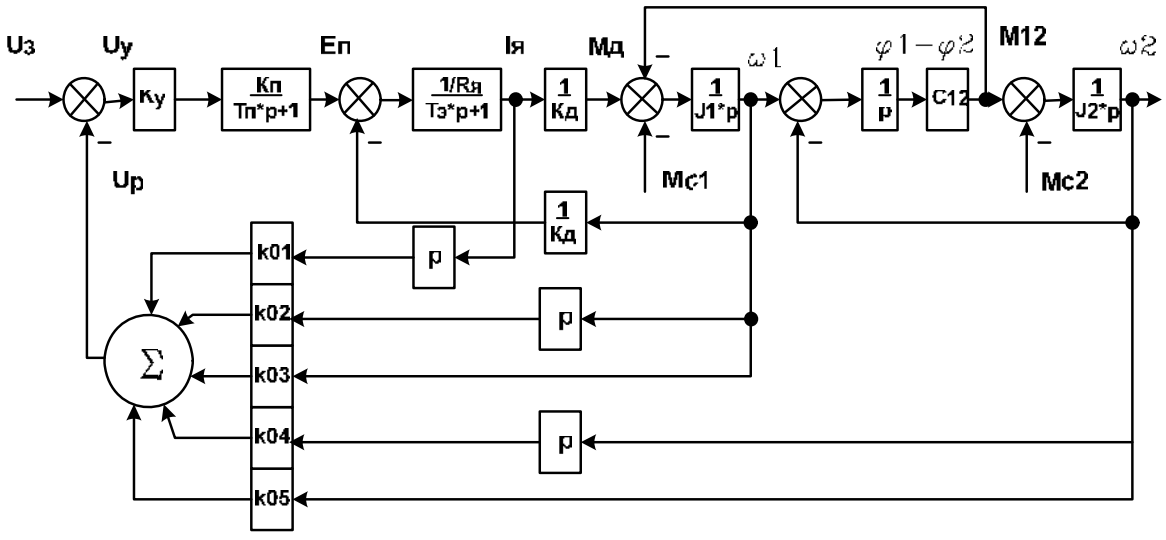


Рис. 3. Структурная схема моделирования двухмассовой ЭМС с МР (вариант 2)

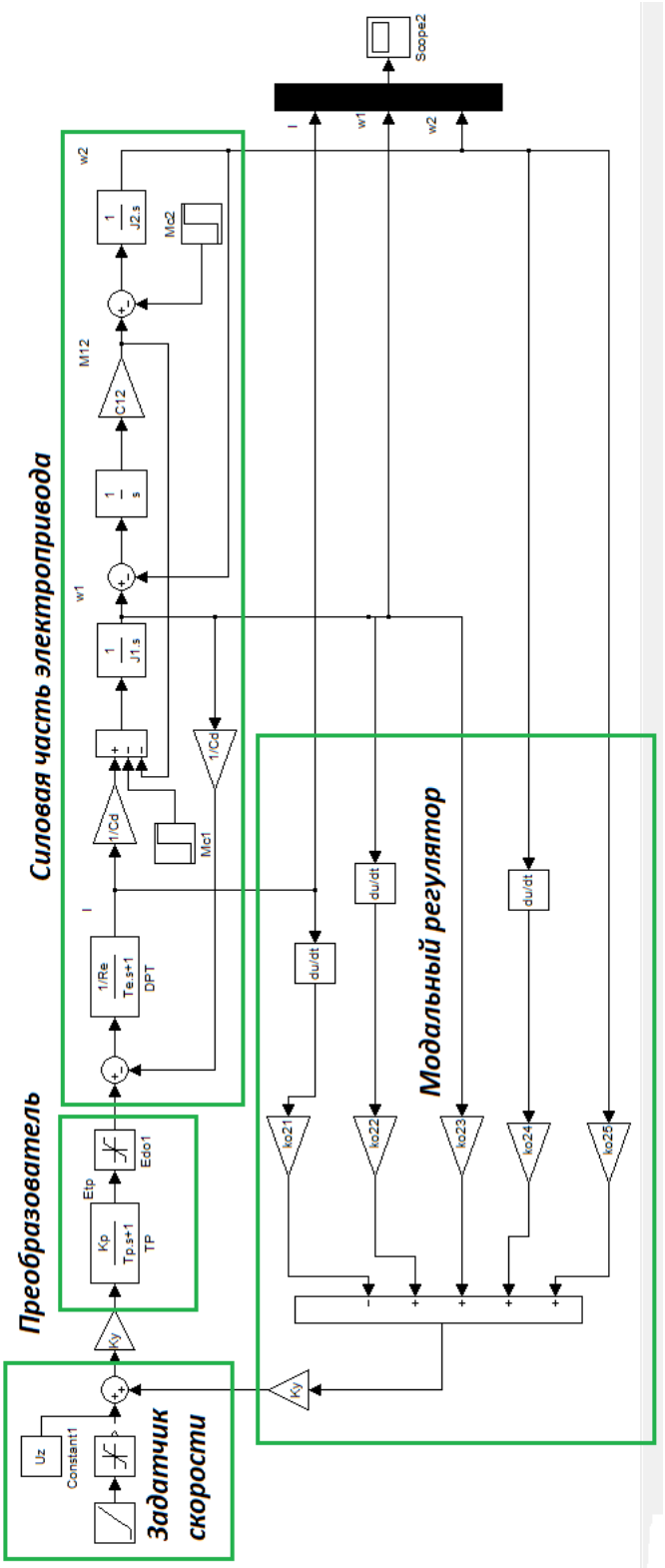


Рис. 4. Структурная схема моделирования электропривода с модальным регулятором

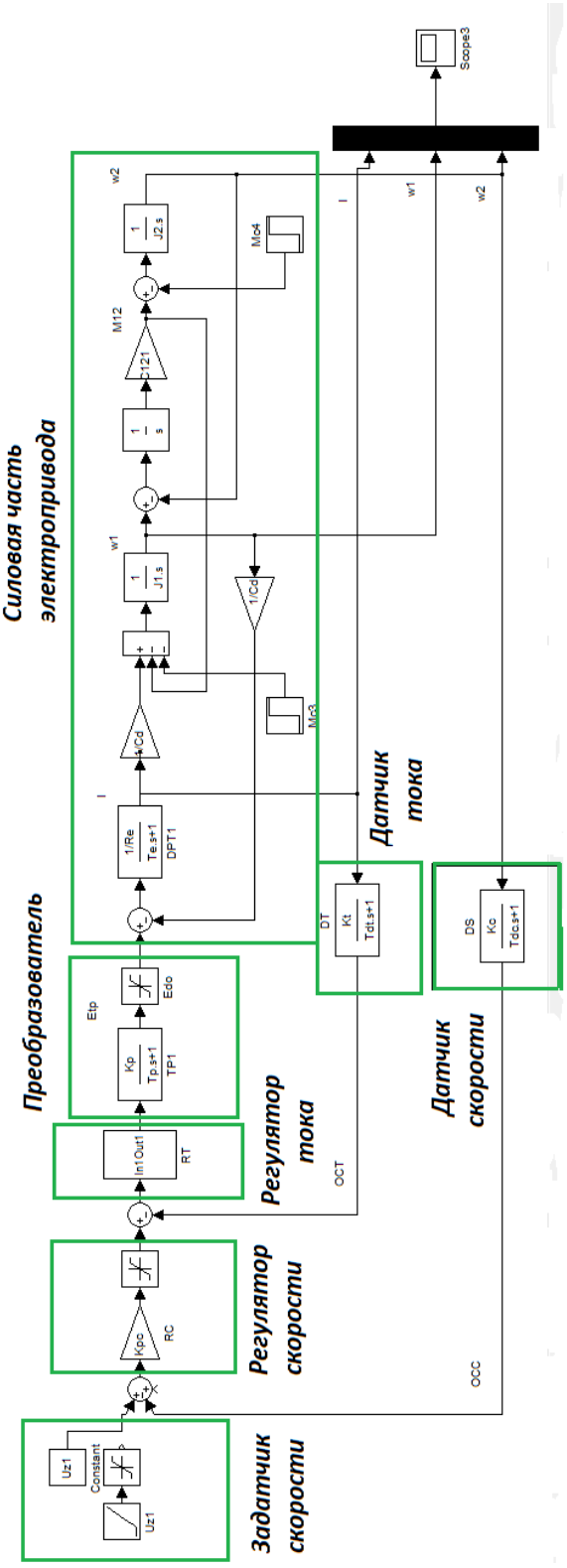


Рис. 5. Структурная схема моделирования электропривода системы подчиненного регулирования. Основные блоки структурных схем:

– двигатель постоянного тока с цепью якоря *DPT*, коэффициентом передачи *Cd* и коэффициентом жесткости кинематической связи *C12*, моментами инерции двигателя и рабочего органа *J1* и *J2*;
– тиристорный преобразователь *TP*;
– задатчик интенсивности *Uz*;
– нагрузка на валу двигателя и механизма *Mc1* и *Mc2*;
– модальный регулятор с коэффициентами передачи *ky*, *ko1 – ko5*;
– внутренний контур регулирования тока СПР с регулятором *RT* и датчиком тока *DT*;
– внешний контур регулирования скорости СПР с регулятором *RC* и датчиком скорости *DS*.

Моделируем в программном пакете *MATLAB* процесс управляемого пуска системы в режиме холостого хода. В качестве возмущения рассмотрим скачок нагрузки до номинала через 3 с. Графики изменения основных параметров режима (тока якоря *I* и скоростей двух масс *w1* и *w2*) при управлении и возмущении приведены на рис. 6 (система с МР) и рис. 7 (СПР).

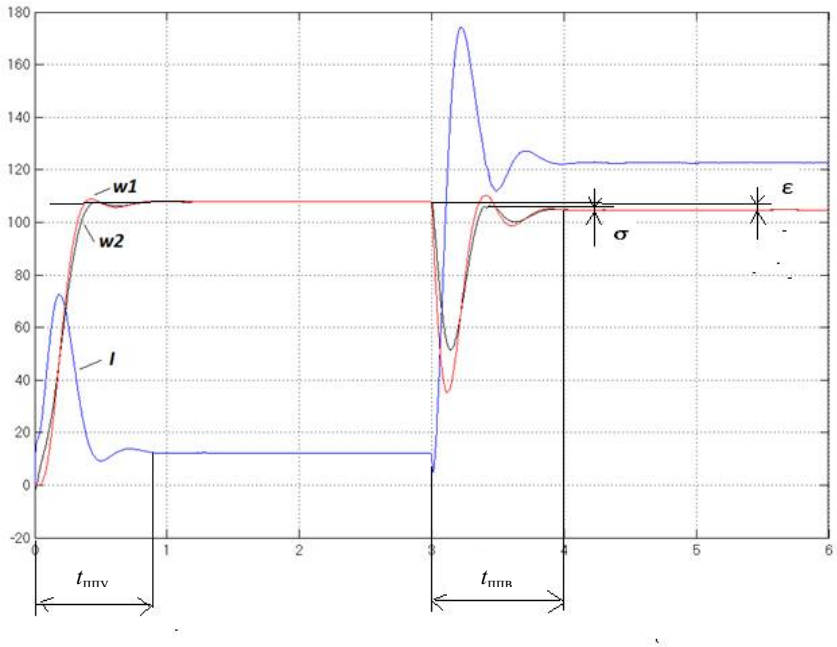


Рис. 6. Графики изменения параметров режима системы с МР

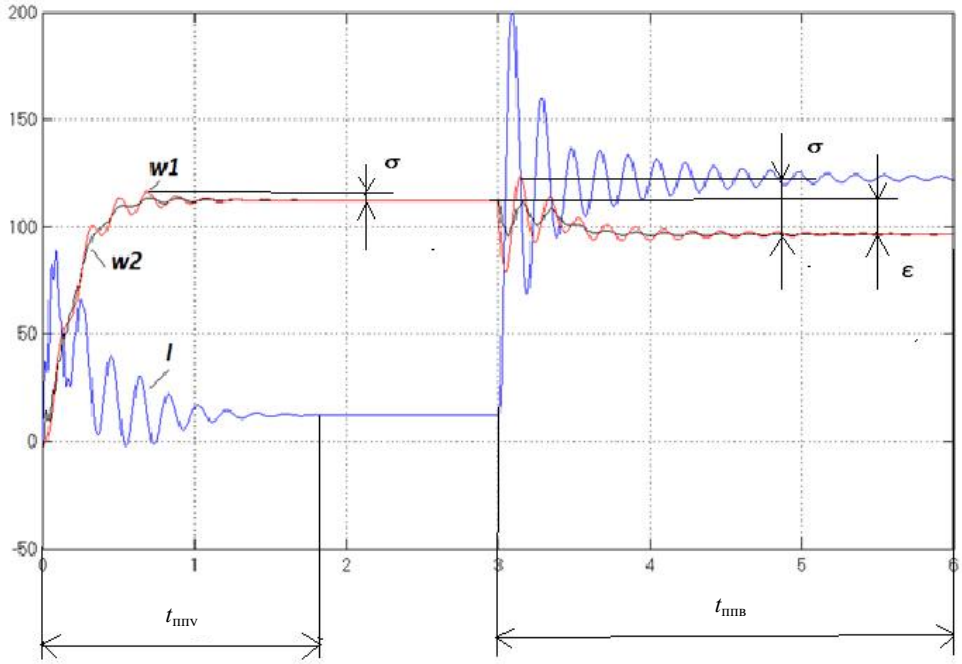


Рис. 7. Графики изменения параметров режима СПР

Результаты сравнения изменения основных параметров при управлении и возмущении (время переходного процесса $t_{пп}$, перерегулирование σ, статическая ошибка ε и показатель колебательности M) сведем в таблицу.

Перерегулирование σ характеризует динамическую ошибку начала переходного процесса, а показатель колебательности M – количество полных колебаний до достижения установившегося режима.

Сравнение параметров показывает, что САУ ЭМС с модальным управлением по всем показателям существенно превосходит классическую систему подчиненного регулирования: по эффективности сглаживания колебаний и, особенно, по быстродействию: время переходных процессов $t_{пп}$ в контуре тока и скорости уменьшается от 1,8 с до 0,7 с, т.е. в 2,5 раза при реакции на управление и от 6,0 с до 0,8 с, т.е. в 7,5 раза при реакции на возмущение; показатель колебательности M уменьшается от 9,0 до 1,5, т.е. в 6 раз при реакции на управление и от 12 до 1,5 с, т.е. в 8 раз при реакции на возмущение. Модальная САУ превосходит также систему с подчиненным регулированием по перерегулированию σ

(снижается от 5 % до нуля) и допустимой статической ошибке ε (снижается от 10 % до нуля).

Таблица

Основные показатели качества переходных процессов

Параметр	Система	При управлении				При возмущении			
		$t_{пп}$, с	σ, %	ε, %	M	$t_{пп}$, с	σ, %	ε, %	M
Ток якоря	САУ с МР	0,7	45	0	1,5	0,8	25	0	1,5
	САУ с СПР	1,8	35	0	9	6,0	35	0	12
Скорость $w2$	САУ с МР	0,7	0	0	0,5	0,8	5	5	1,5
	САУ с СПР	1,8	5	-5	9	6,0	15	10	12

Выводы:

1. Разработана математическая модель системы управления двухмассовой электромеханической системы с использованием модального регулятора желаемой эталонной формы на примере электропривода рольганга широкополосного листового прокатного стана.

2. Проведено исследование показателей качества переходных процессов САУ нелинейной двухмассовой ЭМС традиционной структуры подчиненного регулирования и с модальным регулятором.

3. Показана высокая эффективность использования модального управления электроприводами в металлургических агрегатах с нежесткой механикой по сравнению с традиционными регуляторами и способами управления.

Литература

1. *Григорьев, В.В.* Синтез систем автоматического управления методом модального управления / [В.В. Григорьев и др.]. – СПб., 2007.

2. *Кочнева, Т.Н.* Модальное управление электромеханическими системами в металлургии / Т.Н. Кочнева, А.В. Кожевников, Н.В. Кочнев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 1 (45). – Т. 1. – С. 14 – 19.

УДК 541.124

П.А. Марьяндышев, А.А. Чернов, Н.В. Шкаева, В.К. Любов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ БИОТОПЛИВА

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ

Проведен термический анализ древесной биомассы для определения кинетических характеристик основных процессов термического разложения биотоплива. Экспериментальные исследования проводились на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter фирмы “Netzsch Geratebau GmbH. Selb” (Германия). По результатам экспериментальных исследований определены значения кинетических констант, температурные интервалы начала выхода и максимальной скорости выделения летучих веществ в инертной среде, получены оптимальные диапазоны для энерготехнологической переработки древесных отходов.

Древесная биомасса, термический анализ, синхронный термоанализатор, термический эффект, энергия активации, предэкспоненциальный множитель.

Thermal analysis of the wood biomass was carried out for the definition of kinetic characteristics of the basic processes of thermal decomposition of biofuels. Experimental researches were done on the synchronous thermoanalyzer Netzsch F3 Jupiter STA 449. Values of kinetic constants, temperature intervals of the devoltalization beginning and maximum speed of the volatiles thermal decomposition in the inert environment, optimum ranges for energy technological processing of the wood waste were defined.

Wood biomass, thermal analysis, synchronous thermoanalyzer, thermal effect, activation energy, pre-exponential factor.

Одним из приоритетных направлений развития энергетики является использование возобновляемых источников энергии. К таким источникам относится древесная биомасса, использование которой в регионах с развитым лесопромышленным комплексом является перспективным решением, позволяющим обеспечить энергетическую независимость региона. Кроме того, энергетическое использование древесных отходов позволяет решить многие проблемы, такие как: утилизация побочных продуктов лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, получение более дешевой энергии, снижение вредного воздействия на окружающую среду и др. [1].

В процессе термического разложения твердого топлива определяющим фактором является выход летучих веществ. Поэтому для расчета процесса тер-