

УДК 669(06): 62-83:621.771

*д.т.н. Садовой А.В.,
к.т.н. Волянский Р.С.
(ДГТУ, Днепродзержинск, Украина),
аспирант Назарова Е.С.
(ЗНТУ, Запорожье, Украина) e-mail: nazarova@zntu.edu.ua*

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ ПОЛОСЫ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Розроблено систему оптимального керування натягом смуги, що прокатується, враховуючи змінні технологічні параметри. Досліджено її властивості за допомогою комплексу взаємопов'язаних багатовимірних моделей електромеханічного обладнання станів холодної прокатки.

Ключові слова: оптимальне керування, стан холодної прокатки, комплекс взаємопов'язаних багатовимірних моделей.

Разработана система оптимального управления натяжением прокатываемой полосы, учитывающая переменные технологические параметры. Исследованы ее свойства с помощью комплекса взаимосвязанных многомерных моделей электромеханического оборудования станов холодной прокатки.

Ключевые слова: оптимальное управление, стан холодной прокатки, комплекс взаимосвязанных многомерных моделей.

Постановка задачи. При настройке электромеханических комплексов, а также при автоматизированном выборе лучших проектных решений широко используются компьютерные модели. Это позволяет проводить необходимые предварительные эксперименты при модернизации существующих систем управления и проектировании новых без остановки производственного оборудования, что сокращает затраты времени и средств. При синтезе системы управления электроприводом моталки стана холодной прокатки возникает необходимость удовлетворения жестких требований точности воспроизведения желаемых траекторий движения, быстродействия, запаса устойчивости, надежности, технологичности изготовления и обслуживания [1]. В связи с этим актуальной является задача разработки системы оптимального управления, обеспечивающей выполнение поставленных требований и обладающей свойствами низкой чувствительности к широкому спектру дестабилизи-

рующих факторов, вызванных переменными параметрами и упругими связями кинематических передач, и исследование её свойств с использованием комплекса взаимосвязанных многомерных моделей электро-механического оборудования станов холодной прокатки [2].

Решение. Объектом управления является электропривод моталки, обеспечивающий стабилизацию натяжения полосы во всех режимах работы, что является необходимым условием обеспечения качественного ведения технологического процесса [1]. Кинематическая схема моталки с учетом взаимосвязи с прокатной клетью через прокатанный металл приведена на рисунке 1.

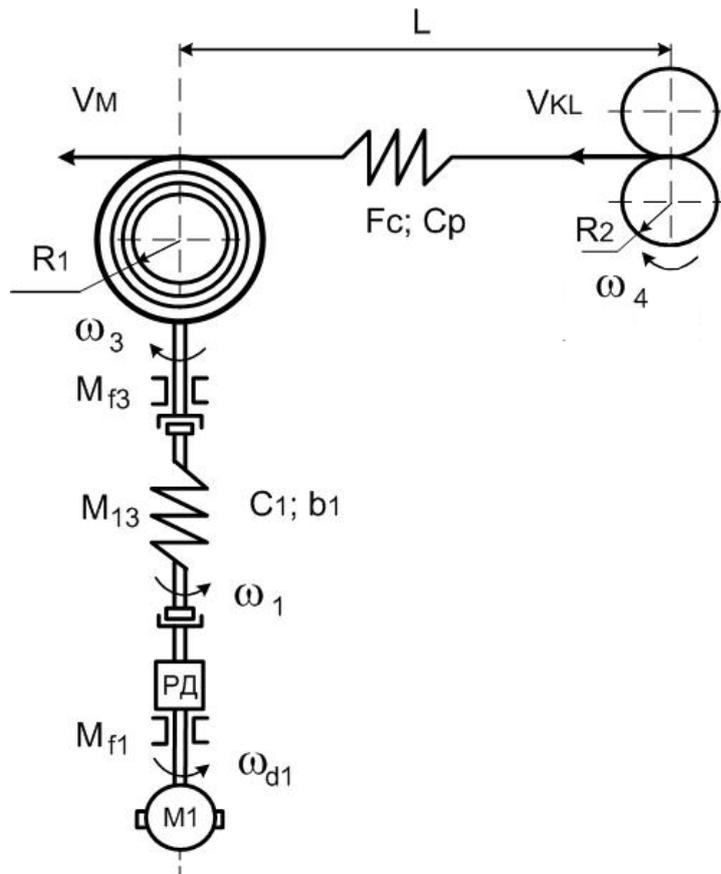


Рисунок 1 – Кинематическая схема моталки

В соответствии с приведенной кинематической схемой система уравнений динамики объекта управления в поэлементной форме имеет вид [4]

$$\left\{ \begin{array}{l} pFc = C_p R_1 \omega_3 - C_p R_2 \omega_4 - \frac{F_c R_2 \omega_4}{L}; \\ p\omega_3 = \frac{1}{J_M} M_{13} + \frac{b_1(\omega_1 - \omega_3)}{J_M} - \frac{F_c R_1}{J_M} - \frac{k_{f3} \omega_3}{J_M}; \\ pM_{13} = C_1(\omega_1 - \omega_3); \\ p\omega_1 = \frac{1}{J_{d1} i_p} M_{d1} - \frac{1}{J_{d1}} M_{13} - \frac{k_{f1}}{J_{d1}} \omega_1; \\ pM_{d1} = \frac{C\Phi}{R_d T_d} U_{d1} - \frac{1}{T_d} M_{d1} - \frac{(C\Phi)^2}{R_d T_d i_p} \omega_1; \\ pU_{d1} = \frac{k_B}{T_\mu} U_y - \frac{1}{T_\mu} U_{d1}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где ω_{d1} - угловая скорость двигателя М1; ω_1, ω_3 - угловые скорости торцов шпинделя; ω_4 - угловая скорость валков клетки; J_{d1} - момент инерции ротора двигателя М1 и редуктора, J_M - момент инерции моталки; M_{f1}, M_{f3} - моменты внешнего трения; M_{13} - упругий момент; C_1 - жесткость упругого элемента; C_p - жесткость транспортируемого материала; b_1 - коэффициент внутреннего демпфирования; F_c - сила натяжения прокатываемой полосы; L - расстояние между осями вращающихся механизмов; i_p - передаточное число редуктора, R_1 - радиус рулона; R_2 - радиус валка клетки; k_B, T_μ - коэффициент усиления и постоянная времени управляемого преобразователя; U_{d1}, U_y - напряжения на выходе и входе управляемого преобразователя питания двигателя М1.

Для облегчения обобщенного исследования упругодиссипативного объекта управления целесообразно осуществить направленное нормирование системы (1). В качестве базовых переменных приняты U_{max} - максимальное напряжение управления преобразователем; ω_{max} - скорость идеального холостого хода двигателя; M_{max} - момент короткого замыкания двигателя при напряжении U_{max} ; F_{max} - технологически максимально допустимое натяжение полосы

$$\omega_{max} = \frac{U_{max}}{C\Phi} i_p; M_{max} = C\Phi \frac{U_{max}}{R_d}; U_{max} = k_B \cdot U_{y_{max}}.$$

Тогда система уравнений (1) преобразуется к виду

$$p y_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} y_k + C + m_6 u, \quad (i=1, \dots, 6), \quad (2)$$

где

$$y_1 = \frac{F_c}{F_{\max}}; \quad y_2 = \frac{\omega_3}{\omega_{\max}}; \quad y_3 = \frac{M_{13}}{M_{\max}}; \quad y_4 = \frac{\omega_{dl}}{\omega_{\max}}; \quad y_5 = \frac{M_{dl}}{M_{\max}}; \quad y_6 = \frac{U_{dl}}{U_{\max}};$$

$$a_{11} = -\frac{R_2 \omega_4}{L}; \quad a_{12} = C_p R_1 \frac{\omega_{\max}}{F_{\max}}; \quad a_{21} = -\frac{R_1 F_{\max}}{J_M \omega_{\max}}; \quad a_{22} = -\left(\frac{b_1}{J_M} + \frac{k_{f3}}{J_M} \right);$$

$$a_{23} = \frac{M_{\max}}{J_M \omega_{\max}}; \quad a_{24} = \frac{b_1}{J_M}; \quad a_{32} = -\frac{C_1 \omega_{\max}}{M_{\max}}; \quad a_{34} = \frac{C_1 \omega_{\max}}{M_{\max}}; \quad a_{44} = -\frac{k_{f1}}{J_{dl}};$$

$$a_{45} = \frac{M_{\max}}{J_{dl} \omega_{\max}}; \quad a_{54} = -\frac{1}{T_r}; \quad a_{55} = -\frac{1}{T_r}; \quad a_{56} = \frac{1}{T_r}; \quad a_{66} = -\frac{1}{T_\mu}; \quad m_6 = \frac{1}{T_\mu}. \quad (3)$$

Из множества траекторий движения системы (2) выделим невозмущенное движение под действием программного управления u^* как решение дифференциальных уравнений

$$p y_i^* = \sum_{k=1}^6 a_{ik} y_k^* + C + m_6 u^*, \quad (i=1, \dots, 6). \quad (4)$$

Реальное движение объекта управления отличается от желаемого на величину отклонения

$$\eta_k = y_k - y_k^*, \quad (k=1, \dots, 6). \quad (5)$$

Тогда возмущенного движение объекта управления (1), полученные путем вычитания уравнений (4) из уравнений (2) можно представить следующим образом

$$p \eta_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} \eta_k + m_6 U, \quad (i=1, \dots, 6), \quad (6)$$

где $U = u - u^*$ - дополнительное стабилизирующее управление, представляющее собой отклонение реального управляющего воздействия u от программного u^* ; a_{ik}, m_6 - коэффициенты.

Для синтезируемой системы уравнений качество управления может быть задано функционалом Летова

$$I = \int_0^{\infty} \left(\sum_{i,k=0}^6 w_{ik} \eta_i \eta_k + cU^2 \right) dt, \quad w_{ik} = w_{ki}, \quad (7)$$

экстремальное значение которому на траекториях движения (6) доставляет оптимальное управление

$$U = -\text{sat} \frac{g}{m_6} \sum_{i=0}^6 v_{i6} \eta_i, \quad (8)$$

гарантируя при этом экспоненциальный характер управляемого движения регулируемой переменной $\eta_1 = -\exp\left(\frac{1}{g}t\right)$ при траектории не возмущенного движения $y_1^* = 1(t)$ и обеспечивая замкнутой системе астатические свойства за счет наличия в своем составе интегральной составляющей $\eta_0 = \frac{1}{p} \eta_1$ [3].

Оптимальное управление (8) в развернутом виде

$$U = -\text{sat} \frac{g}{m_6} (v_{06} \eta_0 + v_{16} \eta_1 + v_{26} \eta_2 + v_{36} \eta_3 + v_{46} \eta_4 + v_{56} \eta_5 + v_{66} \eta_6). \quad (9)$$

Коэффициентами алгоритма управления (9) являются коэффициенты функции Ляпунова

$$V = \sum_{i,k=0}^6 v_{ik} \eta_i \eta_k, \quad v_{ik} = v_{ki}, \quad (10)$$

которые связаны между собой соотношениями

$$v_{ik} = \frac{v_{in} v_{kn}}{v_{nn}}, \quad (i,k=0,1,2,\dots,6). \quad (11)$$

Коэффициенты (11) определяются соответственно минорами i -ых, k -ых и n -ых элементов 1-го столбца определителя коэффициентов системы (6) [3]

$$\begin{aligned}
v_{06} &= (-1)^6 \Delta, \\
v_{i6} &= (-1)^{i+6} M_{i1}, \quad i = 1, 2, \dots, 6,
\end{aligned} \tag{12}$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{vmatrix}. \tag{13}$$

Тогда искомые коэффициенты алгоритма оптимального управления определяются выражениями

$$\begin{aligned}
v_{06} &= -a_{66}(a_{11}a_{23}a_{32}a_{55}a_{44} - a_{11}a_{23}a_{32}a_{45}a_{54} - a_{11}a_{55}a_{43}a_{24}a_{32} + \\
&+ a_{11}a_{55}a_{43}a_{34}a_{22} - a_{55}a_{43}a_{34}a_{12}a_{21}); \quad v_{16} = -a_{22}a_{43}a_{34}a_{55}a_{66} - \\
&- a_{32}a_{23}a_{44}a_{55}a_{66} + a_{32}a_{23}a_{54}a_{45}a_{66} + a_{32}a_{43}a_{24}a_{55}a_{66}; \\
v_{26} &= -a_{12}a_{43}a_{34}a_{55}a_{66}; \quad v_{36} = -a_{12}(a_{23}a_{44}a_{55}a_{66} - a_{23}a_{54}a_{45}a_{66} - \\
&- a_{43}a_{24}a_{55}a_{66}); \quad v_{46} = a_{12}a_{23}a_{34}a_{55}a_{66}; \quad v_{56} = -a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}a_{66}; \\
v_{66} &= a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}a_{56}.
\end{aligned} \tag{14}$$

Следует отметить, что весовые коэффициенты функционала (7) однозначно связаны с коэффициентами функции Ляпунова (10) соотношениями

$$w_{ik} = \frac{m_6^2}{c} v_{i6} v_{k6} = g v_{i6} v_{k6}, \quad i, k = 0, 1, \dots, 6. \tag{15}$$

Выполнив в алгоритме управления (9) замену координат возмущенного движения в силу системы дифференциальных уравнений (6) и перейдя от относительных значений переменных состояний к их именованным значениям, получим в окончательном виде алгоритм оптимального управления натяжением прокатываемой полосы

$$U_y = U_{y\max} \text{sat} \frac{g}{m_6} \left(\left(\frac{\gamma_{06}}{p} + \gamma_{16} \right) (F_C^* - F_C) - \gamma_{26} p F_C - \gamma_{36} p \omega_3 - \right. \quad (16)$$

$$\left. - \gamma_{46} (\omega_1 - \omega_3) - \gamma_{56} p \omega_1 - \gamma_{66} p I_{dl} \right).$$

В коэффициенты алгоритма оптимального управления натяжением прокатываемой полосы входят переменные технологические параметры: угловая скорость валков клетки ω_4 и радиус рулона R_1 .

Согласно (11) регулятор натяжения будет иметь вид (рисунок 2)

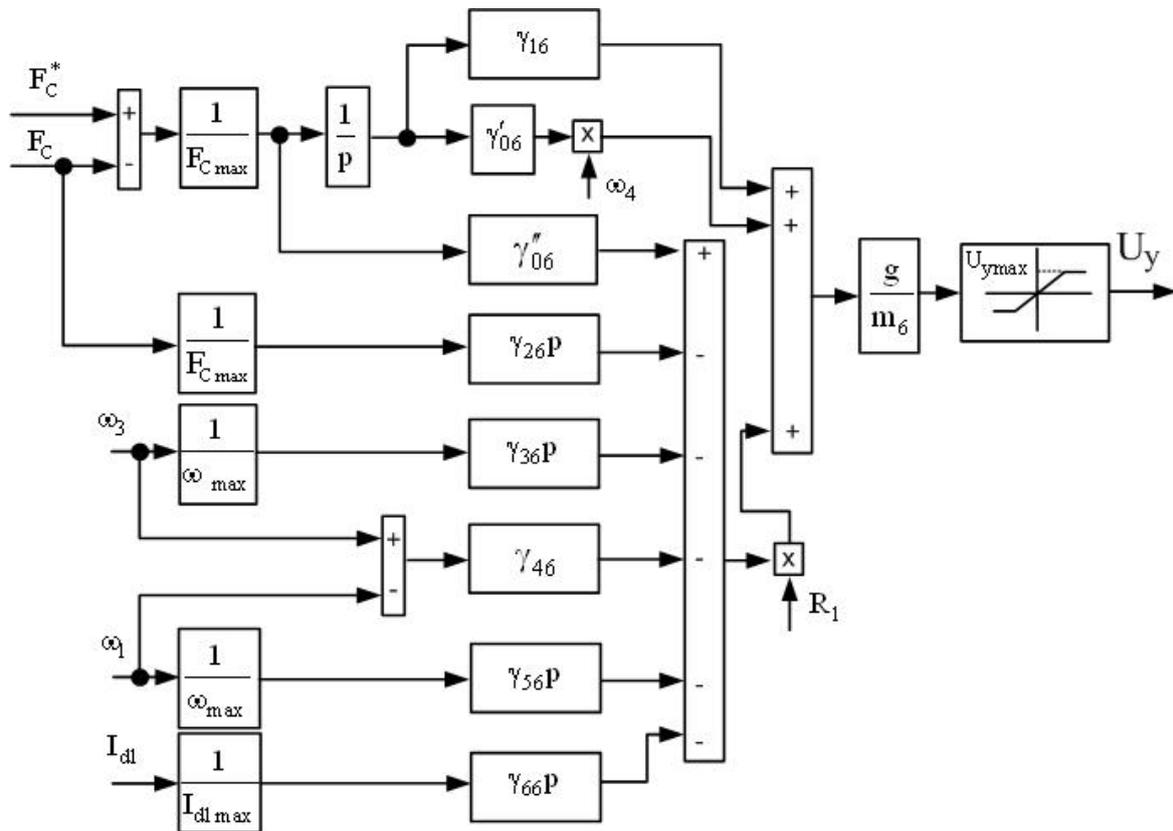


Рисунок 2 – Структурная схема регулятора натяжения с жесткими обратными связями

Из анализа значений коэффициентов (3) системы (2) видно, что скорость клетки ω_4 входит в состав коэффициента a_{11} , а радиус рулона R_1 - в состав коэффициентов a_{12}, a_{21} . Так как эти коэффициенты уравнений динамики участвуют в расчете коэффициентов функции Ляпунова, разделим слагаемые коэффициента γ_{06} на две составляющие: γ'_{06} - с учетом переменной скорости ω_4 и γ''_{06} - с учетом переменного радиуса рулона R_1 . Аналогичным образом учтем изменение коэффициентов ре-

гулятора $\gamma_{26}, \dots, \gamma_{66}$ в зависимости от переменного радиуса рулона, тогда структурная схема регулятора натяжения примет окончательный вид, изображенный на рисунке 2.

Для исследования и оценки свойств системы оптимального управления, синтезированной аналитически, использован комплекс компьютерных моделей намоточно-размоточного механизма, двигателя постоянного тока, упругостей первого и второго рода [2]. Структура компьютерной модели синтезированной системы управления натяжением полосы приведена на рисунке 3, а.

При моделировании использованы данные оборудования дрессировочного одноклетевого стана 1700-1 цеха холодной прокатки №1 ОАО «Запорожсталь».

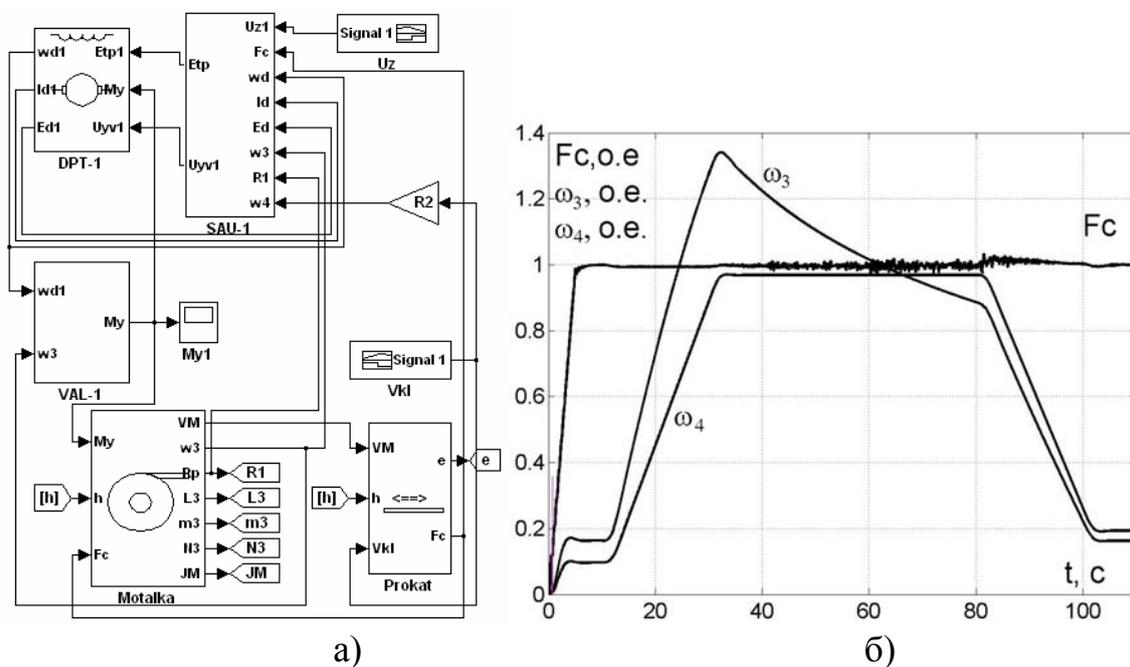


Рисунок 3 – Модель электромеханической системы оптимального управления натяжением полосы(а), переходные процессы синтезированной системы (б)

Согласно технологической инструкции ТИ 226-П.ХЛ 1-20-05 «Дрессировка холоднокатаных полос на станах 1700 №1 и №2» натяжение создается между клетью и разматывающим устройством с момента захвата переднего конца полосы валками. При выходе из рабочей клетки передний конец полосы подается к моталке и заправляется в зев ее барабана, создается необходимое натяжение, все механизмы стана переводятся на максимальную для данного режима скорость. При дрессировке особое внимание обращается на натяжение полосы, которое кон-

тролируется при постоянной скорости стана по показаниям амперметров и должно быть постоянным в течение всего времени дрессировки полосы. После окончания дрессировки рулона стан останавливается, разводятся валки клетки, пропускается задний конец полосы и подматывается в рулон.

На рисунке 3, б показаны переходные процессы (F_C – натяжение прокатываемой полосы, ω_3 – угловая скорость моталки, ω_4 – угловая скорость клетки) при заправленном конце полосы в барабан моталки, с 0 с до 5 с устанавливается необходимое натяжение полосы, с 5 с до 120 с производится дрессировка с постоянным натяжением, с 120 с до 130 с снимается задание на натяжение. При этом задание по скорости клетки в момент времени 0 с – 10 с соответствует заправочной скорости стана, 10 с – 30 с разгон клетки до рабочей скорости, 30 с – 80 с - работа при постоянной скорости, 80 с – 100 с – торможение до пониженной скорости, 100 с – 110 с – работа на пониженной скорости.

Выводы. Исходя из анализа результатов моделирования, разработанная система оптимального управления натяжением прокатываемой полосы за счет полной наблюдаемости объекта управления, учета влияния переменных технологических параметров обеспечивает отработку задающего воздействия без перерегулирования и компенсирует влияние варьирования толщины полосы, упругостей шпинделя и полосы на динамику электропривода моталки. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании нового и реконструкции существующего технологического оборудования прокатного производства.

Библиографический список

1. Лимонов Л. Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов / Л. Г. Лимонов – Х.: Изд-во «ФОРТ», 2009. – 272 с.
2. Назарова О. С. Моделювання електромеханічних процесів в прокатному обладнанні за допомогою бібліотеки підсистем / О. С. Назарова, В. И. Бондаренко, А. В. Пирожок // Електроінформ, 2010. - №2-3. – С. 22-24.
3. Садовой А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина. – К.: ИСИМО, 1996. – 298 с.
4. Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.