

---

**РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЛАВНЫМИ ПРИВОДАМИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ**


---

**Введение.** Повышения качества прокатного производства можно добиться путем повышения точности и быстродействия систем управления. Главный привод прокатного стана представляет собой сложный объект управления (ОУ), параметры которого не точно известны и могут меняться в процессе работы, вектор состояния не полностью и не точно известен, внешние и внутренние возмущения также не известны и на ОУ действует трение. В известных работах рассматриваются линейные модели трения и взаимосвязь между валками. По нашему мнению, в связи с троганием с места и изменением скорости, которое носит знакопеременный характер, работа ОУ сопровождается нелинейными трением и взаимосвязью между валками. Традиционные методы управления (П-, ПИ-, ПИД-регуляторы) обладают недостаточной робастностью, плохо противодействуют ступенчато изменяющимся внешним воздействиям и нелинейному трению. Хорошей робастностью с высокой точностью управления обладают комбинированные методы управления с наблюдателями неопределенности [1, 2]. Суть метода заключается в следующем. Все внешние и внутренние воздействия (включая нелинейное трение), воздействия, связанные с параметрическими неопределенностями, объединяются в вектор неопределенности, который оценивается быстродействующим наблюдателем в реальном времени и компенсируется комбинированным регулятором.

**Постановка задачи.** Для описания работы главных приводов прокатных станов с синхронными двигателями воспользуемся математической моделью, полученной в работе [3]. Предполагается, что в системе используется частотное управление приводными двигателями. В этой модели длинная линия главного привода представлена трехмассовой электромеханической системой (ЭМС) (уравнения с индексом 1), а короткая линия – двухмассовой ЭМС (уравнения с индексом 2).

$$J_{\delta 1} \dot{\omega}_{\delta 1} = M_{y12} + \beta_{12}(\omega_p - \omega_{\delta 1}) - \beta_{c1} \omega_{\delta 1} - M_c - \Delta M, \quad J_p \dot{\omega}_p = M_{y11} + \beta_{11}(\omega_{\delta 1} - \omega_p) - M_{y12} - \beta_{12}(\omega_p - \omega_{\delta 1}), \quad (1)$$

$$J_{\delta 1} \dot{\omega}_{\delta 1} = M_{\delta 1} - M_{y11} - \beta_{11}(\omega_{\delta 1} - \omega_p), \quad \dot{M}_{y11} = C_{11}(\omega_{\delta 1} - \omega_p), \quad \dot{M}_{y12} = C_{12}(\omega_p - \omega_{\delta 1}); \quad (2)$$

$$J_{\delta 2} \dot{\omega}_{\delta 2} = M_{y2} + \beta_2(\omega_{\delta 2} - \omega_{\delta 2}) - \beta_{c2} \omega_{\delta 2} - M_c + \Delta M, \quad (3)$$

$$J_{\delta 2} \dot{\omega}_{\delta 2} = M_{\delta 2} - M_{y2} - \beta_2(\omega_{\delta 2} - \omega_{\delta 2}), \quad \dot{M}_{y2} = C_2(\omega_{\delta 2} - \omega_{\delta 2}); \quad (4)$$

$$T_{\mu 1} \dot{M}_{\delta 1} + M_{\delta 1} = M_{\delta 1}, \quad T_{\mu 2} \dot{M}_{\delta 2} + M_{\delta 2} = M_{\delta 2}. \quad (5)$$

Здесь  $\omega_{\delta 1}, \omega_p, \omega_{\delta 1}, \omega_{\delta 2}, \omega_{\delta 2}$  – скорости вращения валков, редуктора и двигателей;  $J_{\delta 1}, J_p, J_{\delta 1}, J_{\delta 2}, J_{\delta 2}$  – моменты инерции валков, редуктора и двигателей;  $M_{y11}, M_{y12}, M_{y2}$  – моменты упругости;  $C_{11}, C_{12}, \beta_{11}, \beta_{12}, C_2, \beta_2$  – жесткости и коэффициенты внутреннего вязкого трения в упругих валах при скручивании;  $-\beta_{c1} \omega_{\delta 1}, -\beta_{c2} \omega_{\delta 2}$  – составляющие, учитывающие падающий участок в характеристиках внешнего трения с наклонами  $\beta_{c1}, \beta_{c2}$ ;  $M_c$  – момент сопротивления;  $\Delta M = k(\omega_{\delta 1} - \omega_{\delta 2})$  – изменение момента, вызванное разностью скоростей вращения верхнего и нижнего валков, где  $k$  – коэффициент взаимной связи между валками через прокатываемый металл. Уравнения (5) представляют собой уравнения изменения моментов синхронных двигателей, где  $T_{\mu 1}, T_{\mu 2}$  – постоянные времени частотных преобразователей;  $M_{\delta 1}, M_{\delta 2}$  – задающие моменты. В системе (1)-(5)  $\omega_{\delta 2}, \omega_{\delta 1}, \omega_p, M_{y2}, M_{y11}, M_{y12}, C_2, \beta_2, C_{11}, C_{12}, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{c1}, \beta_{c2}, M_c, \Delta M$  – неизвестные; измеряются только скорости вращения двигателей  $\omega_{\delta 1}, \omega_{\delta 2}$ .

Цель работы – обеспечение высокой точности и быстродействия управления главными приводами прокатных станов с помощью комбинированного регулятора с наблюдателем неопределенности.

**Материалы исследования.** Наблюдатели неопределенностей для трехмассовой и двухмассовой ЭМС получены в следующем виде:

$$\hat{f}_{\Sigma 1} = z_1 - l_{f1}(J_{\delta 1} + J_p + J_{\delta 1})\omega_{\delta 1}, \quad \dot{z}_1 = l_{f1}(\hat{f}_{\Sigma 1} + M_{\delta 1}); \quad \hat{f}_{\Sigma 2} = z_2 - l_{f2}(J_{\delta 2} + J_{\delta 2})\omega_{\delta 2}, \quad \dot{z}_2 = l_{f2}(\hat{f}_{\Sigma 2} + M_{\delta 2}). \quad (6)$$

Законы управления сформированы в виде

$$M_{\delta 1} = k_1(\omega_{\delta 1} - \omega_{\delta 1p}) + (J_{\delta 1} + J_p + J_{\delta 1})\dot{\omega}_{\delta 1p} - \hat{f}_{\Sigma 1}; \quad M_{\delta 2} = k_2(\omega_{\delta 2} - \omega_{\delta 2p}) + (J_{\delta 2} + J_{\delta 2})\dot{\omega}_{\delta 2p} - \hat{f}_{\Sigma 2}. \quad (7)$$

Здесь  $l_{f1}, l_{f2}$  – коэффициенты передачи наблюдателей;  $k_1, k_2$  – постоянные коэффициенты; символ «^» обозначает оценки соответствующих переменных.

На рис. 1, 2 показаны переходные процессы, возникающие при подаче единичного ступенчатого воздействия. Нагрузка в виде ступенчатого сигнала прикладывалась на 0,4 с и снималась на 0,7 с. При моделировании использовалась модель трения LuGre [2] и учитывался нелинейный характер взаимосвязи между валками. Анализ графиков показывает, что синтезированная система управления обеспечивает отработку программного сигнала за 0,3 с для длинной линии и 0,1 с для короткой, является астатической по отношению к нагрузке. При отклонении моментов инерции от номинальных значений система сохраняет свою работоспособность.

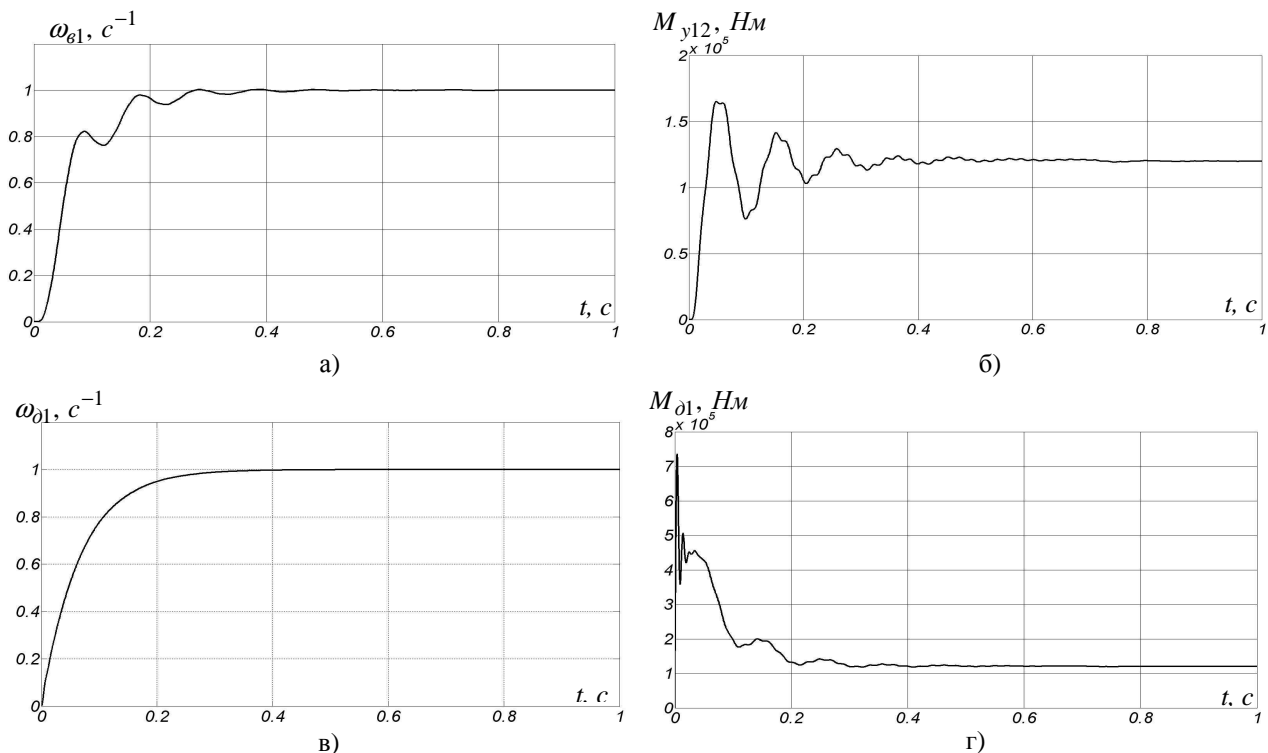


Рис. 1. Переходные процессы в длинной линии: а) скорость вращения вала  $\omega_{61}$ ; б) момент упругости тихоходного вала  $M_{y12}$ ; в) скорость вращения двигателя  $\omega_{01}$ ; г) момент двигателя  $M_{01}$

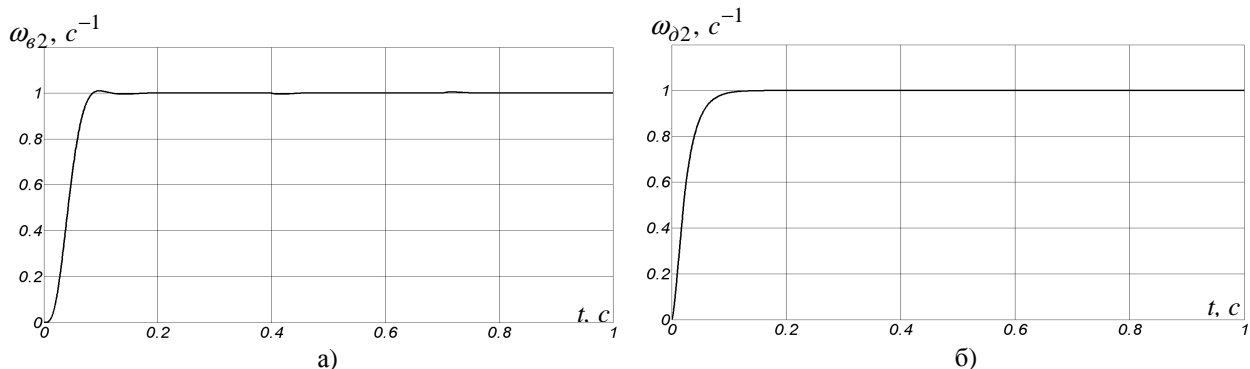


Рис. 2. Переходные процессы в короткой линии:

а) скорость вращения вала  $\omega_{62}$ ; б) скорость вращения двигателя  $\omega_{02}$

**Выводы.** В работе синтезирован алгоритм управления главными приводами прокатных станов, обеспечивающий высокую точность и быстродействие при обработке программного сигнала. Время переходного процесса 0,3 с для длинной линии и 0,1 с для короткой. Включение в неопределенность внешних воздействий делает систему астатической по отношению к нагрузке. Система робастна по отношению к изменению момента, вызванного разностью скоростей вращения верхнего и нижнего валков, отклонениям моментов инерции от номинальных значений, действию нелинейного трения на объект. Также следует отметить, что синтезированный в данной статье алгоритм не требует знания математических моделей внешнего и внутреннего вязкого трений, значений коэффициентов жесткости. Эти данные необходимы только для иллюстрации работоспособности рассматриваемого комбинированного управления путем численного моделирования.

#### Литература.

1. Потапенко, Е.М. Робастные комбинированные системы управления с наблюдателями / Е.М. Потапенко // Проблемы управления и информатики (Киев, НАНУ). – 1995. – № 2. – С. 36–44.
2. Казурова А. Е. Возможные варианты построения высокоточных систем управления упругой неопределенной электромеханической системой / Казурова А. Е., Потапенко Е. М. // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 4–19.
3. Кузнецов, Б. И. Математическая модель индивидуальных главных электроприводов прокатных станов с синхронными двигателями и с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл / Б. И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, И. В. Бовдуй, А. А. Волошко, Е. В. Винниченко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 2. – С. 207–212.