УДК 378.14

Л.Б. Курцева, А.О. Власов

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АНАЛОГОВОЇ І ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОКАТНОГО СТАНУ

Приведені результати дослідження перехідних процесів аналогової і цифрової двомасової системи управління з урахуванням пружних елементів.

Ключові слова: *аналогова система, цифрова система, система управління, вектор стану, робочий механізм.*

Вступ

Постановка проблеми. У металургійній промисловості прокатне виробництво, що є одним з основних технологічних процесів обробки металу тиском, де найширше використовується система управління автоматизованого електроприводу. Об'єктом управління в сучасних системах регулювання швидкістю електроприводами є найчастіше двигун постійного струму, якірний ланцюг якого питається від тиристорного перетворювача. У системі регулювання швидкістю із зворотним зв'язком функції регулятора, може виконувати цифровий комп'ютер. Оскільки введення інформації в цифровий комп'ютер здійснюється через певні інтервали часу, то необхідно використати спеціальний метод математичного опису і аналізу якості цифрових систем управління. Цифрове управління має ряд переваг, куди відносяться: підвищена точність вимірювань; використання цифрових сигналів (кодів), датчиків і перетворювачів і мікропроцесорів; менша чутливість до шумів і перешкод.

Тому виявлення закономірностей перехідних процесів в замкнутих аналогових і цифрових системах автоматичного управління лінійними об'єктами і розробка на основі аналізу й теоретичного узагальнення отриманих результатів із використанням методу синтезу оптимальних квадратичних цифрових регуляторів за точністю є актуальною й дуже важливою проблемою.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Останнім часом для управління електромеханічними системами управління з складними кінематичними ланцюгами разом з традиційними системами підлеглого регулювання застосовуються системи управління по повному вектору стану з модальними і оптимальними регуляторами. Такі регулятори забезпечують вищі показники якості порівняно з чисто механічними регуляторами. Проте за допомогою механічних регуляторів неможливо істотно підвищити якість регулювання у зв'язку з тим, що наявність пружних елементів в прокатному стані починає впливати на динаміку системи управління.

Аналіз останніх публікацій по синтезу систем управління з використанням оптимальних регуляторів показує, що цей напрям є актуальним.

Мета статті. Розроблення математичної моделі аналогової і цифрової двомасової системи управління швидкістю обертання електроприводом прокатного стану з використанням аналогового і цифрового оптимального регулятора, а також побудувати на ПЕОМ перехідні процеси.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом управління у системи є тиристорний перетворювач – двигун постійного струму. Тиристорний перетворювач складається з системи імпульсно-фазового управління і власне тиристорного перетворювача, основним елементом якого є силова схема перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму за допомогою тиристорів. В якості навантаження перетворювача прийнята якірний ланцюг двигуна постійного струму. СІФУ здійснює перетворення неперервного сигналу керування, що надходить на його вхід, послідовність відпираючих імпульсів, зрушених по фазі щодо моментів природного відмикання тиристорів. Потім за допомогою власного тиристорного перетворювача здійснюється зворотне перетворення дискретних значень у кусково-безперервний сигнал вихідний координати - ЕРС перетворювача. Вибрана двоконтурна система з підлеглим регулюванням якірного ланцюга з контурами швидкості і струму, яка налаштована на симетричний оптимум. Сигнали зворотного зв'язку за струмом і швидкостю надходять з датчика струму і тахогенератора. За передавальними функціями (1) - (6) розраховані перехідні процеси аналогової системи підлеглого регулювання

$$\hat{O}_{\omega_{ä} U_{çø}}(s) = \frac{1}{\hat{E}_{òã}} \frac{\hat{A}(s)}{\grave{A}(s)}; \qquad (1)$$

$$\hat{O}_{I_{ä} U_{çø}}(s) = \frac{T_{ì}}{\hat{E}_{òã} R_{\Sigma}} \frac{s\hat{A}(s)}{\grave{A}(s)}; \qquad (2)$$

$$\hat{O}_{\omega_{ä} I_{ñ}}(s) = -\frac{R_{\Sigma} K_{ä}\, 8\grave{O}_{\mu ø}^{2}}{T_{m}} \frac{s\hat{A}(s)}{\grave{A}(s)}; \qquad (3)$$

$$\hat{O}_{I_{ä} I_{ñ}}(s) = \frac{\hat{A}(s)}{\grave{A}(s)}, \qquad (4)$$

де поліноми $\grave{A}(s)$ і $B(s)$ мають наступний вигляд

$$\grave{A}(s) = 8\grave{O}_{\mu ø}^{3} s^{3} + 8\grave{O}_{\mu ø}^{2} s^{2} + 4\grave{O}_{\mu ø} s + 1, \qquad (5)$$

$$\hat{A}(s) = 4\grave{O}_{\mu ø} s + 1. \qquad (6)$$

Згладжування вхідного сигналу здійснюється за допомогою пасивного фільтру з передавальною функцією замкнутого оптимізованого контуру швидкості, що включається на вході системі

$$R_{ô}(s) = \frac{1}{4\grave{O}_{\mu ø} \cdot s + 1}. \qquad (7)$$

Побудована алгоритмічна схема аналогової системи підлеглого регулювання, розроблена на ПЕОМ за допомогою пакету прикладних програм Матлаб у середовищі Simulink.

По передавальним функціям (1) - (4) і по алгоритмічній схемі, рис. 1 побудовані перехідні процеси аналогової системи підлеглого регулювання. Криві 1 на рис. 1 відповідають системі підлеглого регулювання, оптимізованій по симетричному критерію, а криві 2 – системі підлеглого управління з фільтром на вході. Для аналізу стійкості і якості цифрової системи можна використовувати z - перетворення передавальної функції. Таким чином досить просто можна визначити характеристики замкнутої системи управління, в якій комп'ютер виконує функції корегуючого пристрою (або регулятора).

По передавальним функціям (8) - (11) розраховані перехідні процеси цифрової системи підлеглого регулювання (рис. 2):

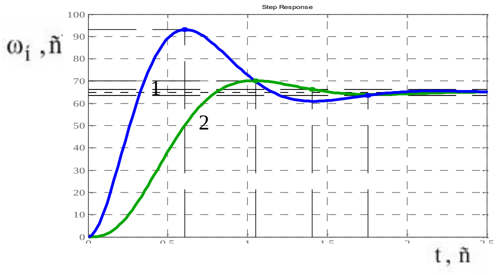
$$\hat{O}_{\omega_{ä} U_{çø}}(s) = \frac{1-e^{-sT}}{s} \cdot \frac{1}{\hat{E}_{òã}} \frac{\hat{A}(s)}{\grave{A}(s)}; \qquad (8)$$

$$\hat{O}_{I_{ä} U_{çø}}(s) = \frac{1-e^{-sT}}{s} \frac{T_{ì}}{\hat{E}_{òã} R_{\Sigma}} \frac{s\hat{A}(s)}{\grave{A}(s)}; \qquad (9)$$

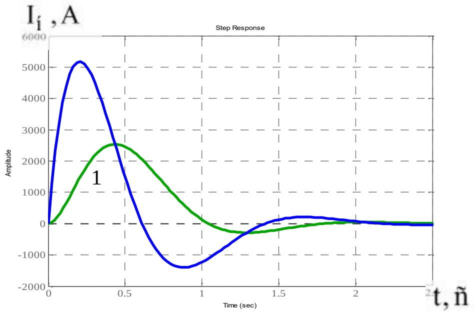
$$\hat{O}_{\omega_{ä} I_{ñ}}(s) = -\frac{1-e^{-sT}}{s} \frac{R_{\Sigma} K_{ä}\, 8\grave{O}_{\mu ø}^{2}}{T_{m}} \frac{s\hat{A}(s)}{\grave{A}(s)}; \qquad (10)$$

$$\hat{O}_{I_{ä} I_{ñ}}(s) = \frac{1-e^{-sT}}{s} \frac{\hat{A}(s)}{\grave{A}(s)}. \qquad (11)$$

Істотним недоліком симетричного критерію у разі, коли ступінчастий вхідний сигнал поступає на вхід замкненого контуру без запізнювання: значне перерегулювання швидкості по задаючій дії дорівнює 43,4 %, час першого узгодження $t_{ï.ó} = 0,33ñ$, час регулювання перехідної функції швидкості $t_{ð} = 1,75ñ$ при $\sigma = 2$ % відхиленні від вхідної величини, криві 1. Таке велике перерегулювання σ обумовлене наявністю в передавальній функції (7) форсуючої ланки.



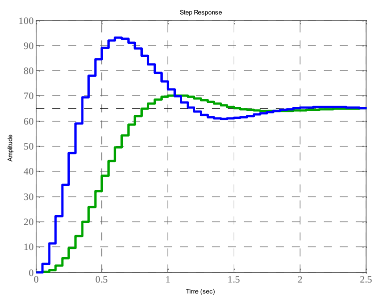
а – швидкості двигуна



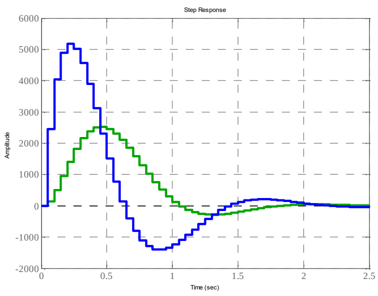
б – струму двигуна

Рис. 1. Графіки перехідних процесів аналогової системи підлеглого регулювання за задаючою дією

Як видно з графіків при включенні фільтру на вхід системи перерегулювання зменшилося до 8,1 %. Двомасова система побудована за принципом підлеглого регулювання Вал двигуна з моментом інерції $J_{ä}$ механічно сполучений з робочим механізмом (робочими валками) і пружним зв'язком з коефіцієнтом жорсткості с12, і коефіцієнтом в'язкого тертя β12. Приведений момент інерції робочого механізму дорівнює $J_{â}$. Складена система рівнянь стану двомасової системи управління з урахуванням пружних елементів:



а – швидкості двигуна



б – струму двигуна

Рис. 2. Графіки перехідних процесів цифрової системи підлеглого регулювання за задаючою дією

$$
\begin{cases}
\dfrac{d\omega_{\text{ì}}(t)}{dt}=-\dfrac{\beta}{J_{\text{ì}}}\cdot\omega_{\text{ì}}(t)+\dfrac{1}{J_{\text{ì}}}\cdot M_{\text{ï ðóæ}}(t)+\dfrac{\beta}{J_{\text{ì}}}\cdot\omega_{\text{ä}}(t)-\dfrac{1}{J_{\text{ì}}}\cdot M_{\text{ñ}}(t); \quad \dfrac{d\text{Ì}_{\text{ï}}(t)}{dt}=-\text{ñ}\cdot\omega_{\text{ì}}(t)+\text{ñ}\cdot\omega_{\text{ä}}(t);\\
\dfrac{d\omega_{\text{ä}}(t)}{dt}=\dfrac{\beta}{J_{\text{ä}}}\cdot\omega_{\text{ì}}(t)-\dfrac{1}{J_{\text{ä}}}\cdot M_{\text{ï ðóæ}}(t)-\dfrac{\beta}{J_{\text{ä}}}\cdot\omega_{\text{ä}}(t)+\dfrac{1}{J_{\text{ä}}}\cdot M_{\text{ä}}(t); \quad \dfrac{dM_{\text{ä}}(t)}{dt}=\dfrac{1}{\text{Ê}_{\text{ä}}}\cdot\rho(t);\\
\dfrac{d\rho(t)}{dt}=\dfrac{\text{Ê}_{\text{ðø}}}{2\text{Ò}^2_{\mu\text{ñ}}\cdot\text{Ê}_{\text{ñ}}}\cdot U_{\text{ô çø}}(t)-\dfrac{\text{Ê}_{\text{ä}}}{2\text{Ò}^2_{\mu\text{ñ}}}\cdot M_{\text{ä}}(t)-\dfrac{1}{\text{Ò}_{\mu\text{ñ}}}\cdot\rho(t)+\dfrac{\text{Ê}_{\text{ä}}}{\text{Ò}^2_{\mu\text{ñ}}\cdot\text{Ê}_{\text{ñ}}}\cdot U_{\text{зø}}(t);\\
\dfrac{dU_{\text{ô çø}}(t)}{dt}=\dfrac{1}{\text{Ò}_{\text{à}}}\cdot U_{\text{çø}}(t)-\dfrac{1}{\text{Ò}_{\text{à}}}\cdot U_{\text{çø}}(t); \quad \dfrac{dU_{\text{ççø}}(t)}{dt}=\dfrac{K_{\text{òã}}}{T_{\text{à}}}\cdot\omega_{\text{ä}}(t)-\dfrac{1}{T_{\text{à}}}U_{\text{ççø}}(t);\\
\dfrac{dU_{\text{ìø}}(t)}{dt}=K_{\text{ìø}}\cdot U_{\text{ô çø}}(t)-K_{\text{ìø}}\cdot U_{\text{ççø}}(t).
\end{cases}
$$

По диференційним рівнянням побудовані алгоритмічна схема двомасової системи управління з урахуванням пружних елементів, рис. 3, та перехідні процеси, рис. 4, по повному вектору стану за задаючою та збурюючою діях.

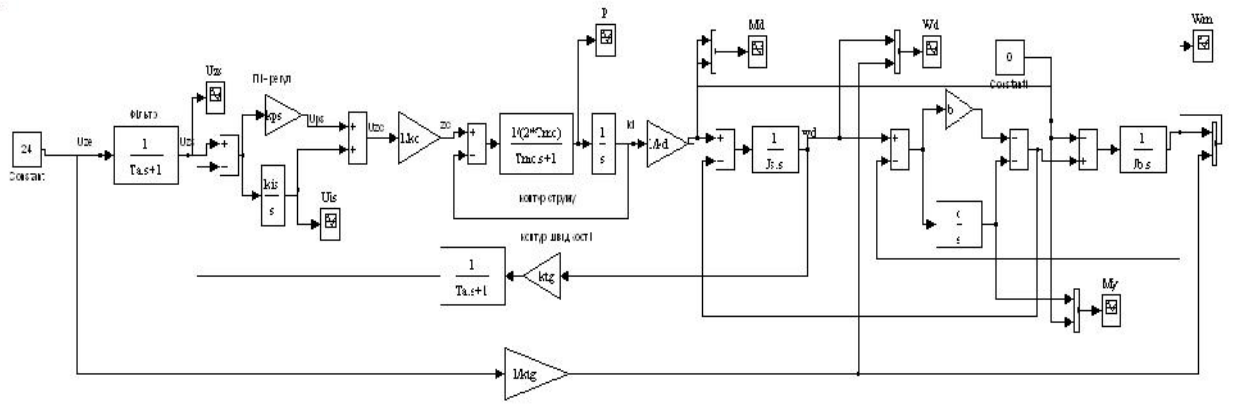


Рис. 3. Алгоритмічна схема аналогової двомасової системи управління з урахуванням пружних елементів, розроблена на ПЕОМ за допомогою Матлаб

Для аналогової двомасової системи управління введений вектор управління

$$\vec{U}(t)=\left[U_{\text{âõ}}(t), M_{\text{ñ}}(t)\right]^T$$

та вектор стану

$$\vec{X}(t)=\begin{bmatrix}\omega_{\text{ì}}(t), M_{\text{ï}}(t), \omega_{\text{ä}}(t), M_{\text{ä}}(t), \rho(t),\\ U_{\text{ô çø}}(t), U_{\text{ççø}}(t), U_{\text{ìø}}(t)\end{bmatrix}^T.$$

Аналоговий об'єкт регулювання описується лінійними рівняннями наступного вигляду:

$$\dot{\vec{X}}(t)=A\cdot\vec{X}(t)+B\cdot\vec{U}(t);$$

$$\vec{Y}(t)=C\cdot\vec{X}(t)+D\cdot\vec{U}(t);$$

$$\text{Â}=\begin{bmatrix}0 & -\dfrac{1}{J_{\text{â}}}\\ 0 & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\\ \dfrac{1}{\text{Ò}_{\text{à}}} & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix};$$

$$
\hat{A} = \begin{bmatrix}
-\frac{\beta}{J_{\hat{a}}} & \frac{1}{J_{\hat{a}}} & \frac{\beta}{J_{\hat{a}}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{\beta}{J_{\ddot{a}}} & -\frac{1}{J_{\ddot{a}}} & -\frac{\beta}{J_{\ddot{a}}} & \frac{1}{J_{\ddot{a}}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\hat{e}_{\ddot{a}}} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -\frac{\hat{e}_{\ddot{a}}}{2\grave{O}^2_{\mu\tilde{n}}} & -\frac{1}{\grave{O}_{\mu\tilde{n}}} & \frac{\hat{e}_{\eth\o}}{2\grave{O}^2_{\mu\tilde{n}}} & -\frac{\hat{e}_{\eth\o}}{2\grave{O}^2_{\mu\tilde{n}}\hat{e}_{\tilde{n}}} & \frac{1}{2\grave{O}^2_{\mu\tilde{n}}\hat{e}_{\tilde{n}}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\grave{O}_{\grave{a}}} & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{\hat{e}_{\grave{o}\tilde{a}}}{\grave{O}_{\grave{a}}\hat{e}_{\ddot{a}}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\grave{O}_{\grave{a}}} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \hat{e}_{\c{c}\o} & -\hat{e}_{\c{c}\o} & 0
\end{bmatrix}.
$$

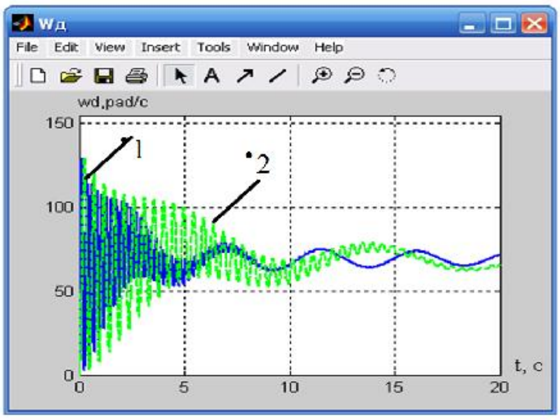
Для цифрової двомасової системи управління введений вектор управління

$$\vec{U}(\hat{e}) = \left[U_{\hat{a}\tilde{o}}(k), M_{\tilde{n}}(k)\right]^T$$

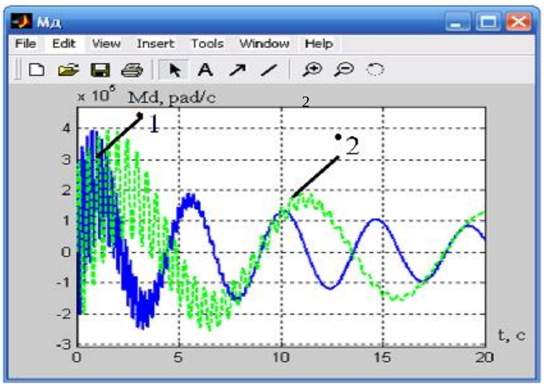
та вектор стану

$$\vec{X}(\hat{e}) = \begin{bmatrix} \omega_{\grave{i}}(\hat{e}), M_{\ddot{i}}(\hat{e}), \omega_{\ddot{a}}(\hat{e}), M_{\ddot{a}}(\hat{e}), \rho(\hat{e}), \\ U_{\hat{o}\c{c}\o}(\hat{e}), U_{\c{c}\c{c}\o}(\hat{e}), U_{i\o}(\hat{e}) \end{bmatrix}^T .$$

Як видно із графіків (рис. 4, 5), перехідні процеси мають сильно коливальний характер, перерегулювання складає σ=73%, час регулювання процесу у аналоговій системі до t_p =40с, а у цифровій до - t_p =20с. У двомасовій аналоговій та цифровій системі управління необхідно виконати оптимізацію.



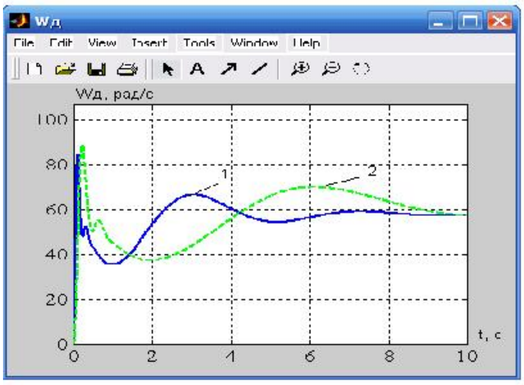
а – швидкості двигуна



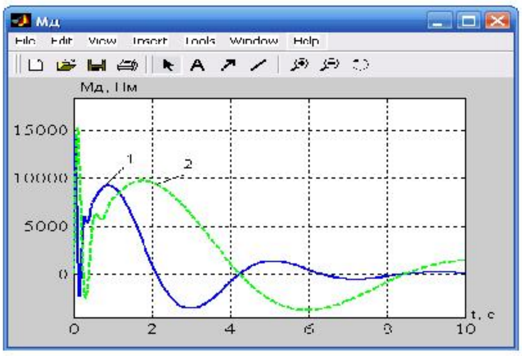
б – моменту двигуна

в – швидкості механізму

Рис. 4. Перехідні процеси аналогової і цифрової двомасової системи управління:
1 - аналогова; 2 - цифрова



а – швидкості двигуна



б – моменту двигуна

в – швидкості механізму

Рис. 5. Перехідні процеси оптимальної аналогової і цифрової двомасової системи управління:
1 - аналогова; 2 - цифрова

Для надання системи бажаних динамічних властивостей (якості перехідного процесу) використовують метод аналітичного конструювання оптимальних регуляторів.

Розраховані коефіцієнти оптимального регулятора і підібрані вагові матриці критерію якості, що дозволило поліпшити час регулювання перехідного процесу в оптимальній системі управління.

Висновки

Проведений вибір і розрахунок аналогової системи підлеглого регулювання параметрами електроприводу. Вибрана двохконтурна система підлеглого регулювання з контуром струму і швидкості. Проведений синтез послідовних корегуючих пристроїв контурів при настройці контура струму по модульному критерію, а контуру швидкості – по симетричному критерію.

Проведений розрахунок перехідних процесів цифрової системи підлеглого регулювання параметрами електроприводу. Проведений аналіз аналогової і цифрової системи підлеглого регулювання по передавальним і перехідним функціям.

Розроблені функціональні схеми і складена математична модель аналогової та цифрової двомасової системи управління з урахуванням пружних елементів. Проведений аналіз аналогової та цифрової двомасової систем управління. Показники якості перехідних процесів співпадають, із чого витікає, що розрахунок перехідних процесів виконаний за допомогою програми Матлаб вірний.

Як видно з графіків (див. рис. 6) перехідні процеси мають задовільний характер, тобто оптимізація аналогової і цифрової двомасової системи виконана вірно.

У перспективі доцільно досліджувати динамічні характеристики цифрової двомасової системи управління за зміною періоду дискретності та з оптимальним DLQR-регулятором.

У статті розроблена математична модель аналогової і цифрової двомасової системи управління швидкістю обертання електроприводом прокатного стану з використанням аналогового і цифрового оптимального регулятора, а також побудовані перехідні процеси на ПЕОМ за допомогою пакету прикладних програм Матлаб.

Список літератури

1. Исследование динамических характеристик системы регулирования толщины полосы стана холодной прокатки / Л.Б. Курцева, О.М. Пономаренко, В.М. Подоляк, О.В. Гнечка // Збірник тез доповідей XLIII НПК науково-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників. – Х. : УІПА, 2010. – С. 16.

2. Синтез системи оптимального управління головним електроприводом прокатного стану / Б.И. Кузнецов, С.М. Лутай, Л.Б. Курцева, Л.Г. Кузнецова, О.М. Пономаренко, О.С. Батура // Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2010г. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – Т.2. – С. 80-83.

3. Дискретная система автоматического регулирования толщины полосы с БГИМ прокатного стана 850 / Л.Б. Курцева, Е.М. Пономаренко, Ю.Н. Шкорина, К.В. Коломиец // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – К.: ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», 2012. – Вип. 3(23), – С. 87 – 90.

Поступила в редколегію 11.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.І. Барсов, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВОЙ И ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОКАТНОГО СТАНА

Л.Б. Курцева, А.А. Власов

Приведены результаты исследования переходных процесов аналоговой и цифровой двухмассовой системы управления с учетом упругих элементов.

Ключевые слова: *аналоговая система, цифровая система, система управления, вектор состояния, рабочий механизм.*

SYNTHESIS AND STUDY OF ANALOG AND DIGITAL CONTROL SYSTEM OF THE MILL

L.B. Kurceva , A.A. Vlasov

Results of research of transients analog and digital two-mass system of management based on the elastic elements.

Keywords: *analog system, digital system, control system, vector of state, working mechanism.*