

УДК 621.313.2.001.57

СОВМЕСТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ЧЕТЫРЁХКЛЕТЬЕВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА И МОТАЛКИ

Синявский А.А., асп.,

Запорожский национальный технический университет

69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64

E-mail: bestmind@inbox.com

Розроблено математичні й імітаційні моделі, що описують спільну роботу електроприводів клітей безперервного тонколистового чотирьохклетьєвого прокатного стану й моталки з урахуванням ефекту пружного сплющування робочих валків. За допомогою отриманих моделей виконані розрахунок і аналіз електромеханічних процесів стану.

Ключові слова: моталка, прокатний стан, пружний стиск робочих валків.

A mathematical and imitation model, which defines cooperation of uninterrupted thin-sheet four-stands mill's electric drivers and coiler's drive with an accounting springy compression of worked rollers, was developed. This model was used to get a calculation and analysis of electromechanical rolling process.

Key words: coiler, mill, springy compression of worked rollers.

Введение. Использование методов математического моделирования для построения моделей сложных электротехнических комплексов позволяет провести исследование электромеханических процессов. Актуально и востребовано практикой получение математической модели электроприводов непрерывного тонколистового четырёхклетьевого прокатного стана, учитывающей совместную работу электрических и механических узлов приводов, в том числе и эффект упругого сплющивания рабочих валков, наличие упругих связей между рабочими клетями и между четвёртой клетью и моталкой, влияние условий прокатки на характеристики продукции.

Анализ предыдущих исследований. В научнотехнической литературе предложены разные подходы к построению математической модели электроприводов клетей и моталки прокатных стана. В общем случае эти модели описываются нелинейными дифференциальными уравнениями [1–3]. Предложенные решения [4–7] позволяют получить приближённую модель моталки, как механизма прокатного стана, в которой некоторые непостоянные параметры приняты константами, например, в [4], толщина сматываемого в рулон металла. Такое допущение может вносить погрешность при моделировании динамических процессов.

Математическая модель электроприводов клетей непрерывного четырёхклетьевого прокатного стана холодной прокатки была рассмотрена в работе [10] без учёта процессов в моталке.

Цель работы заключается в разработке и исследовании совместной модели электроприводов клетей непрерывного четырёхклетьевого прокатного стана и моталки с учётом эффекта упругого сплющивания рабочих валков.

Материал и результаты исследования. Совместная математическая модель включает в себя математические модели клетей, межклетьевого промежутков, моталки и электродвигателей.

Математическая модель клетки, согласно [3–5], представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 M_d - M_p + F_2 R - F_1 R &= J \frac{d\omega}{dt}; \\
 M_p &= 2P_c \Psi b L_d; \\
 P_c &= 1,15 \sigma_T \frac{2h_2}{(h_1 - h_2)(\delta - 1)} \left[\left(\frac{h_\gamma}{h_2} \right)^\delta - 1 \right] - \\
 &\quad - \frac{1}{2} \left(\frac{F_1}{bh_1} + \frac{F_2}{bh_2} \right); \\
 \left(\frac{h_\gamma}{h_2} \right) &= \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1)(h_1/h_2)^\delta}}{\delta + 1} \right); \\
 \delta &= \frac{f_y}{\operatorname{tg}(\alpha/2)}; \\
 L_d &= \sqrt{R_v (h_1 - h_2) + (cmRP_c)^2} + cmRP_c; \\
 \alpha &= \frac{L_d}{R_c}; \\
 R &= R_v - \Delta R; \\
 \Delta R &= 2R_v \frac{m^2}{4} P_c; \\
 h_2 &= h_2^* - 2 \cdot \Delta R; \\
 V_{2к} &= \omega R \frac{h_\gamma}{h_2}; \\
 V_{1к} &= V_{2к} \frac{h_2}{h_1}; \\
 m &= \frac{8(1 - \mu^2)}{\pi E},
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где: M_d – крутящий момент приводного двигателя, J – суммарный, приведённый к валу двигателя, мо-

мент інерції, R_v – радіус валка, h_γ – товщина металла в нейтральному сеченні, f_γ – коефіцієнт трення, L_d – довжина зони деформації, m – проміжочний коефіцієнт, R – радіус робочого валка з урахуванням сплюснення.

Для моделювання технологічного процесу прокатки вибрані наступні коефіцієнти: $\mu = 0,3$; $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; $\Psi = 0,2$; $c = 1,375$. Вхідними координатами є сили переднього і заднього натяження металла F_1 і F_2 , растров робочих валків h_2^* , крутячий момент приводного двигателю M_d , товщина прокатуваного металла h_1 . Вихідними координатами служать: лінійні швидкості руху металла при вході в зону деформації V_{1k} і при виході з неї V_{2k} , кутова швидкість обертання валків ω , товщина металла при виході з зони деформації h_2 .

Математичну модель міжклетьевого проміжку можна представити згідно [3, 4, 8] в вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{V_{2п} - V_{1п}}{l} (1 + \varepsilon); \\ F &= \begin{cases} 0, \text{ якщо } \varepsilon < 0; \\ E S \varepsilon, \text{ якщо } \varepsilon \geq 0, \end{cases} \\ S &= h_p \cdot b; \\ h_p &= \frac{h_{in}}{1 + \varepsilon}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де: E – модуль Юнга, l – довжина проміжку, b – ширина стрічки, h_{in} – товщина стрічки металла при вході в проміжок, в моделі індекс in змінюється на номер клітки з якої поступає метал, а індекс r змінюється на номери кліток, між якими знаходиться даний проміжок.

Вхідними координатами моделі є лінійні швидкості руху стрічки металла $V_{1п}$ і $V_{2п}$, відповідно на вході в проміжок і на його виході. Вихідними координатами моделі служать натяження металла F в проміжку і товщина листа металла h_p , змінюючись внаслідок його розтягнення.

Математичну модель моталки прокатного стану згідно [1-4,9,10] можна представити в вигляді:

$$\left. \begin{aligned} M_C &= F_1 \cdot R_R; \\ M_d - M_C &= J_M \frac{d\omega_m}{dt} + \omega_m \frac{dJ_M}{dt}; \\ V &= \omega_m \cdot R_R; \\ R_R &= R_{VM} + \frac{1}{2\pi} \int_{tb}^{te} h \cdot \omega_m \cdot dt; \\ m_R &= \pi \cdot b \cdot \rho (R_R^2 - R_V^2); \\ J_M &= J_m + m_R \cdot \frac{R_R^2 - R_V^2}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де V – лінійна швидкість сматывання стрічки металла, R_R – поточний радіус рулона, F – поточне натяження сматываемого матеріалу, M_d – крутячий момент двигателю, M_C – момент опору, J_m – момент інерції механізму, J_M – момент інерції всієї системи моталка – рулон, ω_m – кутова швидкість обертання барабана моталки, R_v – радіус барабана, на який наматывається рулон, h – товщина наматываемого листа, tb , te – час початку і закінчення процесу наматывання,

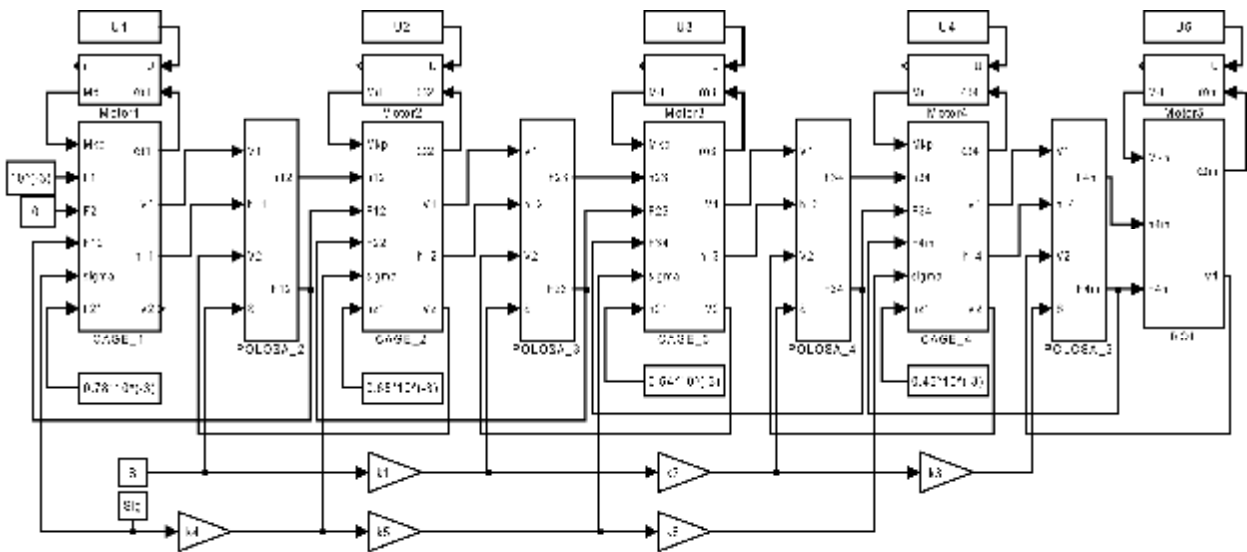


Рисунок 1 – Імітаційна модель прокатного стану

b – ширина рулона, ρ – удельная плотность стали, m_R – масса наматываемого рулона. Входными координатами модели являются момент приводного двигателя, натяжение на участке моталка – четвёртая клетка, толщина полосы сматываемого металла. Выходной координатой модели служит линейная скорость сматывания полосы металла, эта скорость поступает в модель межклетьевого промежутка: четвёртая клетка – моталка.

Математическая модель электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена в виде [11]:

$$\left. \begin{aligned} M_d &= C\Phi I; \\ U - \omega C\Phi &= L \frac{dI}{dt} + R_d I, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где: Φ – магнитный поток двигателя; C – конструктивная постоянная двигателя; L, R_d – суммарные индуктивность и активное сопротивление якорной цепи двигателя; I и U – ток и напряжение якорной цепи двигателя.

Имитационная модель и результаты моделирования. Имитационная модель четырёхклетьевого прокатного стана с механизмом моталки, учитывающая упругое сплющивание рабочих валков в процессе прокатки, выполненной в пакете Matlab, представлена на рис. 1. Блоки CAGE_1 – CAGE_4 реализуют систему уравнений (1), POLOSA_1 – POLOSA_5 реализуют систему уравнений (2), Motor1 – Motor5 реализуют систему уравнений (4), блок ROL реализует систему уравнений (3). Блоки S и Sig задают механические свойства прокатываемой стали. Блоки: k1 – k6 задают коэффициенты, учитывающие изменение механических свойств прокатываемой стали в зависимости от условий прокатки.

С использованием данной имитационной модели проведено моделирование электромеханических процессов в режиме постоянно заданных значений якорных напряжений приводных двигателей клетей и приводного двигателя моталки (т.е. без использования систем автоматического управления координатами приводов). Результаты такого моделирования могут быть полезны для исследования блоков моделей без дополнительных обратных связей. Якорные напряжения приводных двигателей клетей и моталки подбирались расчётным путём из условия отработки требуемых значений межклетьевых натяжений. В начальный момент пуска модели предполагалось, что металл заправлен во все клетки и заданы требуемые растворы рабочих валков: 0,78 мм; 0,65 мм; 0,54 мм и 0,45 мм для первой, второй, третьей и четвёртой клетки соответственно.

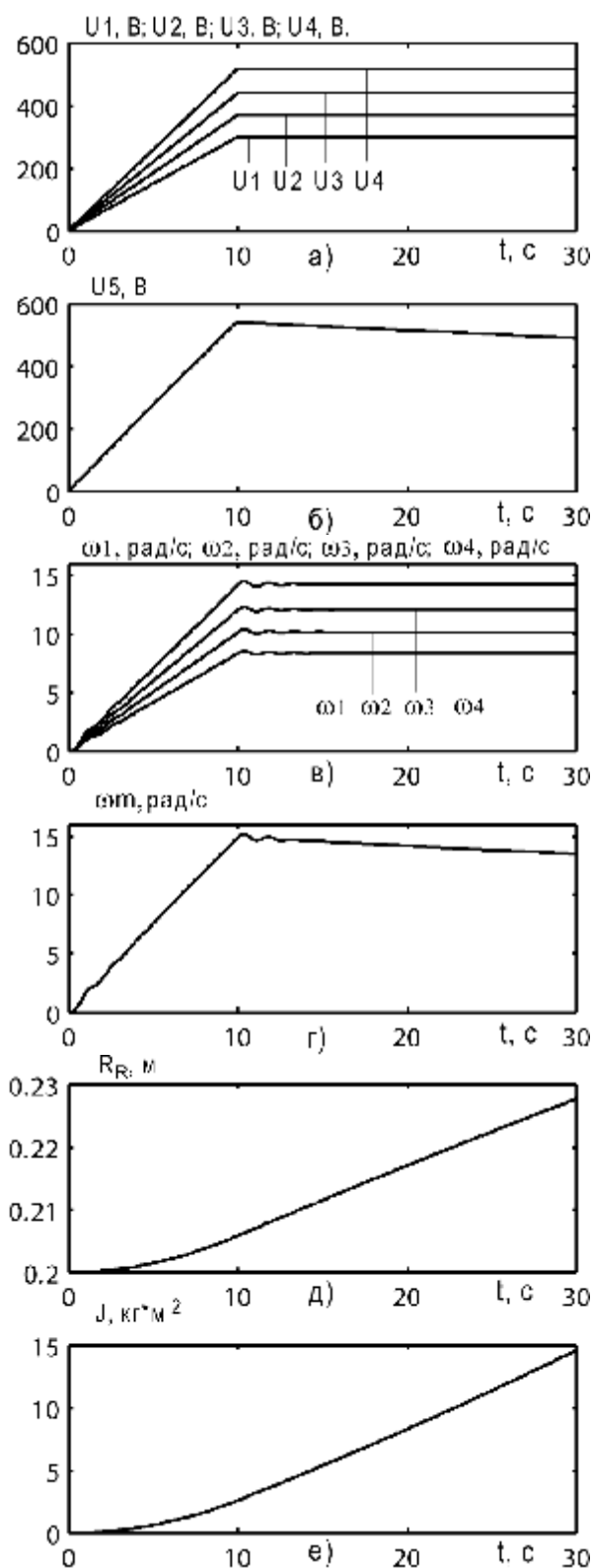


Рисунок 2 – Переходные процессы в имитационной модели прокатного стана: а) задание напряжений на якорях двигателей клетей; б) задание напряжения на якоре двигателя моталки; в) угловые скорости рабочих валков клетей; г) угловая скорость барабана моталки; д) изменение радиуса рулона; е) приращений момента инерции моталки вследствие сматывания полосы в рулон

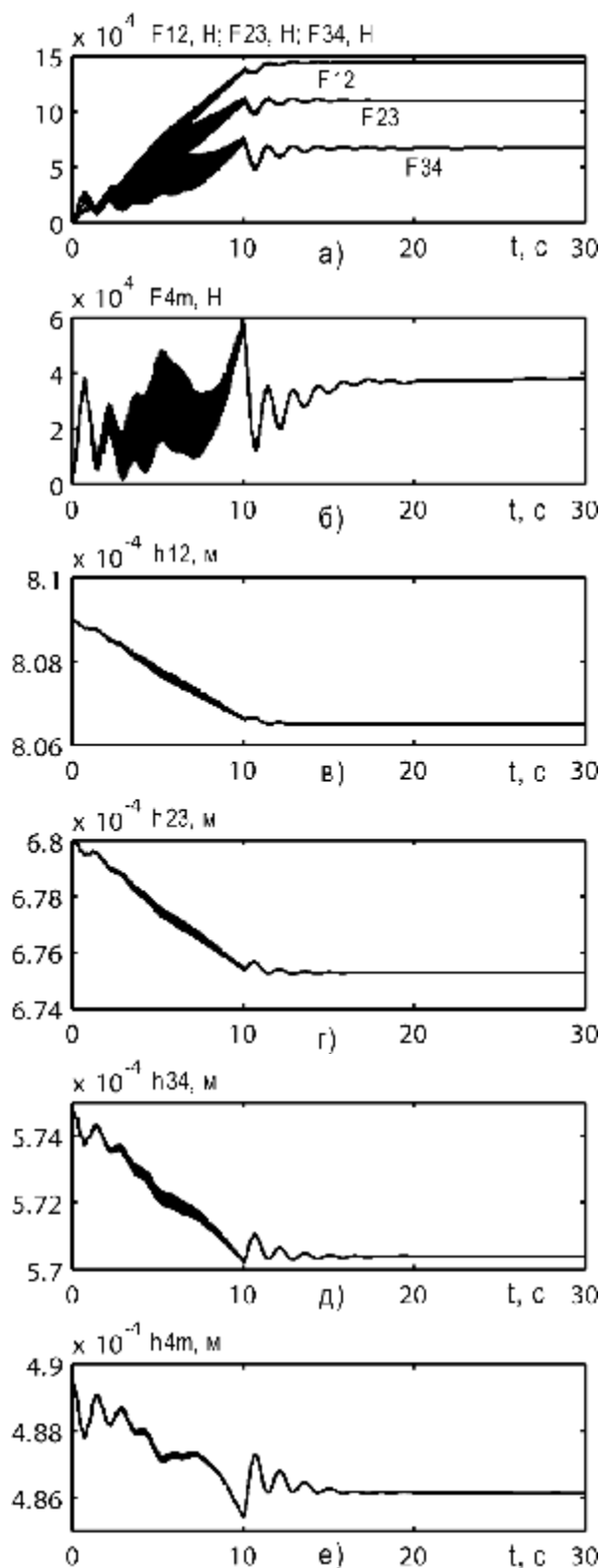


Рисунок 3 – Переходные процессы в имитационной модели прокатного стана: а) межклетьевые натяжения; б) натяжение четвертая клетъ – моталка; в) толщина металла при выходе из первой клетки; г) толщина металла при выходе из второй клетки; д) толщина металла при выходе из третьей клетки; е) толщина металла при выходе из четвертой клетки

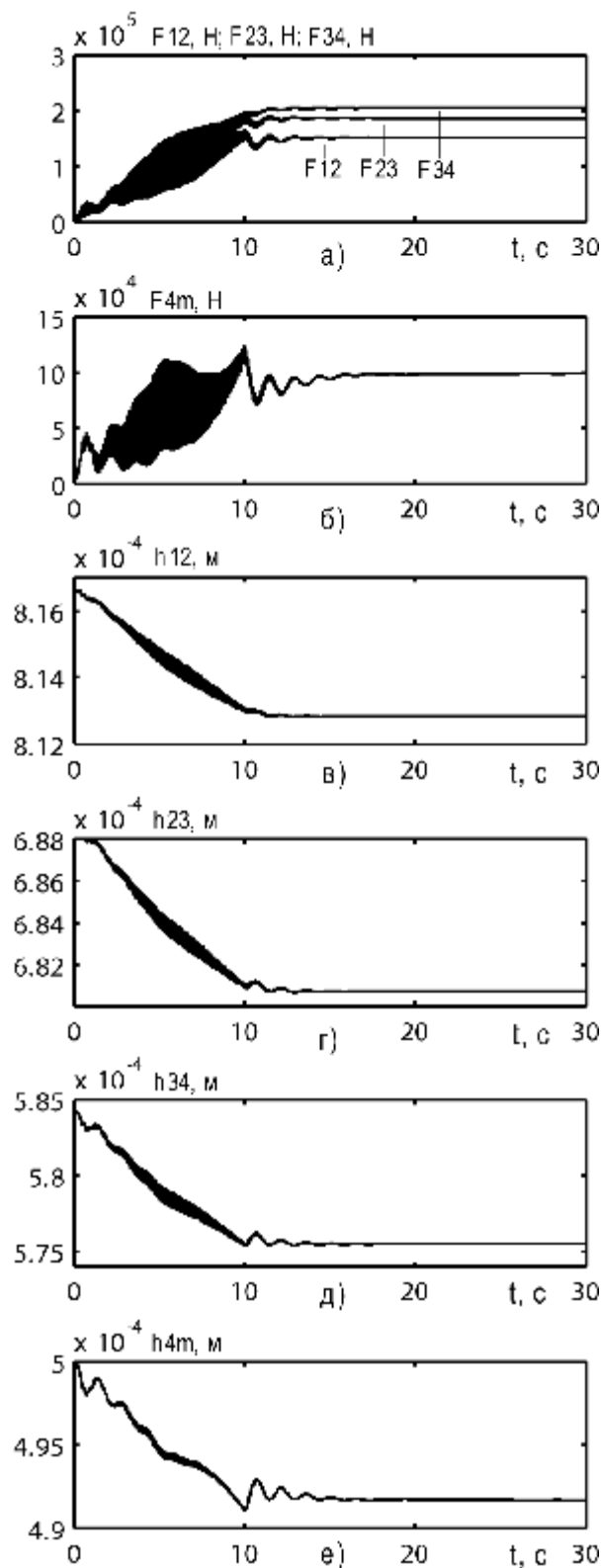


Рисунок 4 – Переходные процессы в имитационной модели прокатного стана с увеличенной жесткостью прокатываемой полосы на 30%: а) межклетьевые натяжения; б) натяжение четвертая клетъ – моталка; в) толщина металла при выходе из первой клетки; г) толщина металла при выходе из второй клетки; д) толщина металла при выходе из третьей клетки; е) толщина металла при выходе из четвертой клетки

Результаты моделирования работы непрерывного прокатного стана, приведенные на рис. 2–3 демонстрируют, что из-за наличия упругого сплющивания рабочих валков толщина металла при выходе из клетки оказывается большей, чем заданное обжатие. Величины толщин прокатываемого листа стали при выходе из клеток могут меняться вследствие изменения межклетевых натяжений, которые могут быть вызваны изменением жесткости металла, что меняет баланс сил при прокатке.

На рис. 4 приведены результаты моделирования работы прокатного стана при увеличенной жесткости прокатываемой полосы на 30%, все прочие параметры и задания сохранены неизменными. Анализ данных результатов показывает, что изменение жесткости приводит к изменению межклетевых натяжений и натяжения последняя клеть – моталка, также происходит изменение толщин металла при прокатке. С увеличением жесткости полосы в большей степени проявляется упругое сплющивание рабочих валков клеток прокатного стана.

Колебания натяжений в переходном процессе имеет две составляющие. Первая составляющая определяется постоянными времени приводных двигателей клеток и моталки, частота этих колебаний приблизительно 1 Гц (рис. 3, 4). Вторая составляющая, частота колебаний 10 Гц, вызвана упругим растяжением полосы металла между клетями и между последней клетью и моталкой, влиянием этого растяжения на расстановку сил в зонах деформации клеток и изменение коэффициентов, определяющих линейные скорости движения металла до и после деформации.

Подбор напряжений двигателей модели показал сильное влияние значений этих напряжений на переходные процессы и установившиеся режимы в исследуемом приводе. Для поддержания заданных параметров процесса прокатки (толщина металла) необходимо разработать совместную систему управления, способную контролировать ряд взаимосвязанных координат прокатного стана.

Выводы. Разработанная модель позволила исследовать совместно электромеханические процессы, происходящие в клетях, моталке и межклетевых промежутках, с учётом упругого сплющивания рабочих валков прокатных клеток.

Увеличение жесткости прокатываемого металла на 30% из-за возрастания натяжения и наличия упругого сплющивания рабочих валков прокатных

клетей приводит к изменению толщины металла в межклетевых промежутках от 0,004 мм до 0,007 мм.

Для заданных параметров системы возможно возникновение колебаний с частотами 1 Гц и 10 Гц, из-за наличия постоянных времени электроприводов и упругих связей в межклетевых промежутках, а также в клетях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Робертс В.. Холодная прокатка стали. – М: Металлургия, 1982. – 300 с.
2. Зеленев А.Б., Тертичников Н.В., Гулякин В.Г. Электропривод механизмов прокатных станов. – Харьков: Metallurgizdat, 1963. – 340 с.
3. Грудев А.П. Теория прокатки. – М: Интермет инжиниринг, 2001. – 280 с.
4. Пирожок А.В., Супрун А.А., Супрун Ю.А. Имитационные модели электромеханических процессов тонколистового стана холодной прокатки // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – №2. – С. 34-42.
5. Мокрий Г.В., Борисов О.О. Моделювання динаміки листопркатного стана і оптимізація управління процесом прокатки // Наукові праці ДонНТУ Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Вип. 74. – 2006. – С. 14-18.
6. Жуков С.Ф., Шамрай А.А. Синтез динамической линеаризованной модели клетки непрерывного стана холодного проката // Техн. електродинаміка. Тем. випуск: Электропривод. – 2006. – С. 48-53.
7. Назарова Е.С., Пирожок А.В., Супрун Ю.А. Имитационные модель механического движения металла для реверсивного одноклетьевого стана холодной прокатки // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – №1. – С. 8-14.
8. Синявский А.А. Учёт эффекта упругого сплющивания рабочих валков в имитационной модели электроприводов клеток непрерывного тонколистового прокатного стана // Электротехника и електроенергетика. №2 – 2007. – С. 54-61.
9. Лукьянец В.А. Физические эффекты в машиностроении.: Справочник – М: Машиностроение, 1993. – 224 с.
10. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М: Металлургия, 1967. – 259 с.
11. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. – М: Энергия, 1971. – 432. с.

Стаття надійшла 8.05.08
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.