

УДК 621.771.685.5

**О. П. Єгоров<sup>1</sup>**, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-9867-0437**М. О. Рибальченко<sup>1</sup>**, к.т.н., доц., ORCID 0000-0001-5162-5201**І. О. Маначин<sup>1,2</sup>**, к.т.н., доц., ORCID 0000-0001-9795-6751<sup>1</sup>Український державний університет науки і технологій<sup>2</sup>Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

## АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ШВИДКІСНИМ РЕЖИМОМ ВІЛЬНОЇ ПРОКАТКИ З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

**Анотація.** Найкращим швидкісним режимом прокатки на дрібносортих станах є режим вільної прокатки з петлеутворенням у чистових групах клітей. Стабілізація петлі здійснюється системою керування частотою обертання валків прокатних клітей за інформацією датчика положення петлі. Збільшення петлі прокату залежить від частот обертання валків суміжних клітей і коефіцієнта витяжки прокату в кліті, наступної за регульованим проміжком. Для налаштування системи необхідно знати числові характеристики впливів, що обурюють і впливають на величину петлі прокату. Було досліджено зміну частоти обертання двигуна головного приводу клітей при стабілізації величини петлі прокату в міжклітьовому проміжку клітей чистової групи безперервного прокатного стану. Зміна частоти обертання валків характеризує сумарні дії режиму прокатки на величину петлі. Дослідження показали, що у не стаціонарної реалізації можна виділити тренд, який описується цілком детермінованою залежністю, та проводити аналіз випадкової стаціонарної реалізації щодо цього тренду. Була розроблена структурна схема контуру регулювання положення петлі прокату. Ця схема включає: електропровід з контуром струму, контуром швидкості, регулятором швидкості, петлею прокату, регулятором положення петлі, компенсатором обурювальних впливів. Компенсатор виконано на базі Fuzzy контролера і виробляє керуючий вплив залежно від неузгодженості в контурі петлерегулювання. Цим самим відстежується та компенсується низькочастотна складова обурення за швидкістю прокату, яка може досягати 10% від швидкості прокатки. Отримані дані зміни величини петлі без компенсуючого контуру та з ним. Величина петлі в системі без компенсуючого контуру при прокатуванні більш потовщеної задньої частини прокату досягає максимально допустимого розміру. В системі з компенсуючим контуром цього не відбувається. Стабілізувати величину петлі в заданому діапазоні можна або збільшуючи коефіцієнт регулятора, погіршуючи при цьому динаміку всієї багатозв'язкової системи управління швидкісним режимом прокатки, або використовуючи запропонований метод адаптивної компенсації обурення.

**Ключові слова:** вільна прокатка, валки, швидкісний режим, петля, регулятор, Fuzzy контролер.

**Посилання для цитування:** Єгоров О. П., Рибальченко М. О., Маначин І. О. Адаптивна система управління швидкісним режимом вільної прокатки з нечітким регулятором. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 340-348. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-340-348>

**Мета роботи:** виконати аналіз ефективності системи регулювання положення петлі прокату з компенсатором обурювальних впливів.

### Основні результати дослідження

Найкращим швидкісним режимом прокатки на дрібносортих станах є режим вільної прокатки з петлеутворенням у чистових групах клітей [1]. На рис. 1 представлений процес прокатки дрібносортного прокату з петлею (режим вільної прокатки). Стабілізація петлі здійснюється системою керування частотою обертання валків прокатних клітей за інформацією датчика положення петлі.

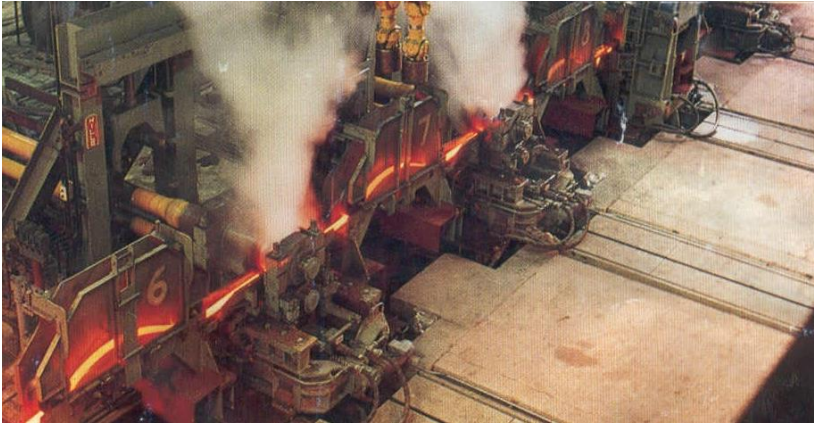


Рисунок 1 – Процес прокатки дрібносортного прокату з петлею (режим вільної прокатки).

На рис. 2 наведена схема створення вертикальної петлі за допомогою ролика 1, встановлюваного поблизу вивідної проводки 2 кліті 3, який після входу переднього кінця прокату 4 в наступну кліть 5 відхиляє його від осі прокатки.

Збільшення петлі прокату залежить від частот обертання валків суміжних клітей і коефіцієнта витяжки прокату в кліті, наступної за регульованим проміжком.

$$\Delta l_i = \int_0^t \left( \omega_i \cdot R_i (1 + S_i) - \frac{\omega_{i+1} \cdot R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\lambda_{i+1}} \right) dt, \quad (1)$$

де  $R_i, R_{i+1}$  - робочі радіуси валків  $i$ -ої та  $i+1$ -ої клітей;  $S_i, S_{i+1}$  - випередження в  $i$ -ої та  $i+1$ -ій клітях;  $\omega_i, \omega_{i+1}$  - частота обертання приводів  $i$ -ої та  $i+1$ -ої клітей;  $\lambda_{i+1}$  - коефіцієнт витяжки прокату в  $i+1$ -ій кліті.

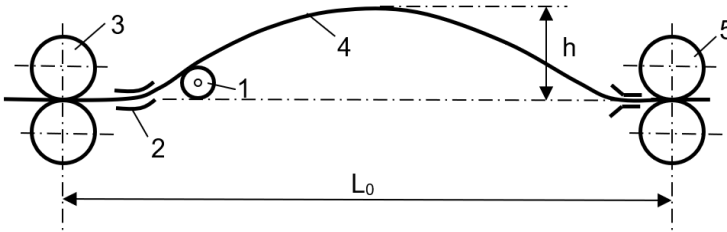


Рисунок 2 – Схема створення вертикальної петлі за допомогою ролика.

Висота петлі визначається надмірною довжиною прокату в даному міжклітьовому проміжку, а також формою петлі. Для достатньої точності вона може бути знайдена з рівняння гнучкої нитки

$$L = L_0 + \frac{8 \cdot h^2}{3 \cdot L_0}, \quad (2)$$

де  $L_0$  – довжина міжклітьового проміжку і  $L$  довжина розкату в ньому,  $h$  – висота петлі.

Під час налаштування швидкісного режиму прокатки та роботі систем автоматичного управління виникають завдання одночасної узгодженої зміни частот обертання приводів валків групи клітей. Для цих цілей розроблені різноманітні пристрої зміни напруги завдання у вхідних ланцюгах у аналогових системах, та розрахунок завдання у цифрових.

У аналізованій системі в основу алгоритму функціонування системи управління покладено обчислення для кожної  $i$ -тої кліті елементарної добавки швидкості, яка визначається як частка від ділення початкового значення завдання частоти об/хв валків кліті на постійний для всіх клітей коефіцієнт, наприклад,  $K = 1000$ . Це реалізується зрушенням 10 біт старших розрядів змінної завдання обертів валків в 10 молодших розрядів пам'яті типу подвійне слово. Таким чином, старші розряди визначають цілу частину значення, а молодші – дробову частину завдання швидкості. Так як число оборотів двигунів приводів валків на дрібносортирних станах не перевищує 1000 об/хв., то елементарна добавка зміни завдання швидкості не буде перевищувати 1. Це забезпечує похибку завдання частоти обертів двигуна приводу валків не більше 1 об/хв.

При необхідності узгодженої зміни швидкостей обертання групи

клітей до початкових значень швидкостей обертання валків, наприклад,  $q_i$  та  $q_{i+1}$  додається або віднімається рівне число відповідних елементарних добавок. Після корекції швидкісного режиму нові значення швидкостей валків суміжних клітей матимуть такі ж співвідношення як і до корекції:

$$\frac{q'_i}{q'_{i+1}} = \frac{q_i + Z \cdot \frac{\Delta q_i}{K}}{q_{i+1} + Z \cdot \frac{\Delta q_{i+1}}{K}} = \frac{q_i}{q_{i+1}}, \quad (3)$$

де  $Z$  – число елементарних добавок.

Система керування швидкісним режимом прокатки представлена на рис. 3.

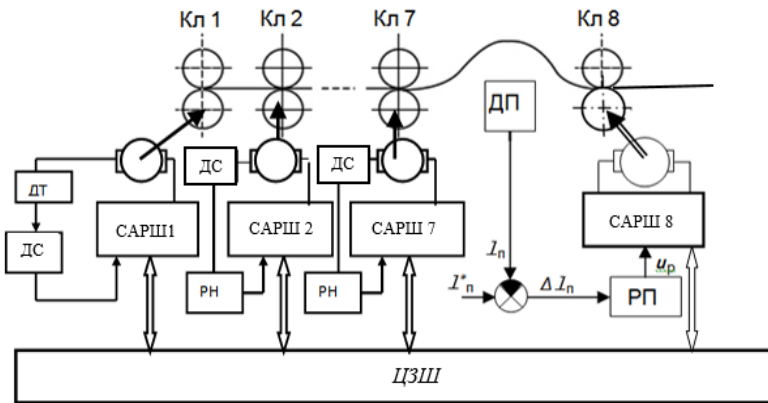


Рисунок 3 – Система керування швидкісним режимом прокатки.

Тут за інформацією якірних струмів (ДС) ланцюгів двигунів приводів валків клітей у чорновій групі здійснюється підстроювання режиму натягу прокату при заході передньої ділянки прокату за допомогою регуляторів натягу (РН) та систем автоматичного регулювання швидкості (САРШ) валків клітей. У чистовій групі клітей здійснюється регулювання величини петлі прокату.

Усі системи працюють незалежно завдяки системі цифрового завдання швидкостей, коли зміна частоти валків клітей відбувається без зміни співвідношення частот обертання валків суміжних клітей. Однак для поліпшення динаміки роботи головних приводів бажано зменшити (в ідеалі виключити) вплив регулювання петлі прокату одного контуру на інший. Це може досягатися компенсацією впливу на величину петлі низькочастотної складової обурення. Данні приводу [4] для комп'ютерного моделювання наведені в таблиці 1.

Структурна схема комп'ютерної моделі приводу наведена на рис. 4.

Таблиця 1 – Данні головного приводу для комп'ютерного моделювання.

$U_n,$ В	$I_n,$ А	$R_e,$ Ом	$L_e,$ Гн	$n,$ об/хв	$M_n,$ Дж	$J,$ Дж·с <sup>2</sup>	$K_{л·Ф},$ Вс	$T_m,$ с	$T_e,$ с
600	1550	0.387	$8.7 \cdot 10^{-4}$	300-800	27738	1110	18.5	0.0875	0.032

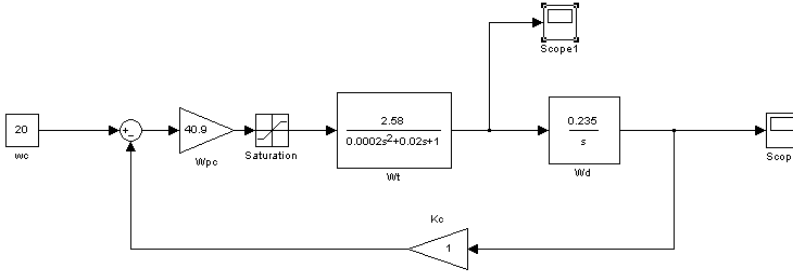


Рисунок 4 – Структурна схема комп'ютерної моделі приводу.

де  $W_t(s) = \frac{2.58}{0.0002s^2 + 0.02s + 1}$  - передатна функція замкнутого контуру струму;  $W_{pc} = 40.9$  - передатна функція регулятора швидкості;  $W_d = \frac{0.235}{s}$  - передатна функція двигуна.

Для налаштування системи необхідно знати числові характеристики впливів, що обурюють і впливають на величину петлі прокату.

На рис. 5 представлений графік зміни частоти обертання двигуна головного приводу клітей при стабілізації величини петлі прокату в міжклітьовому проміжку клітей чистової групи безперервного прокатного стану [2]. Зміна частоти обертання валків характеризує сумарні дії режиму прокатки на величину петлі.

Для спрощення аналізу зміни обурення в системі методами випадкового процесу, апроксимували графік зміни частоти обертання валків при стабілізації петлі та виділили тренд та випадкову складову.

Таким чином, у не стаціонарній реалізації можна виділити тренд, який описується цілком детермінованою залежністю, та проводити аналіз випадкової стаціонарної реалізації щодо цього тренду.

Впливи в контурі регулювання петлі прокату мають високочастотну складову, викликану динамічними процесами в самому контурі і низькочастотну, пов'язану зі зміною режиму обтиску від передньої ділянки прокату до задньої ділянки в першій чистовій кліті.

Високочастотні складові обурення придушуються пропорційною частиною регулятора, а низькочастотні інтегральною частиною. Тому вихідний сигнал регулятора петлі може бути використаний для системи адаптивної компенсації великої величини зміни швидкості прокату в міжклітьовому проміжку.

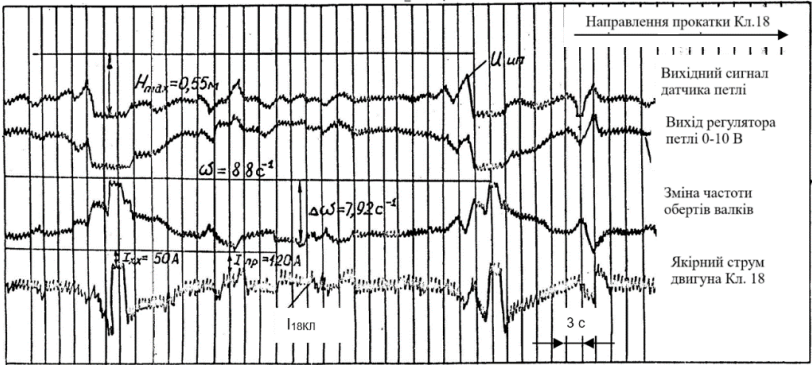


Рисунок 5 – Графік зміни частоти обертання двигуна головного приводу клітей при стабілізації величини петлі прокату.

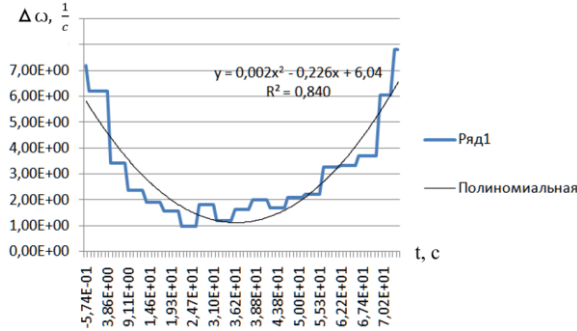


Рисунок 6 – Графік зміни частоти обертання двигуна головного приводу клітей із усередненням по 10 точках. Апроксимуюча крива – поліноміальний тренд.

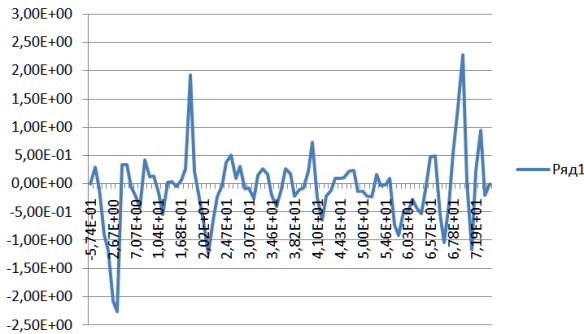


Рисунок 7 – Графік відхилення частоти обертання від середнього значення.

На рис. 8 представлена структурна схема контуру регулювання положення петлі прокату (регулятори розраховані за методикою [5]). Ця схема включає: електропровід з контуром струму, контуром швидкості, регулятором швидкості, петлею прокату, регулятором положення петлі, компенсатором обурювальних впливів. Компенсатор виконан на базі Fuzzy контролера [6] і виробляє керуючий вплив залежно від неузгодженості в контурі петлерегулювання. Цим самим відстежується та компенсується низькочастотна складова обурення за швидкістю прокату, яка може досягати 10 % від швидкості прокатки.

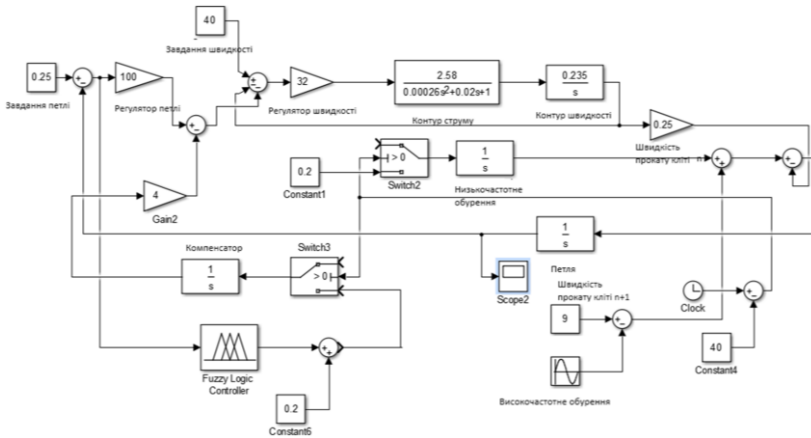


Рисунок 8 – Структурна схема контуру регулювання положення петлі прокату.

На рис. 9 представлений графік зміни величини петлі без компенсуючого контуру. Величина петлі при прокатуванні більш потовщеної задньої частини прокату досягає максимально допустимого розміру.

З компенсуючим контуром цього не відбувається (рис. 10).

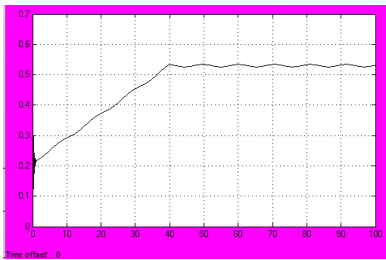


Рисунок 9 – Графік зміни величини петлі без компенсуючого контуру.

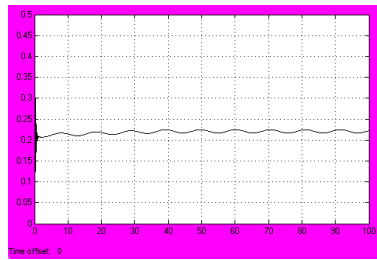


Рисунок 10 – Графік зміни величини петлі з компенсуючим контуром.

## Висновки

1. Стабілізувати величину петлі в заданому діапазоні можна або збільшуючи коефіцієнт регулятора, погіршуючи при цьому динаміку всієї багатозв'язкової системи управління швидкісним режимом прокатки, або використовуючи запропонований метод адаптивної компенсації обурення.

2. Запропонований метод компенсації за допомогою адаптивного регулятора суттєво покращує динамічні процеси у системі. При моделюванні роботи системи керування швидкісним режимом прокатки відхилення довжини петлі не перевищило 0,02 м.

## Перелік посилань

1. Чекмарев А. П. и др. *Прокатка на мелкосортных станах*. М. :Металлургия, 1967. 363 с.
2. Грудев А. П. *Теория прокатки: Учебник для вузов*. М. : Metallurgy, 1988. 240 с.
3. *Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография* /А. С. Бешта, В. Н. Куваев, О. Е. Потап, А. П. Егоров. Днепропетровск : Журфонд, 2014. 283 с.
4. Егоров А. П. Совершенствование систем автоматического управления многосвязанными электроприводами группы клетей при прокатке с петлерегулированием : дис. канд. техн. наук: Днепропетровск, 1981. 145 с.
5. Єгоров О. П., Рибальченко М. О., Маначин І. О. *Цифрові методи дослідження та розрахунку регуляторів в системах автоматичного керування*: навчальний посібник. Дніпро : УДУНТ, 2022, 124 с.
6. Єгоров О. П., Михайловський М. Н. *Проектування систем управління в середовищі Fuzzy Logic Toolbox* : навчальний посібник. Дніпро : НМетАУ, 2020. 85 с.
7. Стахно В. И., Егоров А. П., Клименко Е. Н. Преобразователь величины петли для непрерывных проволочных станов. *Механизация и автоматизация производства*. 1978, №1. С. 46-54.

## References

1. Chekmarev, A. P. et al. (1967). Rolling on small-section mills. Metallurgy
2. Grudev, A. P. (1988). *Theory of rolling. Textbook for universities*. Metallurgy
3. Beshta, A. S., Kuvaev, V. N., Potap, O. E., & Yegorov, A. P. (2014). *Automation of technological processes in small-section rolling mills: monograph*. Zhurfond
4. Yegorov, A. P. (1981). *Improving automatic control systems for multi-connected electric drives of a group of stands during rolling with loop control*: dis. Ph.D. tech. Sciences. Dnepropetrovsk
5. Yegorov, O. P., Rybalchenko, M. O., & Manachyn, I. O. (2022). *Digital methods for monitoring and designing regulators in automatic heating systems*. Study guide. UDUNT
6. Yegorov, O. P., & Mikhailovsky, M. N. (2020). *Design of control systems in the Fuzzy Logic Toolbox environment*. Study guide.
7. Stakhno, V. I., Yegorov, A. P., & Klimentko, E. N. (1978). Loop size converter for continuous wire mills. *Mechanization and automation of production*, (1), 46-54



**O. P. Yegorov**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-9867-0437

**M. O. Rybalchenko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-5162-5201

**I. O. Manachyn**<sup>1,2</sup>, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-9795-6751

<sup>1</sup> *Ukrainian State University of Science and Technology*

<sup>2</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

### **ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF FREE ROLLING SPEED MODE WITH FUZZY CONTROLLER**

**Abstract.** The best high-speed mode of rolling mills is the mode of free rolling with loop formation in finishing groups of cages. Stabilization of the loop is carried out by the control system of the rotation frequency of the rolls of rolling cages based on the information of the sensor of the position of the loop. The increase in the loop depends on the frequency of rotation of the rolls of adjacent cages and the coefficient of extraction of the rolled product in the cage following the adjustable gap. To set up the system, it is necessary to know the numerical characteristics of the influences that disturb and affect the size of the rolling loop. The change in the rotation frequency of the main drive of the cages during the stabilization of the size of the rolling loop in the intercellular gap of the cages of the finishing group of the continuous rolling condition was studied. The change in the rotation frequency of the rolls characterizes the total effects of the rolling mode on the size of the loop. Research has shown that in a non-stationary realization it is possible to single out a trend that is described by a completely deterministic dependence, and to conduct an analysis of a random stationary realization with respect to this trend. A structural diagram of the circuit for regulating the position of the rolling loop was developed. This scheme includes: an electric wire with a current loop, a speed loop, a speed regulator, a rolling loop, a loop position regulator, a compensator of disturbing influences. The compensator is based on the Fuzzy controller and produces a control effect depending on the inconsistency in the loop control circuit. In this way, the low-frequency disturbance component at the rolling speed, which can reach 10% of the rolling speed, is monitored and compensated. The obtained data of changes value of the loop without and with a compensating circuit. The size of the loop in the system without a compensating circuit when rolling a thicker rear part of the rolled product reaches the maximum permissible size. This does not happen in a system with a compensating circuit. It is possible to stabilize the value of the loop in a given range either by increasing the regulator coefficient, thereby worsening the dynamics of the entire multi-link control system of the high-speed rolling mode, or by using the proposed method of adaptive disturbance compensation.

**Key words:** free rolling, rolls, speed mode, loop, regulator, Fuzzy controller.

**For citation:** Yegorov, O. P., Rybalchenko, M. O., & Manachyn, I. O. (2023). Adaptive control system of free rolling speed mode with fuzzy controller. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 340-348. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-340-348>

*Стаття надійшла до редакції збірника 07.09.2023 р.*

*Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*