

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.09

УДК 621.771.685.5

О. П. Єгоров, М. В. Михайловський, М. О. Рибальченко

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНВАРІАНТНОСТІ СЕПАРАТНИХ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМ РЕЖИМОМ ПРОКАТКИ З ПЕТЛЕЮ НА НЕПЕРЕРВНИХ ДРІБНОСОРТНИХ СТАНАХ

Анотація. *Стан прокату в міжклітинних проміжках неперервних дрібносортних станів визначається різницею швидкостей прокату на виході з попередньої та на вході в наступну кліть. Зміна швидкості прокатки в будь-якій кліті проміжку, що виникає під дією технологічних збурень, призводить до відхилення від початкового режиму прокатки в цьому проміжку. Усунення такого відхилення досягається цілеспрямованою корекцією частоти обертання валків однієї з клітей. Однак, при цьому порушується швидкісний режим у сусідньому по ходу прокатки міжклітинному проміжку, що приводить в дію контур регулювання натягу або петлі, а потім і наступних проміжках, що може дестабілізувати роботу всього стану. Для вирішення цієї проблеми необхідно при зміні частоти обертання валків однієї з клітей неперервної групи, одночасно узгоджено змінювати частоту обертання валків всіх наступних (по ходу прокатки) або всіх попередніх (проти ходу прокатки) клітей. Комп'ютерне моделювання функціонування системи керування швидкісним режимом прокатки у групі клітей підтвердило ефективність запропонованого методу, заснованого на системному аналізі інваріантності роботи сепаратних контурів стабілізації положення петлі прокату.*

Ключові слова: *неперервний дрібносортний стан, швидкісний режим, прокатка з петлею, сепаратні контури керування.*

Постановка проблеми

При виробництві прокату дрібного сорту основними складовими його собівартості є вартість заготовки та енергетичні витрати на її нагрівання, прокатку в головній лінії, різання на штанги та, остаточно, на мірні прутки. Усі операції з прокатки в чорновій і чистовій групах клітей та з різання прокату на летючих ножицях пов'язані зі швидкісним режимом прокатки. Під швидкісним режимом прокатки вважають прокатку в чорновій групі клітей з натягом, а в

©Єгоров О. П., Михайловський М. В., Рибальченко М. О.

чистовій групі – з петлею або прогином прокату. Прокатка з петлею або прогином (малим керованим натягом) прокату є найкращим технологічним режимом, оскільки забезпечує стабільність геометричних параметрів профілю прокату за усією довжиною. При прокатці з натягом у чорновій групі клітей виникає різноширинність прокату, пов'язана з прокаткою передніх і задніх його ділянок без натягу, а середини – з натягом.

Проведені раніше дослідження [1, 2] показали, що за рахунок прокатки з натягом у чорновій групі клітей різноширинність прокату за довжиною може досягати 10 %. Це призводить, в першу чергу, до коливань довжини прокату на виході з останньої кліті стану, а відповідно, і до додаткової обрізі при різанні його на мірні прутки. Також нестабільність геометрії профілю за довжиною викликає необхідність частого відбору проб готового прокату для запобігання прокатки за полем допуску. При цьому порушується швидкісний режим у сусідньому по ходу прокатки міжклітинному проміжку, що приводить в дію контур регулювання натягу в ньому, а потім і наступних проміжках, що може дестабілізувати роботу всього стану.

Системний аналіз роботи сепаратних контурів керування швидкісним режимом прокатки з петлею показав, що для вирішення цієї проблеми необхідно при зміні частоти обертання валків однієї з клітей неперервної групи, одночасно узгоджено змінювати частоту обертання валків всіх наступних (по ходу прокатки) або всіх попередніх (проти ходу прокатки) клітей.

Матеріали і результати дослідження

Налаштування та підтримка заданого швидкісного режиму здійснюється за допомогою системи керування швидкісним режимом прокатки, основні завдання якої:

- Розрахунок частот обертання валків клітей, відповідно до калібрування, для налаштування стану на прокатку в чорновій групі з мінімальним натягом, а в чистовій – з допустимою петлею прокату.
- Контроль та підтримання питомого натягу прокату з мінімально допустимим значенням 9-10 Н/мм².
- Утворення та підтримка заданих значень петель (прогину) прокату в чистовій групі.
- Узгоджена зміна частот обертання приводів валків суміжних клітей при розгоні та гальмуванні стану або корекції режиму прокатки в окремій групі клітей.

Сепаратні контури керування швидкісним режимом прокатки в міжклітинних проміжках пов'язані між собою як через швидкісні параметри режиму обтиснення в осередку деформації кліті, так і через частоти обертання

суміжних клітей. Основні вирази, що характеризують зв'язок натягу та петлі прокату наведені нижче:

$$T_{i,i+1} = T_{н(i,i+1)} + \frac{EQ_i}{\ell_{0i}} \int_0^t (V_{0,i+1} - V_{1i}) dt \quad (1)$$

$$\Delta \ell_i = \int_0^t (V_{1i} - V_{0,i+1}) dt \quad (2)$$

де $T_{i,i+1}$ – натяг прокату в проміжку клітей i та $i+1$; $T_{н(i,i+1)}$ – початковий натяг прокату в міжклітинному проміжку; E – модуль пружності Юнга; Q_i – площа поперечного перерізу прокату; ℓ_{0i} – відстань між валками суміжних клітей; V_{0i}, V_{1i} – відповідно швидкості прокату на вході в кліть і виході з неї; $\Delta \ell_i$ – зміна величини петлі прокату.

У разі натягу прокату змінюється розширення прокату, отже і швидкість входу прокату в кліть наступного проміжку. Крім цього, за рахунок зміни випередження змінюється і швидкість виходу прокату з попередньої кліті. Таким чином, через деякий проміжок часу встановлюється новий швидкісний режим прокатки з новим значенням натягу прокату.

Заданий швидкісний режим при керуванні натягу або петлі забезпечується керуванням частотою обертання валків клітей проти або за напрямком прокатки. Система керування швидкісним режимом прокатки є багатозв'язаною, оскільки кожен сепаратний контур пов'язаний з іншим через частоти обертання валків суміжних клітей і швидкості розкату в цих проміжках. Швидкість прокату на виході з валків попередньої кліті та вході в наступну залежить від таких технологічних факторів як випередження та коефіцієнт його витяжки. Ці параметри змінюються за довжиною прокату немонотонно.

Для забезпечення інваріантності сепаратних контурів керування (наприклад, положенням петлі) необхідно передавати керуючий вплив на корекцію частоти обертання групи клітей з урахуванням коефіцієнта витяжки прокату в кожній кліті. Структурна схема системи керування швидкісним режимом вільної прокатки зображена на рисунку 1.

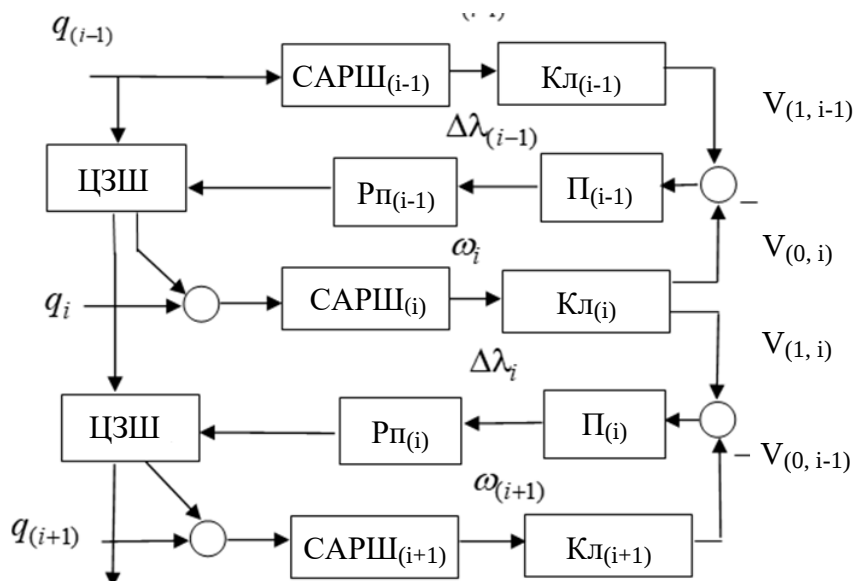


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування швидкісним режимом вільної прокатки

Спочатку оператор, відповідно до таблиці калібрування, встановлює початкові (західні) обороти в систему регулювання швидкості валків прокатних клітей q_i . При необхідності групового узгодженого зміни частот обертання валків завдання від i -того приводу передається на всі наступні за допомогою системи групового керування – цифрового завдання швидкості (ЦЗШ). Контроль за положенням петлі прокату здійснюється за допомогою датчиків петлі Π_i . При відхиленні величини петлі прокату від заданого положення регулятор видає сигнал через пристрої групового керування в «свій привід» і в усі наступні, причому коефіцієнт передачі для кожного приводу повинен відповідати співвідношенню частот обертання валків суміжних клітей. Якщо керуючий вплив регулятора петлі i -тої кліті, що видається в систему автоматичного регулювання швидкості (САРШ) i -тої кліті, є керуючим, то для подальшого міжклітинного проміжку це збурення, що призводить до зміни величини петлі. Якщо одночасно подавати керуючий вплив в САРШ i -тої кліті й в САРШ $(i+1)$ -ої кліті, то в систему петлерегулювання збурювальні впливи внесені не будуть.

Коефіцієнт передачі керуючого впливу від регуляторів петлі САРШ приводів валків залежить від радіусів валків, випереджень, коефіцієнтів витяжки. Зношування калібрів – повільно діючий фактор, випередження в клітях приблизно однакові і не значно змінюються в процесі прокатки. Виняток становить коефіцієнт витяжки, на значення якого впливають режими прокатки, коливання площі поперечного перерізу заготовки та ін. Зі сказаного слід, що необхідно повести дослідження впливу неузгодженості встановленого

коефіцієнта передачі впливу регулятора петлі на наступний привід валків і фактичного, що визначається за виразом

$$\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \frac{R_{i+1}(1 + S_{i+1})\lambda_{i+1}}{R_i(1 + S_i)} \quad (3)$$

Аналіз ефективності запропонованого методу узгодженого керування було проведено на комп'ютерній моделі системи керування швидкісним режимом вільної прокатки. Для порівняння на графіках 2 і 3 зображені перехідні процеси в послідовних контурах петлерегулювання. При керуванні положенням петлі в одному контурі збурення передається на наступний сепаратний контур (рис. 2, а), а при узгодженому керуванні цього не відбувається (рис. 2, б).

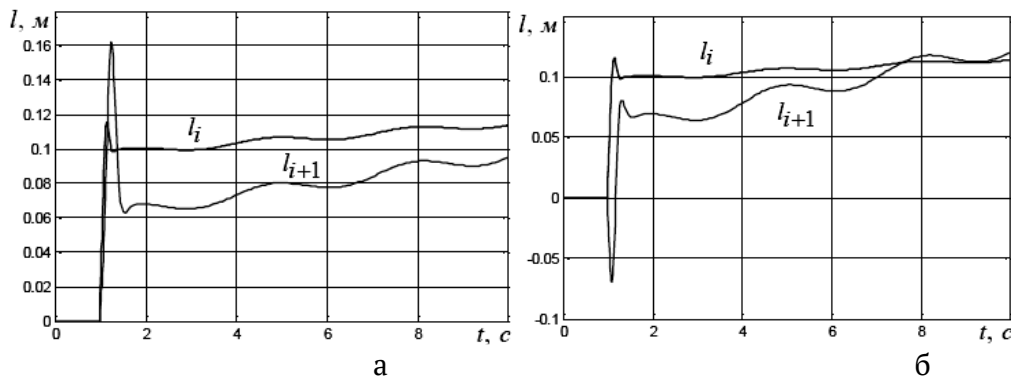


Рисунок 2 – Перехідні процеси петлерегулювання в контурах i та $i+1$:
 а) з узгодженою передачею керуючого впливу регуляторів петлі;
 б) при неузгодженому керуванні

Розглянемо багатозв'язану систему керування швидкісним режимом групи прокатних клітей.

При розгоні та гальмуванні групи приводів можлива несинхронність їх роботи внаслідок різного завантаження. При розгоні двигуна приводу валків, крім статичної складової струму якорного ланцюга, виникають і динамічні складові. При цьому, в залежності від величини статичного моменту, в одних приводах струм в якорному ланцюзі може перевищити струмообмеження і обмежити темп розгону, а в інших ні. Таким чином, частина приводів буде розганятися із струмообмеженням, а інші ні. Це призведе до різного значення прискорень приводів у групі та порушення узгодженого режиму прокатки. Для

усунення цього явища запропоновано систему керування [3], схему якої зображено на рисунку 3.

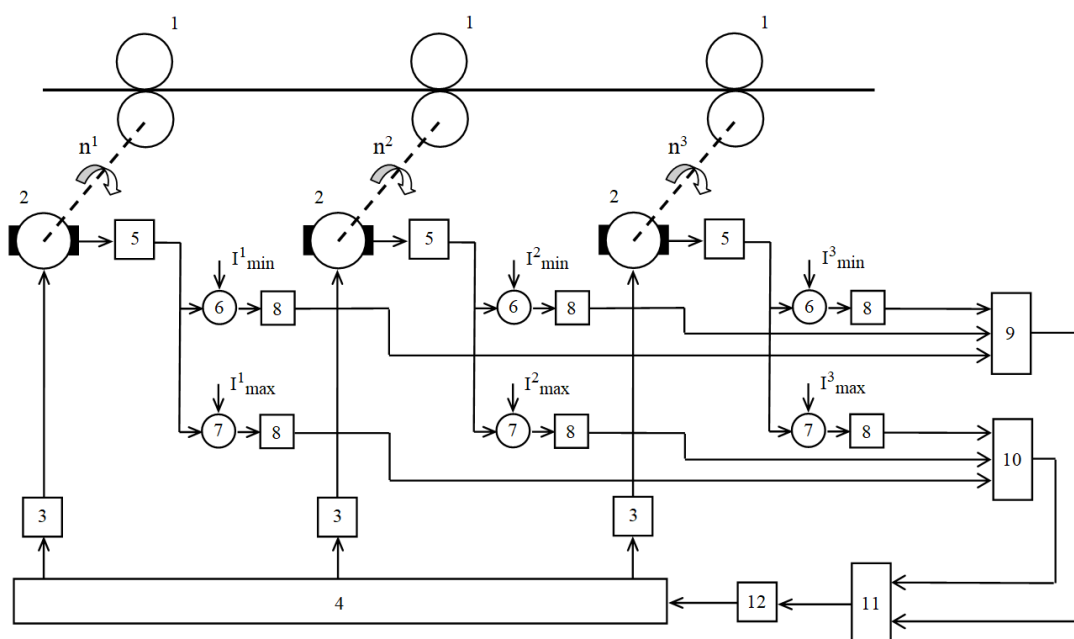


Рисунок 3 – Схема багатозв'язаної системи керування швидкісним режимом групи прокатних клітей

Швидкісний режим прокатки ведеться за рахунок обертання валків прокатних клітей 1 електродвигунами 2. Керування електродвигунами здійснюється відповідними САРШ 3. Завдання на узгоджене керування надходить до САРШ кожної кліти від системи групового керування ЦЗШ 4. Струм якорних ланцюгів контролюється датчиками струму 5. У блоках 6 і 7 поточні значення цих струмів порівнюються, відповідно, з мінімальним та максимальним допустимими значеннями. При цьому повинні дотримуватися такі нерівності:

$$\begin{aligned} I^1_{\min} &\leq I^1 < I^1_{\max}, \\ I^2_{\min} &\leq I^2 < I^2_{\max}, \\ I^3_{\min} &\leq I^3 < I^3_{\max}, \end{aligned} \quad (4)$$

де I^1, I^2, I^3 – сигнали на виходах датчиків струму якорів відповідних двигунів; $I^1_{\min}, I^2_{\min}, I^3_{\min}$ – уставки мінімального струму якорів відповідних

двигунів; $I_{\max}^1$, $I_{\max}^2$, $I_{\max}^3$ – уставки максимального струму якірів відповідних двигунів.

При виконанні нерівностей (4) сигнали на виходах всіх нуль-органів 8 і, отже, на виходах логічних елементів АБО 9 і 10 відсутні. Ці логічні елементи під'єднані до блоку комутації 11, вихід якого через блок керування 12 підключений до входу блоку завдання частоти обертання валків ЦЗШ 4. При налаштуванні прокатного стану на іншу швидкість, якщо нерівності (4) виконуються, то електроприводи змінюють швидкість обертання валків відповідно до зміни завдання. Якщо величина струму досягне свого мінімуму, то підключиться максимально можливий темп зміни сигналу завдання. Це відбувається до тих пір, поки значення струму якоря електродвигуна не повернеться у задані межі.

Для керування швидкісним режимом прокатки розроблена система, схема якої зображена на рисунку 4.

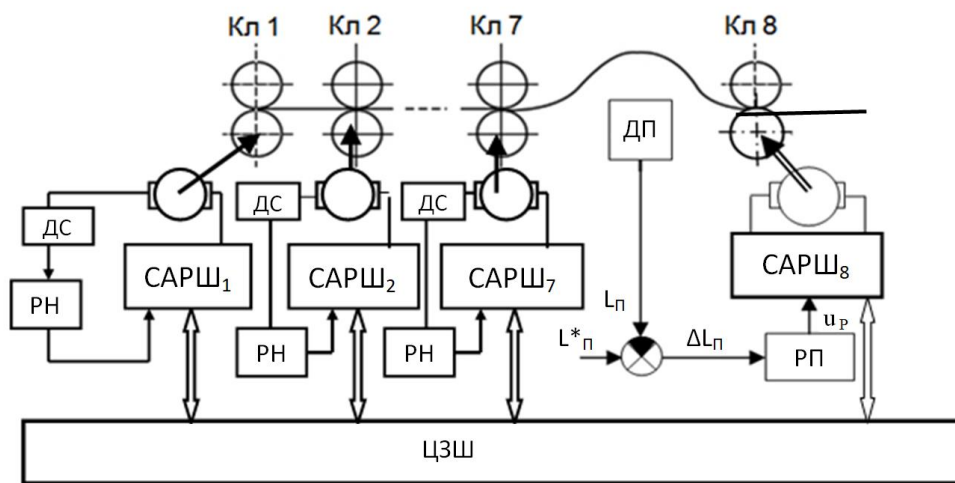


Рисунок 4 – Система керування швидкісним режимом прокатки

Тут, за результатами вимірювання датчиками ДС якірних струмів ланцюгів двигунів приводів валків клітей в чорновій групі, за допомогою регуляторів натягу РН і систем автоматичного регулювання швидкості САРШ валків клітей здійснюється налаштування режиму натягу прокату при заході його передньої ділянки. У чистовій групі клітей за допомогою керуючого

впливу u_P , що виробляється регулятором РП, здійснюється зміна величини петлі прокату L_P , яка вимірюється датчиком петлі ДП.

Розглянемо контур керування петлею прокату (рис. 5). Контроль положення петлі здійснюється за величиною стріли прогину, контрольованої або оптичними, або ємнісними датчиками. При відхиленні петлі від заданого положення регулятор петлі видає завдання або тільки в систему керування частотою обертання валків кліті наступної за регульованим проміжком, або, додатково, в системи керування приводами валків усіх наступних клітей. Таке керування називається керуванням вперед. Можлива також передача керуючого впливу в приводи проти ходу прокатки (керування назад).

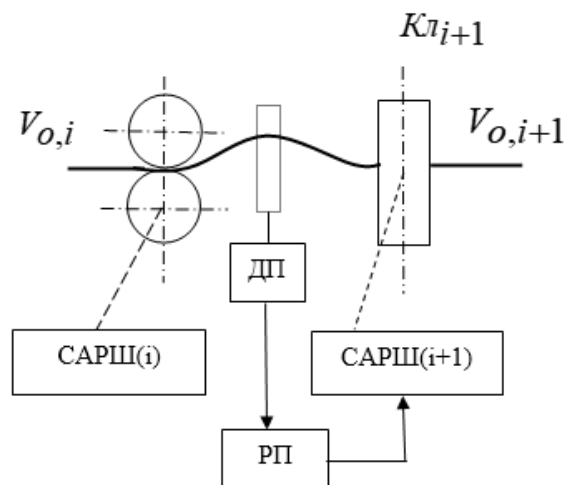


Рисунок 5 – Структурна схема контуру регулювання петлею прокату:

САРШ – система автоматичного регулювання швидкості;

ДП – датчик петлі прокату; РП – регулятор петлі прокату

Усі системи працюють незалежно завдяки системі цифрового завдання швидкостей ЦЗШ, при цьому зміна частоти обертання валків відбувається за збереження співвідношення частот обертання валків суміжних клітей.

Непряму оцінку зміни коефіцієнта витяжки прокату отримаємо, виразивши швидкість розкату через частоту обертання приводів, робочі радіуси та випередження:

$$\Delta \ell_i = \int_0^t \left(\omega_i R_i (1 + S_1) - \frac{\omega_{i+1} R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\lambda_{i+1}} \right) dt, \quad (5)$$

де R_i, R_{i+1} – робочі радіуси i -тої та $(i+1)$ -тої клітей; S_i, S_{i+1} – випередження в i -тій та $(i+1)$ -тій клітях; ω_i, ω_{i+1} – частота обертання приводів i -тої та $(i+1)$ -тої клітей; λ_{i+1} – коефіцієнт витяжки розкату в $(i+1)$ -тій кліті, що визначається як

$$\lambda_{i+1} = \frac{\omega_{i+1} R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\omega_i R_i (1 + S_i) - \frac{d\Delta l_i}{dt}}. \quad (6)$$

Висновки

Системний аналіз процесу регулювання прокатки дозволив суттєво підвищити ефективність роботи кожного контуру стабілізації технологічного режиму у розробленій системі керування. Для забезпечення інваріантності сепаратних контурів керування (наприклад, положенням петлі) необхідно передавати керуючий вплив на корекцію частот обертання групи клітей з урахуванням коефіцієнта витяжки розкату в кожній кліті. Комп'ютерне моделювання швидкісного режиму прокатки з петлею на неперервному дрібносортному стані підтвердило ефективність запропонованого методу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Егоров А. П. Совершенствование системы автоматического управления многосвязными электроприводами группы прокатных клетей при прокатке с петлерегулированием: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Егоров Александр Петрович. – Днепропетровск: ДМетИ, 1981. – 161 с.
2. Підвищення енергоефективності електромеханічного комплексу виробництва сортового прокату: звіт з НДР (заключ.) : / Національна металургійна академія України; кер. Егоров О. П. – Дніпропетровськ, 2014. – 151 с. – № ДР 0113U003260с.
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.

REFERENCES

1. Yegorov, A. P. Sovershenstvovanie systemy avtomaticheskoho upravleniya mnohosviaznyimi elektroprivodami hruppy prokatnykh kletei pry prokatke s petlerehulyrovanyem: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03 / Yegorov Oleksandr Petrovych. – Dnepropetrovsk: DMetI, 1981. – 161 s.
2. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti elektromekhanichnoho kompleksu vyrobnytstva sortovoho prokatu: zvit z NDR / ker. Yegorov O. P. № DR 0113U003260s. Dnipropetrovsk: Natsionalna metalurhiina akademiia Ukrainy, 2014. 151 s.
3. Avtomatyzatsiya tekhnolohicheskikh protsessov na melkosortnykh prokatnykh stanakh: monohrafyia / A. S. Beshta, V. N. Kuvaev, O. E. Potap, A. P. Yegorov. Dnepropetrovsk: Zhurfond, 2014. 283 s.

Received 20.04.2025.

Accepted 16.05.2025.

UDK 621.771.685.5

O. P. Yegorov, M. V. Mykhailovskyi, M. O. Rybalchenko

**SYSTEMATIC ANALYSIS OF INVARIANCE OF SEPARATE CONTROL
CIRCUITS OF HIGH-SPEED ROLLING WITH A LOOP ON CONTINUOUS
SMALL SECTION MILL**

Abstract. *The condition of the rolled products in the interstand gaps of continuous small-section mills is determined by the difference in rolling speeds at the exit from the previous stand and at the entrance to the next stand. A change in the rolling speed in any of the stands in the gap, arising under the action of process disturbances, leads to a deviation from the initial rolling mode in this gap. Elimination of such a deviation is achieved by targeted correction of the roll speed of one of the stands. However, this disrupts the speed mode in the adjacent interstand gap along the rolling direction, which activates the tension control circuit in it, and then in the subsequent gaps, which can destabilize the operation of the entire mill. To solve this problem, when changing the roll speed of one of the stands of the continuous group, it is necessary to simultaneously change the roll speed of all subsequent (along the rolling direction) or all previous (counter-rolling direction) stands. Computer modeling of the functioning of the high-speed rolling mode control system in a group of stands confirmed the effectiveness of the proposed method, based on a systematic analysis of the invariance of the operation of separate circuits of the rolling loop position stabilization.*

Keywords: *continuous small-section mill, speed mode, rolling with a loop, separate control circuits.*

Єгоров Олександр Петрович, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів.
Український державний університет науки і технологій

Михайловський Микола Володимирович, доцент кафедри автоматизації
виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій

Рибальченко Марія Олександрівна, завідувач кафедри автоматизації виробничих
процесів, Український державний університет науки і технологій

Yegorov Oleksandr Petrovych, associate professor of the Department of Automation of
Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology

Mykhailovskyi Mykola Volodymyrovych, associate professor of the Department of
Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology

Rybalchenko Mariya Oleksandrivna, head of the Department of Automation of
Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology