

## АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ РЕВЕРСИВНОЮ ПРОКАТНОЮ КЛІТТЮ НА БЛЮМІНГУ

Запропоновано підхід до керування електроприводом обтискних валків реверсивної прокатної кліти на блюмінгу на основі робастного алгоритму швидкісного градієнту з використанням явної еталонної моделі, що реалізує сигнально-параметричну адаптацію.

**Проблема і її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Сучасний розвиток прокатного переділу на металургійних підприємствах характеризується інтенсивним впровадженням технологій неперервного лиття заготівель. Не дивлячись на це, обтискні стани на блюмінгу все ще залишаються в експлуатації на деяких вітчизняних металургійних підприємствах. Процес гарячої прокатки на блюмінгу є дуже ресурсомістким. Основними ресурсами, що споживаються при обтисненні зливок металу на блюмінгу, є електроенергія та елементи робочих механізмів, що періодично виходять з ладу. До них відносять шпинделі, передаточні механізми, валки і т.д.[1]. Заміна та ремонт даних елементів призводить до простоїв стану та залучення значних матеріальних ресурсів, що, в свою чергу, призводить до зниження продуктивності роботи стану. Перераховані проблеми обумовлюють актуальність дослідження раціональних методів керування процесом обтиснення металу на блюмінгу.

Основною причиною, що призводить до збільшення витрат електроенергії та виникнення поломок елементів обтискної кліти, є динамічні навантаження в лінії стану. Вони призводять до зниження міцності деталей механізмів кліти і, відповідно, до їх швидкого виходу з ладу. Динамічні навантаження в лінії стану виникають через ряд неконтрольованих факторів. По-перше, внаслідок того, що зливоч подається в кліть необроблений і мають місце дефекти лиття. По-друге, через недосконалість технології нагрівання зливок в колодязях, зливоч подається в кліть прогрітий нерівномірно. Третя група факторів характеризується технологічними режимами процесу прокатки – підштамповка, реверсивність прокатки, дії операторів в нестійких режимах прокатки і т.д.[1].

Найбільш небезпечним явищем при експлуатації обтискного стану є пробуксовки. Пробуксовки в лінії стану виникають через різку зміну сил тертя між валом та зливком металу. При цьому відбувається різка зміна енергосилових параметрів, що в свою чергу призводить до виникнення коливальних процесів в електромагнітних та пружних моментах, а також швидкостях обтискних валків.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Проблеми автоматизації процесу реверсивної гарячої прокатки на блюмінгу були досліджені С.Г. Буряковським, А.Є. Гуревичем, С.Я. Дунаєвським, С.Л. Коцарем, О.В. Світличним, О.В. Слежановським та багатьма іншими ученими.

Проблеми зниження динамічних навантажень у кінематичній лінії стану прокатної кліти розглядалися у роботах В.А. Воскресенського, А.Г. Жигалкіна, Ф.К. Іванченка, В.Б. Клепікова, С.Н. Кожевнікова, О.С. Лехова, П.І. Полухіна, Б.Н. Полякова, М.А. Тилкіна, А.П. Чекмарьова, В.А. Чичигина, Г.І. Яха.

Використання методів сучасної теорії автоматичного керування для автоматизації процесу реверсивної гарячої прокатки досліджено в працях Л.В. Акімова, Б.І. Кузнецова, Т.Б. Нікітіної.

**Постановка завдання.** Розробка способу керування на основі адаптивних методів та нечіткої логіки дозволить знизити вплив людського фактору, підвищити ефективність використання устаткування обтискної кліти та зменшити енерговитрати за рахунок зменшення динамічних навантажень, а також підвищити продуктивність в часі за рахунок зменшення простоїв. Оптимізація динамічних процесів під час прокатки передбачає узгоджене керування швидкостями обтискних валків та компенсацію пружних коливань, що виникають в лінії стану при односторонніх та двосторонніх пробуксовках.

**Викладення матеріалу та результати.** На даний час розроблено методи, що оснований на використанні модальних регуляторів, замкнених за повним вектором стану, що відновлюється спостережачем стану. Хоча даний метод і забезпечує системі астатизм першого порядку, але йо-

го недолік полягає у використанні методів модального керування, що в основному базуються на інтуїції та досвіді дослідника [2]. Проблеми застосування оптимального керування пов'язані із відновленням повного вектору стану оптимальними спостерігачами, що не враховують нестационарність деяких параметрів [3,4]. Загальним недоліком існуючих способів керування прокаткою на блюмінгу є зберігання за оператором головної ролі, при цьому час реакції оператора на виникнення пробуксовки складає 0,5-2,5 с і залежить від досвіду та стану оператора.

Цього часу достатньо для виникнення небезпечних динамічних явищ.

За результатами проведеного аналізу сучасного стану автоматизації прокатки металу на блюмінгу, особливостей технологічного процесу в режимі пробуксовок та сучасних методів керування механізмами, що знаходяться під впливом випадкового навантаження, сформульовано підхід до адаптивного керування обтиснення металу на блюмінгу.

Математична модель, що описує динамічні явища у верхній і нижній кінематичних лініях описується наступною системою диференційних рівнянь [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{26}(t) = K_e \cdot \omega_{16}(t) + I_{я6}(t) \cdot R_{я6} + L_{я6} \cdot \frac{dI_{я6}(t)}{dt}; \\ J_{16} \cdot \frac{d\omega_{16}(t)}{dt} = K_m \cdot I_{я6}(t) - M_{126}(t) - \alpha_{16} \cdot (\omega_{16}(t) - \omega_{26}(t)); \\ M_{126}(t) = \begin{cases} c_{126} \left( \Delta\varphi_{126}(t) - \frac{\delta}{2} \right), & \Delta\varphi_{126}(t) \geq \frac{\delta}{2}; \\ 0, & |\Delta\varphi| < \frac{\delta}{2}; \\ c_{126} \left( \Delta\varphi_{126}(t) + \frac{\delta}{2} \right), & \Delta\varphi_{126}(t) \leq -\frac{\delta}{2}; \end{cases} \\ J_{26} \cdot \frac{d\omega_{26}(t)}{dt} = M_{126}(t) + \alpha_e \cdot (\omega_{16}(t) - \omega_{26}(t)) - \alpha_{m6}(\omega) - M_{m6}(t) \cdot \omega_{26}(t) - \\ - K \cdot (\omega_{26}(t) - \omega_{3n}(t)); \\ U_{2n}(t) = K_e \cdot \omega_{1n}(t) + I_{яn}(t) \cdot R_{яn} + L_{яn} \cdot \frac{dI_{яn}(t)}{dt}; \\ J_{1n} \cdot \frac{d\omega_{1n}(t)}{dt} = K_m \cdot I_{яn}(t) - M_{12n}(t) - \frac{\alpha_n}{2} \cdot (\omega_{1n}(t) - \omega_{2n}(t)); \\ M_{12n}(t) = \begin{cases} c_{12n} \left( \Delta\varphi_{12n}(t) - \frac{\delta}{2} \right), & \Delta\varphi_{12n}(t) \geq \frac{\delta}{2}; \\ 0, & |\Delta\varphi| < \frac{\delta}{2}; \\ c_{12n} \left( \Delta\varphi_{12n}(t) + \frac{\delta}{2} \right), & \Delta\varphi_{12n}(t) \leq -\frac{\delta}{2}; \end{cases} \\ J_{2n} \cdot \frac{d\omega_{2n}(t)}{dt} = M_{12n}(t) - M_{23n}(t) + \frac{\alpha_n}{2} \cdot (\omega_{1n}(t) - \omega_{2n}(t)) - \frac{\alpha_n}{2} \cdot (\omega_{2n}(t) - \omega_{3n}(t)); \\ M_{23n}(t) = \begin{cases} c_{23n} \left( \Delta\varphi_{23n}(t) - \frac{\delta}{2} \right), & \Delta\varphi_{23n}(t) \geq \frac{\delta}{2}; \\ 0, & |\Delta\varphi| < \frac{\delta}{2}; \\ c_{23n} \left( \Delta\varphi_{23n}(t) + \frac{\delta}{2} \right), & \Delta\varphi_{23n}(t) \leq -\frac{\delta}{2}; \end{cases} \\ J_{3n} \cdot \frac{d\omega_{3n}(t)}{dt} = M_{23n}(t) + \frac{\alpha_n}{2} \cdot (\omega_{2n}(t) - \omega_{3n}(t)) - \alpha_{m3}(\omega) - M_{m3}(t) \cdot \omega_{3n}(t) - \\ - K \cdot (\omega_{3n}(t) - \omega_{26}(t)). \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $U_{26}(t)$ ,  $U_{2n}(t)$  - напруга генераторів верхнього та нижнього двигунів,  $I_{я6}(t)$ ,  $I_{яn}(t)$ ,  $R_{я6}$ ,  $R_{яn}$ ,  $L_{я6}$ ,  $L_{яn}$  - струм, опір та індуктивність якорних обмоток двигунів,  $J_{16}$ ,  $J_{1n}$  - момент інерції якорів верхнього та нижнього двигунів,  $J_{2n}$  - момент інерції редуктора,  $J_{26}$ ,  $J_{3n}$  - момент інерції прокатних валків,  $M_{126}(t)$  - пружний момент у верхній кінематичній лінії,  $M_{12n}(t)$ ,  $M_{23n}(t)$  - моменти інерції у нижній кінематичній лінії,  $M_{н6}(t)$ ,  $M_{нn}(t)$  - неконтрольований момент навантаження для верхнього і нижнього прокатних валків,  $\omega_{16}(t)$ ,  $\omega_{1n}(t)$  - кутова швидкість обертання якорів верхнього та нижнього двигунів,  $\omega_{2n}(t)$  - кутова швидкість обертання редуктора,  $\omega_{26}(t)$ ,  $\omega_{3n}(t)$  - кутова швидкість обертання прокатних валків,  $\Delta\varphi_{126}(t)$  - різниця кутів повороту якоря і прокатного валка у верхній кінематичній лінії,  $\Delta\varphi_{12n}(t)$ ,  $\Delta\varphi_{23n}(t)$  - різниця кутів повороту якоря і редуктора та редуктора і прокатного валка відповідно у нижній кінематичній лінії,  $c_{126}$  - коефіцієнт пружності у верхній кінематичній лінії,  $c_{12n}$ ,  $c_{23n}$  - коефіцієнти пружності у нижній кінематичній лінії,  $\alpha_{m6}(\omega)$ ,  $\alpha_{m3}(\omega)$  - моменти зовнішнього тертя для верхнього і нижнього прокатних валків,  $\delta$  - величина зазору,  $K_3$  - коефіцієнт зв'язку між прокатними валками через метал.

Нижче показано структурну схему системи керування реверсивною прокатною кліттю на блюмінгу (рис. 1).

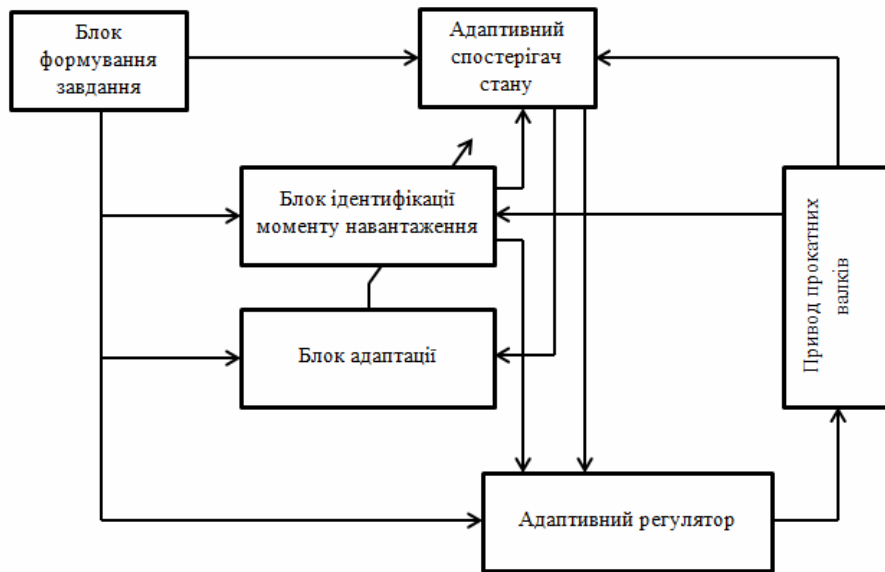


Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи керування динамічними навантаженнями в прокатній клітці на блюмінгу

Як видно із схеми до складу системи входить адаптивний спостерігач стану для відновлення повного вектору стану, підсистема ідентифікації моменту навантаження на прокатні валки із схемою адаптації, блок формування сигналу завдання для узгодженого керування та адаптивний регулятор, вхідними впливами для якого є відновлений вектор стану, ідентифіковані моменти навантаження на валки та узгоджені сигнали завдання по швидкості.

Розробка адаптивної системи керування передбачає застосування сучасних методів керування для чого модель об'єкта керування необхідно представити в просторі станів:

$$\begin{cases} \frac{dX(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + V_o(t); \\ y(t) = C \cdot x(t) + V_{cn}(t); \end{cases} \quad (2)$$

де  $V_o(t)$ ,  $V_{cn}(t)$  - некорельовані збурення, що діють на об'єкт і перешкоди спостереження.

Вектор керування:

$$u(t) = [U_{гв}(t), U_{гн}(t)],$$

вектор змінних стану:

$$x(t) = [I_{яв}(t), \omega_{1в}(t), M_{12в}(t), \omega_{2в}(t), I_{ян}(t), \omega_{1н}(t), M_{12н}(t), \omega_{2н}(t), M_{23н}(t), \omega_{3н}(t)],$$

вектор виходу:

$$y(t) = [I_{яв}(t), \omega_{1в}(t), I_{ян}(t), \omega_{1н}(t)],$$

вектор збурюючих впливів:

$$V_o(t) = [M_{нв}(t), M_{нн}(t)].$$

Для зменшення динамічних навантажень в лінії стану запропоновано використовувати адаптивне керування на основі робастного алгоритму швидкісного градієнту з використанням явної еталонної моделі, що реалізує сигнально-параметричну адаптацію, де закон управління [6]

$$U(t) = K_X(t) \cdot X(t) + K_Y(t) \cdot Y(t) + U_S(t), \quad (3)$$

де  $U_S(t)$  - сигнальна складова керування,  $K_X(t)$ ,  $K_Y(t)$  - матриці коефіцієнтів регуляторів, що налаштовуються.

Цільовий функціонал має вигляд

$$q = \frac{1}{2} \cdot E(t)^T \cdot H \cdot E(t), \quad H = H^T > 0, \quad (4)$$

де  $E(t)$  - вектор похибки,  $H$  - матриця рішення рівняння Ляпунова.

Алгоритм управління

$$\frac{dK_Y(t)}{dt} = -\gamma \cdot B^T \cdot H \cdot E(t) \cdot Y(t)^T, \quad (5)$$

$$\frac{dK_X(t)}{dt} = -\gamma \cdot B^T \cdot H \cdot E(t) \cdot X(t)^T, \quad (6)$$

$$U_S(t) = -\gamma \cdot \text{sign}(B^T \cdot H \cdot E(t)), \quad (7)$$

$$\gamma_S(t) = -\gamma_0 \cdot |E(t)|, \quad (8)$$

Застосування даного методу вимагає знання повного вектору стану. З цією метою використовується спостерігач, в якому адаптація невідомих параметрів відбувається за методом самоналаштування [7].

Для визначення ефективності застосування адаптивного методу керування проведено також моделювання застосування двоконтурної системи підпорядкованого керування та модального регулятора. Результати моделювання різних методів керування наведено на рис. 4.

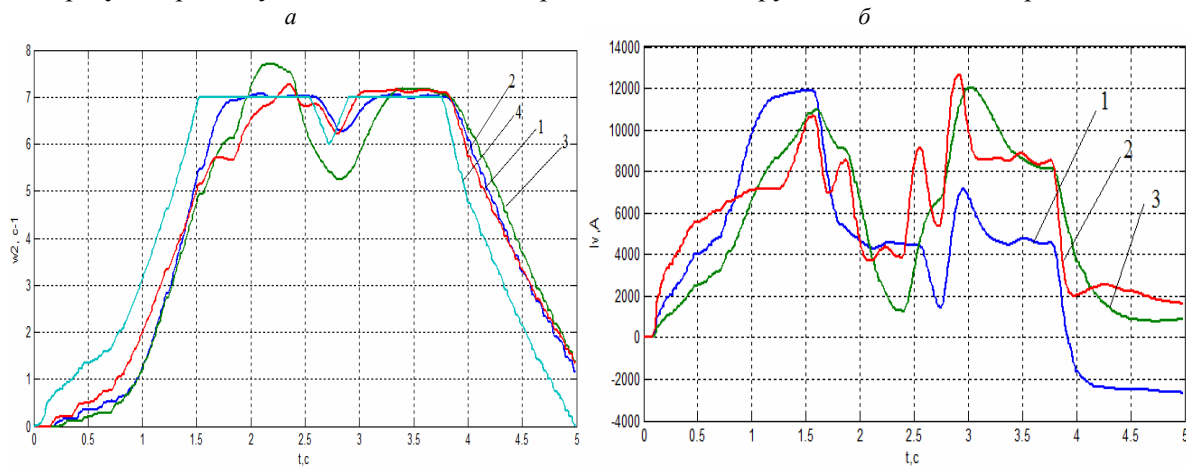


Рис. 2. Порівняння результатів застосування адаптивного регулятора (1), двоконтурної схеми підпорядкованого керування (3) та модального регулятора (3); сигнал завдання (4)

Як видно з графіків, адаптивне керування забезпечую більшу швидкість, похибку керування та пере регулювання.

Для реалізації запропонованої системи може бути використане обладнання виробництва фірми Schneider Electric.

Розрахунки ефективності впровадження показують що, наприклад для цеху Блюмінг-2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» річні витрати на експлуатацію обтискного стану 1300 при впровадженні даної системи керування прокатною кліттю нижче ніж при існуючому методі управління на 336740 грн.

Зниження річних витрат при впровадженні оптимальної стохастичної САК з підсистемою узгодженого керування швидкостями обтискних валків відбувається за рахунок:

1. Підвищення продуктивності прокатного стану за рахунок збільшення міцності деталей механізмів обтискної кліті і, як наслідок, зменшення ремонтних простоїв і витрат на нові деталі.

2. Зменшення споживання електроенергії внаслідок своєчасної реєстрації початку режиму буксування та запобігання його розвитку до небезпечних явищ.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** В статті вирішено науково-практичне завдання підвищення продуктивності функціонування прокатного стану в умовах блюмінгу. Задача вирішена шляхом розробки методики керування процесом реверсивної прокатки за рахунок адаптивного керування, що забезпечує зниження витрати електроенергії та зменшення ремонтних простоїв внаслідок збільшення періоду служби елементів механізмів прокатної кліті. Подальші дослідження присвячено підвищенню точності формування узгодженого керування валками за рахунок сучасних засобів штучного інтелекту.

*Список літератури*

1. Лехов О.С. Динамические нагрузки и линии привода обжимных станов. – М.: Машиностроение, 1975. – 184с.

2. **Потапенко Е. М.** Обзор работ по динамике многомассовых неопределенных электромеханических систем выполненных на кафедре электропривода ЗНТУ / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова, А.В. Савранская // Электротехника та електроенергетика. – 2011. – № 1. – С. 7–10.

3. **Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, А.В. Волошко, И.В. Бовдуй, Е.В. Винниченко.** Математическая модель индивидуальных приводов прокатных валков с синхронными двигателями и с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл при цифровом управлении. // Вісник НТУ: ХП, 2011. - №4. – С. 123-132.

4. **Б.И. Кузнецов, А.В. Волошко, И.В. Бовдуй, Е.В. Винниченко.** Динамические характеристики робастной системы управления синхронными приводами прокатных станков с учетом их взаимосвязи через прокатываемый металл. // Вісник НТУ: ХП, 2011. - №4. – С. 58-69.

5. **Башарин А.В.** Управление электроприводами: учебн. пос./ А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392с.

6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти тт.; 2-е изд.; перераб. и доп., Т.5: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 784 с.

7. **Вдовин В.В., Панкратов В.В.** Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия Томского политехнического университета. – Томск: 2012. Т320. - №4. – С.147-153.

Рукопис поступив до редакції 20.03.14

УДК 621.314

В.Е. МОМОТ, канд. техн. наук, доц., О.Р. ТКАЧУК, магистрант  
Криворожский национальный университет

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

В статье рассматривается анализ электропотребления и пути повышения энергетической эффективности эксплуатации наиболее энергоемких центробежных механизмов типовой районной котельни с использованием частотно регулируемых приводов.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Внедрение во всех отраслях промышленности энергосберегающих технологий ставит важнейшие задачи повышения энергетической эффективности эксплуатации электроприводов насосов, вентиляторов, дымососов производств горячего водоснабжения.

Современное состояние тепло-водоснабжения, занимающего одно из главных мест в инфраструктуре и жизнеобеспечения городского хозяйства, с каждым годом требует все больше и больше капитальных затрат. Оборудование районных котельных устарело как морально так и физически. Затраты на тепло являются значительными в бюджете государства, регионов и населения, являясь причиной социальной и экономической нестабильности.

**Анализ исследований и публикаций.** Как показывают исследования [1], тепло полезно используется только на 30 % (с учетом ненормативных потерь тепла через ограждающие конструкции, потерь, связанных с несовершенством внутренних инженерных систем и др.), т.е. коэффициент энергетической эффективности существующей централизованной системы тепло-водоснабжения не превышает 0.3.

Наиболее высоким потенциалом энергосбережения обладают производственные механизмы, работающие в продолжительном режиме работы с изменяющейся производительностью, такие как насосы, вентиляторы, дымососы котельных установок и управляемые в ручном режиме, путем воздействия на задвижки или направляющие аппараты.

В последние годы широкое развитие во всех отраслях получил регулируемый асинхронный электропривод на базе преобразователей частоты (ПЧ-АД), обеспечивающий экономию электроэнергии на 30 % и более [2]. Однако само по себе оснащение механизмов частотно-регулируемым электроприводом не гарантирует экономии электроэнергии, а должно быть технически и экономически обосновано применительно к конкретным условиям эксплуатации с определением количественной оценки диапазона регулирования, технологических требований, энергетических и режимных характеристик.