https://orcid.org/0000-0002-9364-9495

УДК 658.52.011.56:621.771.24

М.Г. ІЄВЛЄВ*

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ ПРОКАТКИ НА ТОВСТОЛИСТОВИХ СТАНАХ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. *Представлені показники якості прокату і процесу прокатки, які визначають ефективність функціонування товстолистового стана. Названі цілі автоматизованого управління прокаткою, які полягають у досягненні оптимального співвідношення згаданих показників, а при можливості поділу каналів управління – в досягненні найкращих значень кожного з наведених вище показників. Управління режимами прокатки (обтисненнями за пропусками, швидкостями, охолодженням) забезпечує основний ефект у формуванні показників якості прокату і процесу прокатки. Наведена постановка задачі автоматизованого управління прокаткою. Вибір показника, що оптимізується в задачі автоматичного управління прокаткою, обумовлюється його економічною значимістю, характером взаємозв'язку з технологічними параметрами та управліннями. Одним із найбільш економічно значущих для товстолистових станів є коефіцієнт витрати металу заготовки на тонну прокату або вихід придатного, який залежить від точності реалізації заданих геометричних розмірів прокатаної смуги. Наведено формулювання задачі забезпечення мінімального значення відхилень у товщині (ширині) смуги від заданого значення. Сформульовано задачу оптимізації по одному із трьох показників процесу прокатки: еквівалентному моменту головного приводу, витратам електроенергії на прокатку і тривалістю циклу прокатки, які визначаються всім ходом циклу прокатки, тобто застосовуваною стратегією управління. Описано принципи розв'язання задачі автоматичного управління режимами прокатки. Розглянуто стратегії управління прокаткою, що використовуються в АСУ ТП товстолистових станів. Описано методи побудови математичних моделей для АСУ ТП товстолистових станів, а також їх адаптації.*
Ключові слова: *товстолистовий стан, автоматичне керування, АСУ ТП, стратегії управління, математичні моделі, методи адаптації.*

Аннотация. *Представлены показатели качества проката и процесса прокатки, которые определяют эффективность функционирования толстолистового стана. Названы цели автоматизированного управления прокаткой, которые состоят в достижении оптимального соотношения упомянутых показателей, а при возможности разделения каналов управления – в достижении наилучших значений каждого из приведенных выше показателей. Управление режимами прокатки (обжатиями по пропускам, скоростями, охлаждением) обеспечивает основной эффект в формировании показателей качества проката и процесса прокатки. Приведена постановка задачи автоматизированного управления прокаткой. Выбор оптимизируемого показателя в задаче автоматического управления прокаткой обусловливается его экономической значимостью, характером взаимосвязи с технологическими параметрами и управлениями. Одним из наиболее экономически значимых для толстолистовых станов является коэффициент расхода металла заготовки на тонну проката или выход годного, который зависит от точности реализации заданных геометрических размеров прокатанной полосы. Приведена формулировка задачи обеспечения минимального значения отклонений в толщине (ширине) полосы от заданного значения. Сформулирована задача оптимизации по одному из трех показателей процесса прокатки: эквивалентному моменту главного привода, расходу электроэнергии на прокатку и времени цикла прокатки, которые определяются всем ходом цикла прокатки, то есть применяемой стратегией управления. Описаны принципы решения задачи автоматического управления режимами прокатки. Рассмотрены стратегии управления прокаткой, используемые в АСУ ТП толстолистовых станов. Описаны методы построения математических моделей для АСУ ТП толстолистовых станов, а также их адаптации.*
Ключевые слова: *толстолистовой стан, автоматическое управление, АСУ ТП, стратегии управления, математические модели, методы адаптации.*

Abstract. *Indicators of rolling quality and rolling process are presented, which determine the efficiency of plate mill operation. The purposes of the automated control of rolling which consist in achievement of an*

© Ієвлєв М.Г., 2020

optimum ratio of the mentioned indicators, and division of control channels (when it's possible) achieving the best values of each indicator named above. Control of rolling modes (compression on passes, speeds, cooling) provides the main effect in indicators quality formation of hire and rolling process. The statement of the problem of automated rolling control is given. The choice of the optimized indicator in the problem of automatic rolling control is determined by its economic significance, the nature of the interrelation with the technological parameters and controls. One of the most economically significant for plate mills is the coefficient of metal consumption of the workpiece per ton of rolled product, or the yield, which depends on the accuracy of the implementation of the specified geometric dimensions of the rolling strip. The formulation of the problem of ensuring the minimum value of deviations in the thickness (width) of the strip from the specified value is given. The problem of optimization on one of three indicators of the rolling process is also formulated: the equivalent torque of the main drive, the electricity consumption for rolling and the time consumption of the rolling cycle, which are determined by the entire course of the rolling cycle, i.e. applied management strategy. The principles of solving the problem of automatic control of rolling modes are described. The rolling control strategies used in the ACS TP of plate mills are considered. Methods of constructing mathematical models for ACS TP of plate mills, as well as their adaptation, are described.
Keywords: *plate mill, automatic control, ACS TP, control strategies, mathematical models, methods of adaptation.*

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-4-95-112

1. Вступ

Ефективність функціонування товстолистового стана (ТЛС) визначається показниками якості прокату і процесу прокатки [1].

Показники якості прокату включають:

а) точність геометричних розмірів: середня товщина $h_{\text{сер}}$ по листу, поздовжня $\delta h_{\text{п}}$ і поперечна різнотовщинність $\delta h_{\text{поп}}$, ширина b, довжина l;

б) форма листа у просторі (відхилення від площинності);

в) механічні властивості (границя текучості, границя міцності, відносне подовження, ударна в'язкість при різних температурах та ін.);

г) стан поверхні.

Показники процесу включають:

а) продуктивність (тривалість циклу прокатки однієї смуги);

б) енерговитрати;

в) витрата металу слябів на тонну прокату, яка залежить від точності прокатки, величини обрізу, а остання – від форми смуги у плані;

г) витрати на ремонтно-відновлювальні роботи.

2. Постановка задачі автоматизованого управління прокаткою

Цілі автоматизованого управління прокаткою полягають у досягненні оптимального співвідношення описаних показників, а при можливості поділу каналів управління – в досягненні найкращих значень кожного з наведених вище показників. Управління режимами прокатки (обтисненнями за пропусками, швидкостями, охолодженням) забезпечує основний ефект у формуванні показників якості прокату і процесу прокатки, перерахованих вище.

Вибір показника, що оптимізується в задачі автоматичного управління прокаткою, обумовлюється його економічною значимістю, характером взаємозв'язку з технологічними параметрами та управліннями. Одним із найбільш економічно значущих для товстолистових станів є коефіцієнт витрати металу заготовки на тонну прокату або вихід придатного, який залежить від точності реалізації заданих геометричних розмірів прокатаної смуги. Точність геометричних розмірів товщини (h) і ширини (b) пов'язана з точністю вибору і реалізації управлінь (розчину валків) у розмірних пропусках.

Забезпечення мінімального значення відхилень у товщині (ширині) смуги від заданого значення ($h_з$, $b_з$) є автономною задачею, що полягає у визначенні розчину валків горизонтальної і вертикальної клітей (H_N і B_K) до захвату металу валками [1, 2]:

$$min\,\sigma\{h_{\text{ф}}(\bar{Z}''_{\text{N-1}},\bar{Z}'_{\text{N-1}},H_{\text{N}})-h_{\text{З}}\}\ \text{при}\ P\geq P^*, \tag{1}$$

$$min\,\sigma\{b_{\text{ф}}(\bar{Z}''_{\text{K-1}},\bar{Z}'_{\text{K-1}},B_{\text{K}})-b_{\text{З}}\}\ \text{при}\ P\geq P^*, \tag{2}$$

де σ – середньоквадратичне відхилення фактичних значень від заданих, P, P^* – фактична і задана ймовірність виникнення відхилень, що мінімізуються, $\bar{Z}'$, $\bar{Z}''$ – вектори параметрів стану і прокату.

Рішення задач (1) і (2) забезпечується прогнозами відповідних параметрів стану і прокату за математичними моделями. Поряд із задачами (1), (2) має місце задача оптимізації по одному із трьох показників (M_e – еквівалентному моменту головного приводу, W – витратам електроенергії на прокатку, $T_{\text{ц}}$ – тривалості циклу прокатки, які визначаються всім ходом циклу прокатки, тобто застосовуваної стратегією управління) при фіксованих на допустимому рівні значеннях інших показників прокату і процесу прокатки. Ця задача формулюється в такий спосіб [1, 3].

$$\begin{gathered}
\text{Знайти}\ \ \vec{a},\vec{V},\Delta\vec{h},N,\\
\text{що забезпечують}\ \min T_{ц}\ \text{при}\ M_e=M_{ном}\\
\text{або}\ \min M_e\ \text{при}\ T_{ц}=T_{цз},\\
\text{або}\ \min W\ \text{при}\ M_e=M_{ном},T_{ц}=T_{цз}\\
\text{з дотриманням обмежень}\\
\sum_{i=1}^{N}\Delta h_i=\Delta h_{\Sigma з},\\
\Delta h_{inp\ \min}\leq\Delta h_i\leq\Delta h_{inp\ \max},\\
a_iK+M_{cmi}\leq M_{доп},\\
V_{i\min}\leq V_i\leq V_{i\max},\\
A\leq\left(\frac{C_j}{h_j}-\frac{C_N}{h_N}\right)\leq Д,\\
t^*_{k\min}\leq t_k\leq t^*_{k\max},
\end{gathered} \tag{3}$$

де $\Delta h_{\Sigma з}$ – сумарне (задане) обтиснення за цикл (етап) прокатки, $i=1,2,...,j,...,N$ – номер пропуску, $\Delta h_{inp(\min)},\Delta h_{inp(\max)}$ – мінімальне і максимальне допустимі обтиснення в i-му пропуску, $M_{ном},M_{cmi},M_{доп}$ – номінальний, статичний і допустимий моменти прокатного двигуна, K – коефіцієнт, що зв'язує прискорення з динамічним моментом двигуна, A, $Д$ – постійні величини для заданого розкату, $t^*_{k(\min)},t^*_{k(\max)}$ – мінімальна і максимальна допустима температура кінця прокатки, $T_{цз}$ – задана тривалість циклу прокатки, C – поперечна, а

$\frac{C}{h}$ – відносна поперечна різнотовщинність розкату, j – номер пропуску, в якому починає проявлятися спотворення форми розкату (неплощинність), $V_i, V_{i(\min)}, V_{i(\max)}$ – відповідно швидкість в i-му пропуску та її мінімально і максимально допустимі значення (обмеження стосується швидкостей захвату $V_{зі}$, усталеної $V_{уі}$, викиду $V_{ві}$ і швидкості рольганга $V_{рі}$).

На етапі розбивки ширини із сформульованої задачі (3) виключаються дві останніх умови: прокатка площинного листа і дотримання температури кінця прокатки.

Отже, *метою статті* є дослідження стратегій управління прокаткою, що використовуються в АСУ ТП товстолистових станів, а також методів побудови математичних моделей і їх адаптації.

3. Принципи рішення задачі автоматичного управління режимами прокатки

Рішення задачі автоматичного управління режимами прокатки базується на використанні формалізованого опису процесу (математичних моделей), адаптації цього опису за результатами вимірювання координат стану процесу, використанні оцінок стану об'єкта управління – агрегату, що автоматизується, і суміжних з ним ділянок технологічної лінії. В умовах відсутності повного аналітичного опису процесу (наприклад, опису формоутворення смуги у площині, формування механічних властивостей прокату і стану його поверхні та ін.), відсутності автоматизованих засобів для визначення значень деяких координат стану об'єкта (площинності, стану поверхні валків та ін.) і стану зовнішніх щодо ділянки, яка автоматизується, ланок технологічної лінії участь людини є необхідною умовою вирішення всього комплексу завдань автоматизації. Хоча людина поступається автоматиці у швидкості і точності переробки інформації, надійності роботи (якість роботи залежить від багатьох факторів, у тому числі психологічних), він може накопичувати і надалі використовувати при управлінні неформалізований досвід, орієнтуватися і приймати рішення в непередбачених ситуаціях, контролювати свої органи почуттів і оцінювати значення і зміни координат стану процесу, засоби для об'єктивної оцінки яких відсутні в АСУ [1].

Процес управління прокаткою можна умовно розділити на три основні складові: вибір стратегії управління (наприклад, закону зміни енергосилових параметрів за пропусками); вибір і реалізація управлінь, які забезпечують виконання стратегії (наприклад, розрахунок товщини і розчинів валків за пропусками і відпрацювання з заданою точністю цих розчинів); отримання інформації про стан об'єкта і суміжних з ним ланок технологічної лінії, оцінка результатів управління. При автоматизації ТЛС сформувався підхід, який передбачає використання набору «жорстких» стратегій управління, отриманих заздалегідь (не в темпі з технологічним процесом) для певних діапазонів зміни характеристик процесу. Вибір однієї із стратегій проводиться з урахуванням конкретної ситуації на об'єкті автоматизації. Як правило, такий вибір робить оператор, який має інформацію про стан об'єкта управління в цілому. На початковій стадії освоєння АСУ прокаткою на ТЛС застосовуються стратегії управління, що використовують досвід операторів і технологів стану, і зафіксовані при ручному управлінні прокаткою (тобто стратегію в цьому випадку задає сам оператор). Це дозволяє вже на початковій стадії впровадження АСУ отримувати ефект від автоматизації і автоматично накопичувати статистичні дані, необхідні для впровадження «жорстких» стратегій управління, які оптимізують процес [1, 4]. Таким чином, при управлінні режимами прокатки на ТЛС використовуються принципи автоматизованого людино-машинного управління.

Алгоритми автоматичного управління режимами прокатки повинні забезпечувати розрахунок і реалізацію управлінь відповідно до заздалегідь знайдених стратегій, які гарантують оптимальне або близьке до оптимального ведення процесу в певних діапазонах зміни параметрів процесу. Реалізація стратегій у відповідних їм конкретних умовах проті-

кання технологічного процесу базується на прогнозі його параметрів. Задача прогнозування характеристик протікання процесу (енергосилових параметрів, пружних деформацій та ін.) є автономною, а можливість її вирішення залежить від необхідного періоду прогнозу (пропуск, етап, цикл) і необхідної точності. Відповідно до цього всі стратегії управління прокаткою можна розділити на два класи: до першого належать стратегії, що вимагають для реалізації короткострокових прогнозів (на пропуск вперед), і до другого – стратегії, що вимагають довгострокових прогнозів (на етап, цикл прокатки) [1].

До першого з названих класів відноситься, наприклад, гранична стратегія з початку циклу, для якої кожне з обтиснень (починаючи з першого пропуску) вибирається максимально допустимим по енергосилових і технологічних обмеженнях з урахуванням заданого сумарного обтиснення на етап або цикл прокатки. До другого класу відносяться стратегії прокатки з рівномірним розподілом моментів за пропусками, з постійною витяжкою, гранична стратегія з кінця циклу, а також стратегія, яка передбачає рівність обтиснень у парах пропусків при парному сумарному числі пропусків на етапі. Описаний поділ стратегій на класи відображає особливості їх алгоритмічної реалізації.

Так, алгоритми реалізації стратегій із короткостроковими прогнозами параметрів прокатки характеризуються мінімальним обсягом обчислень і використовують менш складні (часто рекурентні) математичні моделі прогнозування параметрів прокатки. Реалізація стратегій, які потребують довгострокових прогнозів технологічних параметрів, зазвичай будується на розрахунках управлінь до початку прокатки з використанням математичних моделей зусилля прокатки і деформації кліті. Оскільки фактичні параметри відрізняються від прогнозованих, в результаті розрахунків виникають помилки, що призводять до заниження або завищення числа пропусків. У першому випадку це може призвести до перевищення граничних значень енергосилових параметрів, що неприпустимо, у другому – до зниження продуктивності. Тому після кожного реалізованого пропуску розрахунок управлінь на решту циклу повторюється, точність розрахунків підвищується за рахунок скорочення періоду прогнозу, а також за рахунок уточнення моделей, здійснюваного шляхом адаптації. Проте, помилки, накопичені на початку циклу прокатки, зумовлять не тільки неоптимальний розподіл управлінь за пропусками, але можуть призвести до збільшення кількості пропусків прокатки, принаймні, для першої заготовки в партії. Крім того, оскільки помилки з заниженням кількості пропусків неприпустимі, вводиться необхідне зміщення результатів розрахунку в область, де ймовірність помилок із завищенням числа пропусків зростає. Слід також зазначити, що обсяг обчислень, які реалізують описаний вибір управлінь, досить великий і викликає певні труднощі при їх здійсненні в реальному масштабі часу.

З огляду на вищесказане, пропонується алгоритмічна реалізація стратегій 2-го класу з виключенням довгострокових прогнозів, заснована на перебудові механізму вибору управлінь від циклу до циклу за фактичними даними, а також на таких положеннях:

• прокатка першої заготовки в партії з використанням граничної стратегії з початку циклу у всіх випадках гарантує прокатку з дотриманням усіх обмежень за мінімальне число пропусків і не вимагає прогнозу на тривалий період;

• для кожної наступної заготовки параметри прокатки можна розрахувати з застосуванням математичних моделей прогнозу відповідного параметра за її фактичним значенням в однойменному пропуску (того ж номера) здійсненого циклу.

Описаний перерахунок обтиснень при прокатці партії однакових заготовок забезпечує асимптотичну збіжність програми обтиснень до оптимальної [1].

4. Стратегії управління прокаткою в АСУ ТП товстолистових станів

Розглянемо більш детально стратегії управління прокаткою, що використовуються в АСУ ТП товстолистових станів [4].

4.1. Стратегії автоматичного управління, що враховують еквівалентний момент прокатного двигуна як цільову функцію або обмеження

Розглянемо стратегії управління з урахуванням еквівалентного моменту (M_e) в задачі оптимізації для найбільш загального випадку прокатки, що характеризується широким діапазоном зміни довжин розкату за цикл, наявністю різного виду швидкісних графіків і можливістю вибору (в межах обмежень) обтиснень (витяжок) для оптимізації циклу. Проведений аналіз сформульованої таким чином задачі показав, що визначення виразів для розрахунків оптимальних управлінь у загальному вигляді не представляється можливим. Тому аналіз задачі проводився шляхом оцінки відхилень показників циклу від оптимальних при управлінні прокаткою за будь-якою стратегією, обраною з міркувань практичної доцільності. Для аналізу була прийнята стратегія, яка обумовить рівномірний розподіл моментів прокатки за пропусками. Проведені чисельні розрахунки в реальному діапазоні витяжок показали, що застосування даної стратегії визначать малі відхилення моментів за пропусками і цільової функції від їх оптимальних значень, якими можна знехтувати. Вибір відповідних витяжок λ_i може здійснюватися за спрощеним співвідношенням:

$$\lambda_i = \frac{2\lambda_{i+1} - 1}{\lambda_{i+1}}, \tag{4}$$

$$\lambda_N = \{\lambda_{\Sigma_3} + (N-1)\}\frac{1}{N}. \tag{5}$$

У результаті аналізу отримані стандартні співвідношення оптимальних прискорень для двох будь-яких пропусків прокатки з різними типами швидкісних графіків. Чисельними розрахунками встановлено, що вибір оптимальних прискорень розгону головного приводу за пропусками зумовить незначне зниження показника (менше 1,5%), що оптимізується, у порівнянні з управлінням, при якому величина прискорень від пропуску до пропуску не змінюється. Таким чином, з огляду на простоту реалізації автоматичного управління з постійною уставкою прискорення, останнє доцільно використовувати в розробках автоматичних систем.

Порівняльний аналіз стратегії управління із граничною програмою обтиснень, починаючи з першого пропуску, яка найбільш часто застосовується на практиці при ручному управлінні станом, і стратегії з рівномірним розподілом моментів за пропусками показав, що в області максимальних значень ефективності оптимального управління остання досягає 10% і більше, що обумовлює доцільність застосування зазначеної оптимальної стратегії [3, 4]. Причому під ефективністю мається на увазі різниця тривалості циклу прокатки відповідно при традиційному ручному і оптимальному управлінні, що віднесена до першого з названих показників (всі обмеження і інші умови однакові для обох варіантів).

4.2. Стратегії автоматичного управління режимами прокатки при відсутності обмеження за еквівалентним моментом головного приводу

На сучасних ТЛС прокатується різноманітний сортамент, причому тривалість прокатки партії заготовок одного типорозміру нерідко менше 3τ (τ – постійна часу нагрівання двигуна). У цих умовах, чергуючи партії з перевантаженням щодо нагрівання і без перевантаження, можна прокатувати метал без зниження продуктивності, не перевищуючи допусти-

мий нагрів двигуна. З урахуванням сказаного в цих умовах еквівалентний момент M_e прокатних двигунів зі складу векторного критерію виключається і як обмеження при виборі режимів прокатки не розглядається.

Необхідно також відзначити несуперечливість критеріїв оптимізації циклу прокатки: тривалості циклу прокатки $T_ц$ і витрат енергії на прокатку W. Дійсно, одночасно зі зменшенням тривалості циклу прокатки підвищується температура, при якій проводиться деформація металу, а, отже, зменшуються робота прокатки і кількість енергії, що витрачається на цю роботу. Таким чином, оптимізація циклу прокатки за тривалістю забезпечує наближення показника W до його оптимального значення.

Розглянемо варіант постановки задачі оптимізації режиму прокатки щодо продуктивності, яка характеризується такими умовами:

1. Еквівалентний момент (нагрів) головного приводу не обмежує продуктивності.

2. Максимальна швидкість (вище основної) і прискорення прокатки не обмежуються за умовами перевищення допустимого струму двигуна. Прискорення обмежено за умовами пробуксовки робочих валків щодо опорних, а також смуги на рольганзі.

3. Лінійна швидкість і прискорення головних приводів і рольгангів, що беруть участь у процесі пропуску металу через валки і в період пауз, синхронізовані зі швидкістю (прискоренням) смуги, що прокатується, для виключення порушення чистоти поверхні прокату від прослизання роликів.

4. Тривалість пауз обмежена по мінімуму часом гальмування прокату на рольганзі і подальшого повернення металу у валки.

5. Прискорення головного приводу постійні протягом розгону (гальмування) і від пропуску до пропуску.

6. Поперечний профіль і площинність смуги формуються відповідними впливами на противигин валків, їх температурний профіль і не накладають обмежень на розподіл обтиснень. З урахуванням сказаного, задача автоматичного управління режимами прокатки прийме такий вигляд:

$$\left.\begin{array}{c} \text{Знайти } \Delta\vec{h}(\vec{\lambda}),\ \vec{V},\ N, \\ \text{що забезпечують } \min T_ц = \min \sum_{i=1}^{N} t_{npi} \\ \text{при } \sum_{i=1}^{N} \Delta h_i = \Delta h_{\sum з} \text{ або } \prod_{i=1}^{N} \lambda_i = \lambda_{\sum з} \\ \Delta h_{i\min} \le \Delta h_i \le \Delta h_{i\max}, \\ ak + M_{cmi} \le M_{don}, \\ V_{зi} \le V_{зi\max}; V_{yi} \le V_{yi\max}; V_{вi} \le V_{вi\max}; V_{pi} \le V_{pi\max}. \end{array}\right\} \quad (6)$$

Розглянемо випадок прокатки з технологічним обмеженням швидкості викиду на рівні максимальної швидкості за пропуск, що виключає додаткове охолодження кінців розкату, яка виникає при гальмуванні приводу з металом у валках. Таким чином, при достатній довжині розкату має місце трапецеїдальний швидкісний графік прокатки, вид якого, а також тривалість пропуску і паузи визначені в [3].

Відзначимо, що трикутний швидкісний графік прокатки має місце, коли $V_{вi} = \sqrt{2aL_i + V_{зi}^2}$, де L_i – довжина розкату після пропуску.

Тривалість пропуску складе

$$t_{npi} = \frac{1,5V_{вi} + V_{pi} - V_{зi} - V_{з(i+1)}}{a} + \frac{L_i}{V_{вi}} + \frac{V_{зi}^2}{2aV_{вi}} + \frac{V_{вi}^2 + V_{з(i+1)}^2}{2aV_{pi}}, \tag{7}$$

а загальна тривалість циклу прокатки

$$T_ц = \sum_{i=1}^{N} t_{npi} = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{1,5V_{вi} + V_{pi} - V_{зi} - V_{з(i+1)}}{a} + \frac{L_i}{V_{вi}} + \frac{V_{зi}^2}{2aV_{вi}} + \frac{V_{вi}^2 + V_{з(i+1)}^2}{2aV_{pi}} \right). \tag{8}$$

Визначимо швидкісні управління $V_з$ і $V_в$, що забезпечують мінімізацію цільової функції $T_ц$. Швидкісні управління, обмежені по мінімуму і максимуму нестрогими нерівностями, утворюють замкнену обмежену множину. Таким чином, управління, при яких частинні похідні від $T_ц$ по $V_{зi}$ і $V_{вi}$ рівні 0 або знаходяться на межах множини, або відповідають точкам, де функція не диференційована. Аналізуючи частинні похідні від $T_ц$ по управліннях, отримуємо

$$\frac{\partial T_ц}{\partial V_{з1}} = -\frac{1}{a} + \frac{V_{зi}}{aV_{вi}}, \tag{9}$$

$$\frac{\partial T_ц}{\partial V_{зi}} = -\frac{2}{a} + \frac{V_{зi}}{a}\left(\frac{1}{V_{p(i-1)}} + \frac{1}{V_{вi}} \right), \ i = 2,...,N, \tag{10}$$

причому так як $V_{зi} < V_{вi} (i = 1,2,...,N)$ і $V_{зi} < V_{p(i-1)}$, то $\frac{\partial T_ц}{\partial V_{з1}} < 0$ і $\frac{\partial T_ц}{\partial V_{зi}} < 0$, тобто швидкості захвату повинні відповідати максимально допустимим нормам.

Також очевидно, що рух розкату до кліті за трикутним швидкісним графіком зумовить мінімізацію пауз (і $T_ц$ у цілому).

$$\frac{\partial T_ц}{\partial V_{pi}} = 0 \text{ при } V_{pi} = \sqrt{\frac{V_{вi}^2 + V_{з(i+1)}^2}{2}} = V_{pi}^*. \tag{11}$$

Частинна похідна від $T_ц$ щодо швидкості викиду:

$$\frac{\partial T_ц}{\partial V_{вi}} = \frac{1,5}{a} - \frac{L_i}{V_{вi}^2} - \frac{V_{зi}^2}{2aV_{вi}^2} + \frac{V_{вi}}{aV_{pi}}, \tag{12}$$

а при $V_{pi} = V_{pi}^*$ екстремум $T_ц$ по управлінню $V_{вi}$ досягається в точці, яка визначається рівнянням

$$\frac{1,5}{a} + \frac{V_{зi}^2 + 2aL_i}{2aV_{вi}^2} + \frac{V_{вi}}{a\sqrt{\frac{V_{вi}^2 + V_{з(i+1)}^2}{2}}} = 0. \tag{13}$$

Аналіз рівняння (13) показав, що воно має один додатний корінь у реальному діапазоні зміни $V_{вi}$. Рівняння (13) вирішується визначенням наближеного значення кореня, а потім його уточненням із необхідним ступенем точності. Уточнення кореня зробимо за методом Ньютона.

Для визначення наближеного рішення (13) запишемо його у вигляді

$$\frac{3\sqrt{\frac{V_{вi}^2+V_{з(i+1)}^2}{2}}+2V_{вi}}{\sqrt{\frac{V_{вi}^2+V_{з(i+1)}^2}{2}}}=\frac{V_{зi}^2+2aL_i}{V_{вi}^2}, \tag{14}$$

замінимо $2V_{вi}$ на $2\sqrt{2}\sqrt{\frac{V_{вi}^2+V_{з(i+1)}^2}{2}}$ і після відповідних перетворень отримаємо

$$V_{вi}=V_{вi}^{(0)}=\sqrt{\frac{V_{зi}^2+2aL_i}{3+2\sqrt{2}}}. \tag{15}$$

Уточнене рішення отримаємо за формулою

$$V_{вi}^{(1)}=V_{вi}^{(0)}-\frac{f\ V_{вi}^{(0)}}{f'(V_{вi}^{(0)})}, \tag{16}$$

де $V_{вi}^{(0)}$ – перше наближене значення кореня рівняння, $V_{вi}^{(1)}$ – уточнене значення кореня.

Розрахунки показують, що в реальному діапазоні зміни величин, що входять в (13), відповідному технології прокатки на ТЛС, уточнене рішення відрізняється від (15) не більше, ніж на 1%, тобто менше похибок при вимірюванні і реалізації величин, що входять в (13). З огляду на те, що знайдений екстремум є мінімумом, вираз (15) може використовуватися для визначення оптимального $V_{вi}$. Таким чином, прокатка, за виразом (15), завжди здійснюється за трапецеїдальним графіком з $V_в=V_y$, причому, якщо $V_{вi}^{(0)}$ за (15) більше максимально допустимої швидкості прокатки, то управління останньої фіксується на допустимому рівні.

Визначимо витяжки λ_i, які мінімізують $T_ц$. Величина максимально допустимого обтиснення, як показано в [3], є монотонно зростаючою функцією товщини розкату. Порівнюючи два цикли прокатки, здійснених за програмою із граничними обтисненнями, починаючи з останнього пропуску (гранична стратегія з кінця циклу) і будь-якою відмінною від неї програмою, отримуємо

$$\frac{h_N+\Delta h'_{прN}+\Delta h'_{пр(N-1)}}{h_N}>\frac{h_N+\Delta h_N+\Delta h_{N-1}}{h_N}. \tag{17}$$

Або, з урахуванням того, що $\lambda_i=1+\frac{\Delta h_i}{h_i}$,

$$\lambda'_{пр(N-1)}\cdot\lambda'_{прN}=\lambda_{N-1}\cdot\lambda_N, \tag{18}$$

де індексом (*пр*) позначені обтиснення (витяжки) граничної програми з кінця циклу, а h_i – товщина після i-го пропуску.

Аналогічним чином можна показати, що

$$\prod_{N-j}^{N}\lambda'_{прj}=\prod_{N-j}^{N}\lambda_j, \tag{19}$$

якщо хоча б одне із значень $\lambda_k<\lambda'_{прk}(k\neq 1,\ j\le k\le N)$.

Довжина розкату після *i*-го пропуску

$$L_i = \frac{L_N}{\prod_{j=i+1}^{N} \lambda_j}. \qquad (20)$$

З виразів (19) і (20) випливає, що довжина розкату у будь-якому пропуску при використанні граничної програми з кінця циклу менше довжини у відповідному пропуску при будь-якій іншій програмі розподілу обтиснень.

З метою порівняння тривалості *i*-го пропуску, виконаного за граничною програмою, з кінця циклу і за будь-якою програмою з урахуванням наведених вище виразів для параметрів швидкісних графіків, t_{npi} визначалося за (7) з урахуванням (8) при $V_{вi} = V_{вi}^{(0)}$, $V_{вi} = V_{в\max}$ і встановлено, що $\frac{\partial t_{npi}}{\partial L_i} > 0$.

Отже, з ростом довжини розкату у пропуску тривалість пропуску збільшується. Мінімальне $T_ц$ забезпечується при реалізації програми із граничними обтисненнями, починаючи з останнього пропуску. Число пропусків при цьому дорівнює мінімально можливому, яке виходить при реалізації програми із граничними обтисненнями, починаючи з першого пропуску.

Слід зауважити, що граничну програму, починаючи з першого пропуску, доцільно використовувати при прокатці коротких розкатів у чорнових клітях, яка характеризується трикутними швидкісними графіками електроприводу, значною складовою пауз у загальній тривалості циклу (причому паузи визначені роботою натискного механізму), наявністю етапів, де обтиснення регламентовані технологічними обмеженнями [3].

4.3. Стратегії управління прокаткою товстого листа при обмеженні максимальної швидкості щодо току комутації прокатного двигуна

Розглянемо ще один варіант постановки задачі оптимізації, який характеризується такими умовами:

1. Еквівалентний момент (нагрів) головного приводу не обмежує продуктивність.

2. Довжина розкатів у пропусках дозволяє розігнати головний привод із металом у валках до максимальної швидкості двигуна.

3. Прискорення в діапазоні швидкостей нижче основної обмежене за умовами пробуксовки робочих валків щодо опорних і постійно протягом розгону (гальмування) і від пропуску до пропуску.

4. Максимальна швидкість і прискорення в діапазоні швидкостей вище основної обмежені максимально допустимим за умовами комутації струмом двигуна.

5. Допустимі коливання швидкості захвату ведуть до незначного розкиду тривалості пропуску, що дозволяє прийняти швидкість захвату постійною для всього циклу прокатки.

6. Поперечний профіль і площинність смуги формуються відповідними впливами на противигин валків, їх температурний профіль і не накладають обмежень на розподіл обтиснень.

7. Прокатка здійснюється з використанням противигину опорних валків. У цих умовах необхідно почати скидання тиску у відповідних гідроциліндрах за час t_c до моменту викиду з тим, щоб запобігти підйому опорних валків після викиду розкату. При цьому ділянку розкату S_c, що прокатується після подачі сигналу на скидання (тобто ділянка нерегульованої поперечної різнотовщинності), необхідно обмежити. Відповідно середня швид-

кість на даній ділянці складе S_c / t_c. Крім того, частина розкату, що прокатується з гальмуванням головного приводу, доцільно мінімізувати з метою зменшення охолодження кінців розкату. З огляду на ці умови, а також на сталість прискорення гальмування на ділянці S_c (гальмування на цій ділянці здійснюється в діапазоні швидкостей нижче основної), раціональний швидкісний графік містить ділянку зниження швидкості до швидкості викиду $V_в$:

$$V_в = \frac{S_c}{t_c} - \frac{a_0 t_c}{2} = const. \tag{21}$$

З урахуванням сказаного, формулювання задачі автоматичного управління режимами прокатки прийме такий вигляд.

$$\left.\begin{array}{c} \text{Знайти} \quad \Delta\vec{h}(\vec{\lambda}), \vec{V}_y, N, \\ \text{що забезпечують} \quad \min T_ц = \min \sum_{i=1}^{N} t_{npi} \\ \text{при} \quad \sum_{i=1}^{N} \Delta h_i = \Delta h_{\sum з} \quad \text{або} \quad \prod_{i=1}^{N} \lambda_i = \lambda_{\sum з}, \\ \Delta h_{i\min} \le \Delta h_i \le \Delta h_{i\max}, \\ V_{yi} \le V_{y\max}, \\ I_{cmi} + I_{динi} \le I_{don}, \end{array}\right\} \tag{22}$$

де I_{don} – допустимий струм за умовами комутації. В [3] була показана правомірність припущення про те, що розгін і гальмування приводу у всьому діапазоні швидкості (в тому числі вище основної при досягненні струмом гранично допустимої величини) проводиться з постійним прискоренням.

З урахуванням того, що для розглянутого випадку швидкості захвату $V_з$ і викиду $V_в$ постійні, отримуємо тривалість пропуску

$$t_{npi} = \frac{V_{yi} - V_з - V_в}{a_0} + \frac{L_i}{V_{yi}} + \frac{V_з^2 + V_в^2}{2a_0 V_{yi}} + t_n. \tag{23}$$

У зв'язку з тим, що $V_з$ і $V_в$ постійні, постійною також є тривалість паузи між пропусками t_n. З урахуванням виразу (23) загальна тривалість циклу складе

$$T_ц = \sum_{i=1}^{N} t_{npi} = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{V_{yi} - V_з - V_в}{a_0} + \frac{L_i}{V_{yi}} + \frac{V_з^2 + V_в^2}{2a_0 V_{yi}} \right) + N t_n. \tag{24}$$

Момент прокатки визначається за формулою [3]

$$M_{npi} = \frac{C}{L_N} \ln \lambda_i \frac{\prod_{j=i}^{N} \lambda_j}{\lambda_i}, \tag{25}$$

де C – постійна величина для даного розкату на етапі без кантовок, L_N – кінцева довжина розкату на етапі прокатки.

Перевірка формули (25) за експериментальними даними, отриманими на діючому стані, показує, що її похибка не перевищує 10–15%, тобто має той же порядок, що і похибки відомих із літератури інших математичних моделей моменту прокатки.

Моменту завершення розгону приводу відповідає максимально можлива стала швидкість, яка складе [3]

$$V_{yi} = \frac{k_1}{\frac{M_{cmi}}{M_н} + k_2} \cdot V_н, \tag{26}$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти, $M_{cm}, M_н$ – статичний і номінальний моменти прокатного двигуна, $V_н$ – номінальна швидкість прокатки.

Підставивши в (26) вираз (25), вважаючи для простоти, що $M_{cmi} = M_{npi}$, отримаємо вираз для сталої швидкості прокатки:

$$V_{yi} = \frac{k_1 V_н}{\frac{C \ln \lambda_i}{M_н L_N \lambda_i} \prod_{j=i}^{N} \lambda_j + k_2}. \tag{27}$$

Довжина розкату після пропуску визначається за формулою

$$L_i = N \frac{\lambda_i L_N}{\prod_{j=i}^{N} \lambda_j}. \tag{28}$$

Підставимо (27) і (28) у вираз для $T_ц$:

$$T_ц = \frac{k_1 V_н}{a_0} \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\frac{C \ln \lambda_i}{M_н L_N \lambda_i} \prod_{j=i}^{N} \lambda_j + k_2} - \frac{N(V_з + V_в)}{a_0} + \frac{C}{M_н k_1 V_н} \sum_{i=1}^{N} \ln \lambda_i +$$

$$+ \frac{k_2 L_N}{k_1 V_н} \sum_{i=1}^{N} \frac{\lambda_i}{\prod_{j=i}^{N} \lambda_j} + \frac{C(V_з^2 + V_в^2)}{2 a_0 k_1 V_н} \sum_{i=1}^{N} \frac{\ln \lambda_i}{M_н L_N \lambda_i} \prod_{j=i}^{N} \lambda_j +$$

$$+ \frac{N k_2 (V_з^2 + V_в^2)}{2 a_0 k_1 V_н} + N t_п. \tag{29}$$

Замінимо витяжки λ_i через обтиснення Δh_i, причому

$$\lambda = \frac{h_N + \Delta h_i + \Delta h_{i+1} + \ldots + \Delta h_N}{h_N + \Delta h_{i+1} + \Delta h_{i+2} + \ldots + \Delta h_N},$$

де h_N – кінцева товщина на етапі прокатки.

З отриманого виразу виключаємо Δh_1, виразивши його через Δh_Σ та інші обтиснення:

$$\Delta h_1 = \Delta h_\Sigma - \sum_{i=2}^{N} \Delta h_i. \tag{30}$$

Таким чином, задача оптимізації зводиться до визначення мінімуму тривалості циклу (етапу) прокатки, починаючи із другого пропуску. Причому всі незалежні змінні обмежені по мінімуму і максимуму нестрогими нерівностями.

Отже, необхідно знайти мінімум функції, визначеної на замкнутій і обмеженій множині управлінь. Така функція досягає на цій множині, у крайньому разі, один раз максимального і мінімального значень. Причому екстремальні значення досягаються або у стаціонарних точках, де частинні похідні дорівнюють 0, або на кордонах множини управлінь, або в точках, де функції не диференційовані.

Для визначення оптимальних управлінь, при яких цільова функція досягає мінімуму, проаналізуємо частинні похідні від цільової функції по кожному управлінню. Аналіз згаданих частинних похідних для реального діапазону зміни величин, що входять до цих похідних, показав, що частинні похідні від $T_ц$ по $\Delta h_i (i = 2,..., N)$ від'ємні, тобто $T_ц$ досягає мінімуму при максимальних обтисненнях у відповідних пропусках. Слід, однак, враховувати, що величина максимально допустимого обтиснення в кожному пропуску залежить від товщини розкату перед пропуском, тобто від вибору обтиснень в інших пропусках.

В [3] показано, що довжина розкату в будь-якому пропуску при використанні програми із граничними обтисненнями, починаючи з останнього пропуску (граничної програми з кінця циклу), менше довжини у відповідному пропуску при будь-якій іншій програмі розподілу обтиснень, а, значить, товщина розкату перед пропуском у першому випадку завжди більше. Так як обмеження обтиснень по максимуму являє собою зростаючу функцію товщини розкату, то максимальні обтиснення в кожному пропуску відповідають граничній програмі з кінця циклу, тобто ця програма забезпечує мінімальні $T_ц$. Число пропусків вибирається мінімально можливим, яке відповідає програмі з граничними обтисненнями, починаючи з першого пропуску.

Послідовність вибору оптимальних управлінь така. Вибираються максимально допустимі обтиснення, починаючи з останнього пропуску, за обтисненнями визначаються моменти прокатки, а потім за виразом (26) для кожного пропуску визначаються усталені швидкості прокатки.

4.4. Стратегії автоматичного управління прокаткою товстого листа в умовах забезпечення заданих допусків щодо площинності

Математичні моделі, які описують формоутворення товстого листа у просторі, наведені в [5, 6]. Там же дано опис механізму виникнення неплощинності розкату, який визначається нерівномірністю витяжок розкату в різних його поздовжніх перетинах, внаслідок чого з'являються додаткові напруження: в зонах підвищеного обтиснення – напруження стиску, а в менш обтиснутих частинах смуги – напруження розтягнення.

Величина додаткових напружень пропорційна різниці відносних поперечних різнотовщинностей до і після пропуску $\left(\frac{C_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{C_i}{h_i} \right)$. Якщо ці напруження перевищують критичну величину, то лист коробиться, при цьому напруження істотно зменшуються або зникають зовсім.

Виниклі у смузі додаткові напруження послаблюються в результаті релаксації. Цей процес визначається структурним станом металу, рівнем початкового напруження, температурою, перебігом часу, хімічним складом металу, станом наклепу. Залежно від співвідношення швидкості релаксації додаткових напружень і швидкості прокатки ці напруження можуть або повністю зніматися в паузах між пропусками і коробленням розкату (у цьому випадку визначаються тільки нерівномірністю деформації по ширині в даному пропуску), або зніматися не в повному обсязі і тоді необхідно враховувати накопи-

чення напружень від пропуску до пропуску. У цьому випадку напруження в i -му пропуску пропорційні величині

$$\sum_{j=\gamma}^{i}\left(\frac{C_{j-1}}{h_{j-1}}-\frac{C_j}{h_j}\right)K_{Pj},\gamma<i,$$

де K_{Pj} – коефіцієнт ослаблення напружень в j -му пропуску, j – номер пропуску, починаючи з якого накопичуються напруження.

При прокатці рядових вуглецевих і низьколегованих сталей, а також алюмінієвих сплавів напруження в паузі повністю знімаються, а при прокатці високовуглецевих, високолегованих, нержавіючих сталей і особливо при знижених температурах напруження накопичуються з дуже незначним рівнем релаксації.

Стратегії прокатки площинного листа можна розділити на дві групи: 1) прокатка з утворенням хвилі у проміжних пропусках і з подальшим зменшенням її в останньому пропуску до допустимих меж (визначаються вимогами стандартів або умовами правки, якщо вона передбачена); 2) прокатка без хвилі у всіх пропусках. Стратегії першої групи забезпечують, як правило, високу продуктивність, однак при короблені листів у проміжних пропусках погіршується якість поверхні смуги (відбитки від окалини, віялоподібні подряпини); при високих вимогах до стану поверхні такі стратегії не застосовуються. До другої групи належать стратегії, які передбачають обмеження нерівномірності витяжок у межах, що не приводять до короблення листа. При відсутності противигину валків (або при малоефективному противигині) стратегії цієї групи можуть істотно обмежувати обтиснення в ряді пропусків, внаслідок чого збільшується тривалість циклу прокатки.

Спосіб реалізації стратегій першої або другої групи залежить від швидкості релаксації додаткових напружень, що приводить до короблення листів. На ТЛС частіше використовуються стратегії управління площинністю листа з утворенням хвилі у проміжних пропусках і з подальшим зменшенням її в останньому пропуску до допустимих меж.

Детальніше стратегії управління прокаткою товстого листа в умовах забезпечення заданих допусків щодо площинності представлені в [3, 6], у тому числі стратегії управління, що використовують неузгодженість швидкості верхнього і нижнього валків кліті (швидкісну асиметрію), а також враховують подальшу правку листа у правильній машині.

4.5. Стратегії управління режимами прокатки для початкової стадії впровадження АСУ ТП

Початкова стадія освоєння АСУ ТП зазвичай використовується для накопичення статистичних даних про функціонування об'єкта і прив'язки на підставі цих даних математичного забезпечення АСУ ТП до конкретного процесу. Потреба в таких заходах виникає також при оновленні традиційного сортаменту стана, реконструкції тощо. Однак в зазначені періоди можливе і доцільне ведення автоматичного управління за алгоритмами, які використовують наявний досвід технологів і операторів стана. Такі алгоритми можуть реалізовувати стратегії розподілу товщин за пропусками, що застосовуються операторами-прокатниками. Це дозволяє, з одного боку, вже на початковій стадії впровадження або в періоди освоєння нового сортаменту отримувати ефект від автоматичного управління за рахунок контролю допустимих параметрів прокатки, більш точного дотримання розмірних допусків, а з іншого, – виконати задачі накопичення статистичних даних в автоматичному режимі і здійснювати на наступній стадії освоєння АСУ ТП впровадження стратегій управління, які оптимізують процес прокатки. Цей підхід був використаний при створенні і освоєнні системи розрахунку параметрів прокатки (СРПП) – складової частини АСУ ТП прокатки на ділянці клітей ТЛС 3600 металургійного комбінату «Азовсталь» [7].

Стратегії розподілу товщин за пропусками, що застосовуються операторами-прокатниками, фіксуються при ручному управлінні процесом прокатки першої заготовки в партії, а потім реалізуються у процесі автоматичної прокатки наступних заготовок того ж сортаменту за умови, що відмінності в параметрах заготовок, прокатаних у ручному та автоматичному режимах (наприклад, по температурі), не призводять до перевищення допустимих енергосилових параметрів, а також не викликають порушень технології, що призводять до браку продукції. В іншому випадку проводиться перехід на ручне управління і запам'ятовується стратегія управління. Втручання оператора при автоматичній прокатці з метою зміни режиму обтиснень фіксуються, а потім ураховуються при автоматичній прокатці наступних заготовок. Реалізація зафіксованої стратегії здійснюється шляхом прогнозування зусилля прокатки і деформації кліті в кожному черговому пропуску та визначення для нього розчину валків, який видається в систему управління натискним механізмом, а також контроля параметрів прокатки (зусилля і моменту) за допустимими значеннями, тобто для роботи з цим варіантом математичного забезпечення потрібна обмежена номенклатура математичних моделей (моделі зусилля прокатки і деформації кліті, а також моменту прокатки).

5. Математичні моделі прогнозування технологічних параметрів прокатки

У загальному випадку для реалізації різних стратегій управління прокаткою розрахунок керуючих впливів базується на прогнозуванні технологічних параметрів прокатки за допомогою математичних моделей. При цьому використовуються моделі пластичної деформації металу (зусилля прокатки) і пружної деформації кліті, моделі моменту прокатки, теплових процесів при прокатці, моделі, що описують процес формування форми розкату у просторі і плані (площині) [5, 6, 8–10].

При побудові математичних моделей використовуються два підходи. Перший передбачає отримання вихідної математичної моделі на основі аналізу фізичних процесів, що мають місце при формуванні певних параметрів, і розробку процедури подальшої адаптації моделі за фактичними параметрами прокатки (теоретичні моделі). Вихідні дані констант, що входять у теоретичні моделі, визначаються у процесі експериментальних досліджень. Другий підхід передбачає побудову моделей шляхом статистичного аналізу спостережень за ходом технологічного процесу і встановлення кореляційних зв'язків між його основними параметрами (експериментальні моделі).

Розробці теоретичних моделей передує тривале теоретичне і експериментальне дослідження процесу. Моделі такого типу зручні завдяки їх універсальності. Однак теоретичні моделі, які описують процес прокатки, як правило, складні і громіздкі, що пояснюється високою складністю теоретичного опису процесу, що враховує всі фактори, які мають місце при реальній прокатці. Крім цього, деякі аргументи моделей є неспостережуваними у процесі реальної прокатки на ТЛС внаслідок відсутності відповідних вимірювальних пристроїв.

При розробці алгоритмів автоматизованого управління процесом прокатки досить часто використовуються статистичні моделі. При цьому структури моделей, отримані на одному прокатному стані, як правило, можуть бути з успіхом застосовані на інших станах із подібними умовами прокатки.

Побудова математичних моделей об'єкта або процесу за експериментальними даними зазвичай здійснюється методами регресійного аналізу. Крім регресійного аналізу, одним із методів побудови математичних моделей об'єктів є метод групового урахування аргументів (МГУА). В АСУ ТП ТЛС застосовуються обидва описаних вище типи моделей, а також напівемпіричні моделі, що поєднують у собі характеристики моделей обох типів. В алгоритмах автоматизованого управління режимами прокатки широко застосовуються рекурентні моделі, що використовують фактичні значення зусилля прокатки і параметрів

осередку деформації в реалізованих пропусках і тим самим дають можливість виключити зі структури моделі параметри, що кількісно важко визначаються (опір деформації, коефіцієнт тертя), які залишаються практично незмінними протягом циклу прокатки або навіть протягом прокатки партії заготовок.

Ці рекурентні залежності мають вигляд

$$P_i = P_{i-1} f(G_i, G_{i-1}), \tag{31}$$

де P_i, P_{i-1} – прогнозоване зусилля в i-му пропуску і фактичне в $(i-1)$-му, G_i, G_{i-1} – очікувані параметри осередку деформації в i-му пропуску та фактичні в $(i-1)$-му.

Рекурентні залежності дозволяють прискорити процес обчислень при досить високій точності прогнозу, виключаючи прогнози на перший пропуск циклу або етапу прокатки.

Діапазони зміни параметрів математичних моделей визначаються як характеристиками смуг, що прокатуються, так і зміною стану механічного обладнання ТЛС у процесі прокатки, які можуть істотно змінюватися з часом. Це пояснюється механічним зносом і які зміною теплового профілю робочих валків у процесі прокатки, зміною профілювання валків після перевалки, зміною умов охолодження смуги в залежності від температури навколишнього середовища, варіацією хімічного складу і фізико-механічних властивостей металу, що прокатується, варіацією області вхідних змінних моделей та інших факторів.

У зв'язку з істотною нестаціонарністю стану як об'єкта управління, викликаною перерахованими вище причинами, математичні моделі, отримані при дослідженні об'єкта і використовуються при проєктуванні системи автоматизації, необхідно безперервно уточнювати (адаптувати) у процесі експлуатації на діючому об'єкті. Якщо уточнення не виконувати, то моделі не будуть адекватно відображати процес і по цих моделях неможливо буде прогнозувати поведінку об'єкта і керувати ним. Внаслідок цього доводиться стикатися з більшою або меншою початковою невизначеністю.

Можливість прогнозу при неповній апріорній інформації забезпечується застосуванням методів адаптації, які зменшують початкову невизначеність за рахунок інформації, що одержується у процесі роботи об'єкта. Інформація про процес використовується для адаптації математичних моделей із метою максимального наближення значень параметрів, що за ними розраховуються, до їх істинних значень.

Задача адаптації зводиться до оцінювання параметрів моделей за результатами оцінювання вхідних і вихідних змінних, отриманих в умовах нормального функціонування об'єкта. Тут під оцінюванням параметрів мається на увазі експериментальне визначення їх значень за умови, що структура моделі відома. При цьому передбачається, що вхідні і вихідні змінні, між якими існує зв'язок, відомі, і що ці змінні можуть бути виміряні у процесі нормальної експлуатації.

Існує досить велика кількість алгоритмів адаптації моделей. Вони розрізняються числом обчислень на кожному кроці адаптації. Одним із найбільш поширених багатокрокових алгоритмів адаптації є метод найменших квадратів (МНК) або рекурентний метод найменших квадратів (РМНК). Однак ці алгоритми адаптації вимагають великого обсягу експериментальних даних. Широке застосування в АСУ отримали однокрокові алгоритми. Найбільш поширеними з однокрокових алгоритмів є алгоритм стохастичної апроксимації (АСА) і алгоритм послідовного навчання АПО (алгоритм Качмажа). Результати застосування згаданих вище методів адаптації стосовно до математичних моделей АСУ ТЛС описані в роботі [3].

Як уже згадувалося, у процесі автоматичного розрахунку управлінь режимом обтиснень використовуються математичні моделі основних параметрів прокатки, що забезпечують необхідну точність заданих значень вихідних координат об'єкта автоматизації. При цьому отримання високих точностних характеристик пов'язане з жорсткістю вимог до яко-

сті технологічної інформації, ускладненням моделей і процедур їх адаптації. У свою чергу, допустима похибка в отриманні заданих координат стану об'єкта залежить від значимості конкретного параметра в технологічному процесі. Так, математичні моделі зусилля прокатки і деформації кліті є основними для розрахунку управлінь, які обумовлюють задані геометричні розміри листа, і відповідно повинні забезпечувати достатню точність розрахунку. До моделей розрахунку величин граничних обтиснень пред'являються інші, більш низькі вимоги. В [2] наведена оцінка впливу точності математичних моделей різних параметрів на відхилення останніх від заданих значень і їх значимість у дотриманні основних вимог до АСУ ТП ТЛС. Вимоги до точності математичних моделей параметрів прокатки для АСУ ТП товстолистових станів представлені в [11].

Оскільки в варіанті математичного забезпечення для початкової стадії освоєння АСУ ТП відсутня вимога розрахунку управлінь щодо першої заготовки, для прогнозування застосовують математичні моделі, які використовують інформацію про технологічні параметри прокатаних раніше заготовок і поточної заготовки.

Математична модель зусилля прокатки для початкової стадії впровадження АСУ ТП повинна характеризуватися такими ознаками:

• можливістю експлуатації без попереднього накопичення та обробки статистичних даних для формування моделі;

• гнучкістю настройки моделі до реальних параметрів конкретної смуги при забезпеченні заданої точності прогнозу.

Цим характеристикам задовольняє модель зусилля прокатки, отримана у вигляді рекурентного співвідношення, що зв'язує параметри прогнозованого пропуску заготовки, що прокатується, як з параметрами реалізованих пропусків цієї ж заготовки, так і з параметрами відповідних пропусків прокатаної раніше (базової) заготовки з тієї ж партії [3, 12].

6. Висновки

Описані вище підходи до автоматичного управління режимами прокатки на ТЛС були використані при розробці математичного забезпечення ряду впроваджених в експлуатацію АСУ ТП ТЛС, у тому числі стана 2250 Алчевського меткомбінату, стана 3600 меткомбінату «Азовсталь» і стана 3600 Бхілайского метзаводу, стана 5000 ВО «Іжорський завод», листового стана 1500 метзаводу «Серп і Молот ».

Ці системи характеризуються сучасним рівнем автоматизації технологічного процесу і високою ефективністю їх використання.

Аналізуючи результати впровадження АСУ ТП на ТЛС, можна відзначити основні показники ефективності автоматизації:

• підвищення якості прокату, перш за все, за рахунок скорочення допусків на геометричні розміри листів;

• економія металу;

• економія енергоресурсів;

• підвищення темпу прокатки;

• зниження аварійності та підвищення довговічності обладнання;

• полегшення роботи експлуатаційного персоналу.

Досвід експлуатації АСУ ТП прокатки на товстолистових станах підтвердив актуальність і ефективність робіт по автоматизації. В умовах інтенсифікації виробництва автоматизоване управління дозволяє стабільно вести процес прокатки з оптимальним використанням наявних ресурсів.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Корбут В.Б., Бутко В.Г. Основные принципы построения и опыт внедрения АСУ толстолистовыми прокатными станами. Интернет-издание «Metaljournal», 2014.

Март. URL: https://www.metaljournal.com.ua/main-principals-of-design-and-integration-experience-of-Automatic-Control-System-by-plate-mills/.
2. Луговской В.М. Алгоритмы системы автоматизации листовых станов. М.: Металлургия, 1974. 320 с.
3. Иевлев Н.Г., Грабовский Г.Г. Математические модели и алгоритмы управления в АСУ ТП толстолистовых прокатных станов. К.: Техніка, 2001. 248 с.
4. Иевлев Н.Г. Стратегии автоматического управления режимами прокатки на толстолистовых прокатных станах. *Автоматизація виробничих процесів*. 2007. № 1 (24). С. 111–123.
5. Иевлев Н.Г. Математические модели плоскостности толстолистового проката применительно к АСУ ТП. *Математичні машини і системи*. 2018. № 1. С. 67–77.
6. Ієвлєв М.Г., Грабовський Г.Г. Теоретичні та експериментальні дослідження математичних моделей площинності товстолистового прокату. *Науково-технічна інформація*. 2016. № 1 (67). С. 54–62.
7. Твардовский В.П., Ганчич Г.Г., Иевлев Н.Г. и др. Математическое обеспечение АСУТП ТЛС первоочередного внедрения. *Автоматизация листовых прокатных станов*. К.: Институт автоматики, 1983. С. 42–49.
8. Иевлев Н.Г. Автоматическое управление формообразованием листа в плане на реверсивном стане горячей прокатки. *Математичні машини і системи*. 2019. № 3. С. 111–119.
9. Иевлев Н.Г. Математические модели в автоматизированных системах управления режимами обжатий на толстолистовых станах. *Математичні машини і системи*. 2017. № 4. С. 112–119.
10. Ієвлєв М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі деформації кліті для АСУ ТП товстолистових прокатних станів. *Математичні машини і системи*. 2020. № 3. С. 87–92.
11. Иевлев Н.Г. Анализ требований к точности математических моделей параметров прокатки для АСУ ТП толстолистовых станов. *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 56–68.
12. Твардовский В.П., Иевлев Н.Г., Полещук В.В. и др. Прогнозирование усилия прокатки в алгоритмах автоматического управления режимами прокатки на толстолистовых станах. *Вопросы авиационной науки и техники. Технология легких сплавов.* 1986. Вып. 3. С. 65–68.

Стаття надійшла до редакції 16.11.2020