

УПРАВЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ РАЗНОТОЛЩИННОСТЬЮ ЛИСТОВ НА ТОЛСТОЛИСТОВЫХ СТАНАХ С ПОМОЩЬЮ ЭФФЕКТА СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ

*Государственная научно-производственная корпорация «Киевский институт автоматики», г. Киев, Украина

**Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. У статті розглянуто проблему забезпечення точності геометричних розмірів листового прокату. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є зниження поздовжньої різнотовщинності листів. Ефективним способом зниження поздовжньої різнотовщинності на станах, оснащених гідравлічними нажимними пристроями (ГНП), є регулювання товщини і поздовжньої різнотовщинності шляхом зміни розчину валків у процесі прокатки за допомогою ГНП. Однак більшість діючих товстолистових станів не оснащено ГНП. Тому актуальним є питання про використання інших методів управління геометричними розмірами прокату. Одним з ефективних каналів управління геометрією прокату за допомогою управління швидкістю головних приводів прокатних станів з індивідуальним приводом валків може бути канал, який використовує ефект швидкісної асиметрії (ША), який полягає у зниженні зусилля прокатки при збільшенні неузгодженості швидкостей валків. Оскільки зниження зусилля прокатки впливає як на товщину, так і на поперечний профіль смуги, використання ефекту ША запропоновано в ряді рішень з автоматичного регулювання поперечної і поздовжньої різнотовщинності. У статті наведено математичний опис зміни товщини прокату під дією неузгодженості швидкостей робочих валків, виконано математичне моделювання процесу. Результати моделювання підтверджені дослідженнями процесу прокатки з ША на стані 3600 металургійного комбінату «Азовсталь». Наведено укрупнену структурну схему системи регулювання різнотовщинності прокату з ША. Проведені дослідження і промислова апробація дозволяють зробити висновок про ефективність використання ША для управління поздовжньою різнотовщинністю листів на товстолистових станах, а наведені у статті залежності доцільно використовувати в системах управління ША.

Ключові слова: поздовжня різнотовщинність, товстолистовий стан, швидкісна асиметрія, автоматичне регулювання.

Аннотация. В статье рассмотрена проблема обеспечения точности геометрических размеров листового проката. Одним из путей решения этой проблемы является снижение продольной разнотолщинности листов. Эффективным способом снижения продольной разнотолщинности на станах, оснащенных гидравлическими нажимными устройствами (ГНУ), является регулирование толщины и продольной разнотолщинности путем изменения раствора валков в процессе прокатки с помощью ГНУ. Однако большинство действующих толстолистовых станов не оснащено ГНУ. Поэтому актуальным является вопрос об использовании других методов управления геометрическими размерами проката. Одним из эффективных каналов управления геометрией проката посредством управления скоростью главных приводов прокатных станов с индивидуальным приводом валков может быть канал, использующий эффект скоростной асимметрии (СА), который заключается в снижении усилия прокатки при увеличении рассогласования скоростей валков. Поскольку снижение усилия прокатки воздействует как на толщину, так и на поперечный профиль полосы, использование эффекта СА предложено в ряде решений по автоматическому регулированию поперечной и продольной разнотолщинности. В статье приведено математическое описание изменения толщины проката под действием рассогласования скоростей рабочих валков, выполнено математическое моделирование процесса. Результаты моделирования подтверждены исследованиями процесса прокатки с СА на стане 3600 металлургического комбината «Азовсталь». Приведена укрупненная структурная схема системы регулирования разнотолщинности проката с СА. Проведенные исследования и промышленная апробация позволяют сделать вывод об эффективности использования СА для управления продольной разнотолщинностью листов на толстолистовых станах, а приведенные в статье зависимости целесообразно использовать в системах управления СА.

Ключевые слова: продольная разнотолщинность, толстолистовой стан, скоростная асимметрия, автоматическое регулирование.

Abstract. The article deals with the problem of ensuring the accuracy of geometric dimensions of rolling stands. One of the ways to solve this problem is to reduce the longitudinal sheets thickness variation. An effective way to reduce the longitudinal thickness variation on stands equipped with hydraulic pressure devices (HPD) is to control the thickness and longitudinal thickness variation by changing the roll solution during the rolling process using the HPD. However, most of the existing rolling stands are not equipped with HPD. Therefore, the actual question is the use of other methods for controlling the geometric dimensions of rolled products. One of the effective channels for controlling the geometry of rolled metal by controlling the speed of the main drives of rolling stands with an individual roll drive can be a channel that uses the effect of speed asymmetry (SA), which reduces the rolling force while increasing the mismatch of the roll speeds. Since the reduction of the rolling force affects both the thickness and the transverse profile of the strip, the use of the SA effect has been proposed in a number of solutions for the automatic regulation of the transverse and longitudinal thickness variations. The article provides a mathematical description of the change in the thickness of the rolled stock under the action of the mismatch of speeds of the work rolls, and a mathematical modeling of the process has been performed. The simulation results are confirmed by studies of the rolling process with SA at a stand 3600 of the Azovstal metallurgical combine. An extended block diagram of a system of regulating the thickness variation of rolled products with SA is given. The studies and industrial approbation allow us to conclude about the effectiveness of using SA to control the longitudinal sheets thickness variation on rolling stands, and the dependencies which are given in the article should be used in SA control systems.

Keywords: longitudinal thickness variation, rolling stand, speed asymmetry, automatic control.

1. Введение

К числу важнейших показателей качества листового проката относится точность его геометрических размеров. Одним из путей повышения точности прокатки листовой стали является снижение продольной разнотолщинности листов. Эффективным способом снижения продольной разнотолщинности на станах, оснащенных гидравлическими нажимными устройствами (ГНУ), является регулирование толщины и продольной разнотолщинности путем изменения раствора валков в процессе прокатки с помощью ГНУ. Однако большинство действующих толстолистовых станов не оснащено ГНУ. Поэтому актуальным является вопрос об использовании других методов управления продольной разнотолщинностью.

Целью настоящей статьи является исследование эффективности использования скоростной асимметрии для управления продольной разнотолщинностью листов на толстолистовых станах, а также анализ зависимостей, которые целесообразно использовать в системах управления скоростной асимметрией.

2. Изложение основного материала

Одним из эффективных каналов управления геометрией проката посредством управления скоростью главных приводов прокатных станов может быть канал, использующий эффект скоростной асимметрии (СА), который заключается в снижении усилия прокатки при увеличении рассогласования скоростей валков [1, 2]. Поскольку снижение усилия прокатки воздействует как на толщину, так и на поперечный профиль полосы, использование эффекта скоростной асимметрии предложено в ряде решений по автоматическому регулированию поперечной и продольной разнотолщинности, а также плоскостности [3–5]. Это наиболее доступный с точки зрения реализации канал автоматизированного управления геометрией полосы, поскольку его использование не требует капитальных затрат на реконструкцию оборудования. Необходимо, однако, отметить, что при несимметричной прокатке имеются ограничения по частотному диапазону разведения скоростей, неравномерному распределению моментов между верхним и нижним валками, загибу полосы и т.д.

Остановимся на математическом описании изменения толщины проката под действием рассогласования скоростей рабочих валков, для чего рассмотрим очаг деформации.

С учетом аппроксимации поперечного сечения полосы параболой средняя толщина выходного (из очага деформации) сечения может быть представлена как

$$h_{cp.вых} = h_{вых} - \frac{\delta h_{n.вых}^*}{3}, \quad (1)$$

где $h_{cp.вых}$ – средняя толщина полосы на выходе из очага деформации, $\delta h_{n.вых}^*$ – поперечная разнотолщинность (на выходе клетей) – разница между толщиной по продольной оси и толщиной по кромкам в одном и том же поперечном сечении.

Соответственно средняя толщина на входе очага деформации

$$h_{cp.вх} = h_{вх} - \frac{\delta h_{n.вх}^*}{3}, \quad (2)$$

где $\delta h_{n.вх}^*$ – поперечная разнотолщинность на входе очага деформации.

Усилие прокатки P определяется зависимостью [6]

$$P = 1,15 n_\sigma \sigma_t B \sqrt{R \Delta h}, \quad (3)$$

где n_σ – коэффициент напряженного состояния, Δh – обжатие, B – ширина полосы, R – радиус валков, σ_t – сопротивление деформации проката.

Связь между усилием прокатки P , толщиной по оси полосы и поперечной разнотолщинностью может быть представлена как

$$h_{вых} = S + \frac{P}{M_k}, \quad \delta h_{n.вых}^* = \delta h_{но}^* + \frac{P}{M_{вал}}, \quad (4)$$

где S – раствор ненагруженных валков, $M_k, M_{вал}$ – модули клетки и валковой системы, $\delta h_{но}^*$ – начальная выпуклость валков.

С учетом выражений (2) и (3) воздействие СА на разнотолщинность полосы анализировалось на основе полученных экспериментальных данных и математического описания [4, 7]:

$$\left. \begin{aligned} \delta h_{n.вых}^* &= \delta h_{но}^* + \frac{P}{M_{вал}}, \\ h_{вых} &= S + \frac{P}{M_k}, \\ \delta h_{вых}^* &= \frac{\delta P}{M_k}, \\ P &= 1,15 n_\sigma \sigma_t B \sqrt{R \Delta h}, \\ \Delta h &= h_{cp.вх} + \frac{1}{3} \delta h_{n.вых}^* - h_{вых}, \\ K_{CA} &= \frac{\Delta P_{CA}}{\frac{\Delta V}{V}} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где n_σ определяется в соответствии с [4, 7] по следующей зависимости:

$$n_{\sigma} = 1 + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{R(1-\varepsilon)}{\varepsilon}} \left[\sqrt{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}} + \sqrt{\left(\frac{1}{(1-\Delta V/V)(1-\varepsilon)}\right)^{1/2} - 1} - \sqrt{\left(\frac{1-\Delta V/V}{1-\varepsilon}\right)^{1/2} - 1} \right] \ln \frac{1-\Delta V/V}{1-\varepsilon}, \quad (6)$$

где $h_{\text{вых}}$ – толщина на выходе из валков, $\delta h_{\text{вых}}^*$ – продольная разнотолщинность полосы, P – усилие прокатки, $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{\text{вх}}}$ – относительное обжатие, V – скорость прокатки, ΔV – разница скоростей верхнего и нижнего валков, K_{CA} – коэффициент передачи канала СА, ΔP_{CA} – изменение усилия от СА.

На основе уравнений (5) было выполнено математическое моделирование процесса асимметричной прокатки в диапазоне реального изменения параметров проката для ряда толстолистовых прокатных станов.

Анализ результатов моделирования показал, что эффект снижения усилия прокатки увеличивается с уменьшением толщины прокатываемых раскатов и увеличением рассогласования скоростей, а при увеличении степени деформации уменьшается. Максимально допустимое рассогласование близко к величине деформации. Как видно из выражений (5), максимальное рассогласование достигается при $\Delta V/V = \varepsilon$. Дальнейшее увеличение рассогласования может привести к неустойчивости процесса с возможным появлением проскальзывания (буксовки) валков относительно полосы.

Также установлено, что канал СА характеризуется переменным и нелинейным коэффициентом передачи в функции относительного обжатия ε и сопротивления деформации σ . Кроме того, наличие ненаблюдаемых факторов обуславливает случайную составляющую в результатах расчетов относительно данных эксперимента.

Учитывая сказанное, для выработки регулирующего воздействия по каналу СА необходимо прогнозировать значение $\Delta V/V$ на каждом участке полосы, изменение ε , а также производить идентификацию и адаптацию описания объекта.

С целью установления характеристик канала скоростной асимметрии для его использования в системе автоматического управления были проведены также исследования процесса прокатки со скоростной асимметрией на стане 3600 металлургического комбината «Азовсталь» с использованием установки, описанной в [3].

В зависимости от марок сталей и типоразмеров эффект скоростной асимметрии оказывает различное влияние на изменение усилия прокатки. В среднем для исследуемого сортамента по маркам сталей и типоразмерам при $\frac{V_{\text{в}} - V_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} = 0,04$ (где $V_{\text{в}}$ и $V_{\text{н}}$ – соответ-

ственно скорости вращения верхнего и нижнего валков) усилие прокатки снижается примерно на 7% полного усилия прокатки. При этом момент прокатки с учетом отдачи электроэнергии в сеть (один из валков работал в генераторном режиме) уменьшился на 17%. Анализ экспериментальных данных показал, что динамика процесса полностью определяется системой электропривода. Очаг деформации является практически безынерционным звеном. Для электропривода чистой клетки стана 3600 на основании полученных экспериментальных данных, согласно известным методикам, была построена передаточная функция переходного процесса разведения скоростей [8], характеризующаяся чистым запаздыванием порядка 0,3 с и максимальной постоянной времени 0,25 с. Сопоставляя эти данные с характеристиками возмущений, дестабилизирующих продольную разнотолщинность, следует отметить, что быстроедействие электропривода прокатных валков соизмеримо со скоростью изменения основных возмущений. Это необходимо учитывать при разработке системы автоматического регулирования.

Рассмотрим постановку задачи для системы автоматического управления скоростной асимметрией, обеспечивающей стабилизацию толщины полосы ($h_{вых}$) на выходе из валков или продольной разнотолщинности ($\delta h_{вых}$). При этом необходимо свести изменение усилия прокатки (ΔP) к нулю. Критерием управления является изменение усилия прокатки в клети, которое зависит от величины разведения скоростей

$$\frac{\Delta V}{V} : \Delta P \rightarrow 0, \quad (7)$$

где ΔV – разность скоростей рабочих валков, V – скорость одного из валков.

Критерием эффективности управления является получение заданной толщины. При этом имеют место следующие ограничения на величину $\frac{\Delta V}{V}$:

- 1) энергосиловые, связанные с перераспределением моментов прокатки или токов главного привода как при работе на основной скорости, так и при ослаблении поля;
- 2) технологические, обусловленные нарушением стабильности процесса при возникновении пробуксовок валков относительно полосы и связанного с этим явлением изменения состояния поверхности полосы, загибами конца полосы;
- 3) частотные, связанные с полосой пропускания трудноизменяемой части системы – системы электропривода.

Как было отмечено выше, для выработки управляющего воздействия при регулировании продольной разнотолщинности по каналу скоростной асимметрии необходимо прогнозировать значение (изменение) ε на каждом участке полосы, а также производить идентификацию и адаптацию описания объекта.

Сопоставив возможности канала СА с учетом перспектив повышения быстродействия индивидуального привода прокатных валков и частотные характеристики возмущений, действующих на геометрию полосы в условиях нелинейного K_{CA} , для стана 3600 определена целесообразность построения регулятора по возмущению, компенсирующего разнотолщинность от «глиссажных меток», «температурного клина» и охлаждения концов. Укрупненная структурная схема системы регулирования электропривода приведена на рис. 1.

Структурная схема содержит два основных блока 1 и 2 [4, 7]. Блок 1 – это схема объекта – очага деформации с вводом СА. Блок 2 представляет функциональную схему регулятора по возмущению, базирующегося на прогнозировании текущего усилия по длине полосы в регулируемом пропуске на основании измерений, произведенных в предшествующем пропуске, и дополнительного температурного клина. В пропуске, предшествующем регулируемому $N - 1$ -му, измеряется усилие прокатки P_i^{N-1} в i -х точках по длине полосы. Причем каждому измеренному значению соответствует своя координата по длине полосы l_i^{N-1} , которая фиксируется с помощью датчика угла поворота валков. Эти данные заносятся в массивы машинной памяти. Толщина полосы h_i^{N-1} в каждой координате:

$$h_i^{N-1} = \frac{P_i^{N-1}}{M_k} + S^{N-1}. \quad (8)$$

Средняя толщина полосы h_{cp}^{N-1} по длине и среднее усилие прокатки:

$$h_{cp}^{N-1} = \frac{1}{j} \sum_i^j h_i^{N-1}, \quad P_{cp}^{N-1} = \frac{1}{j} \sum_i^j P_i^{N-1}, \quad (i = 1, 2, \dots, j). \quad (9)$$

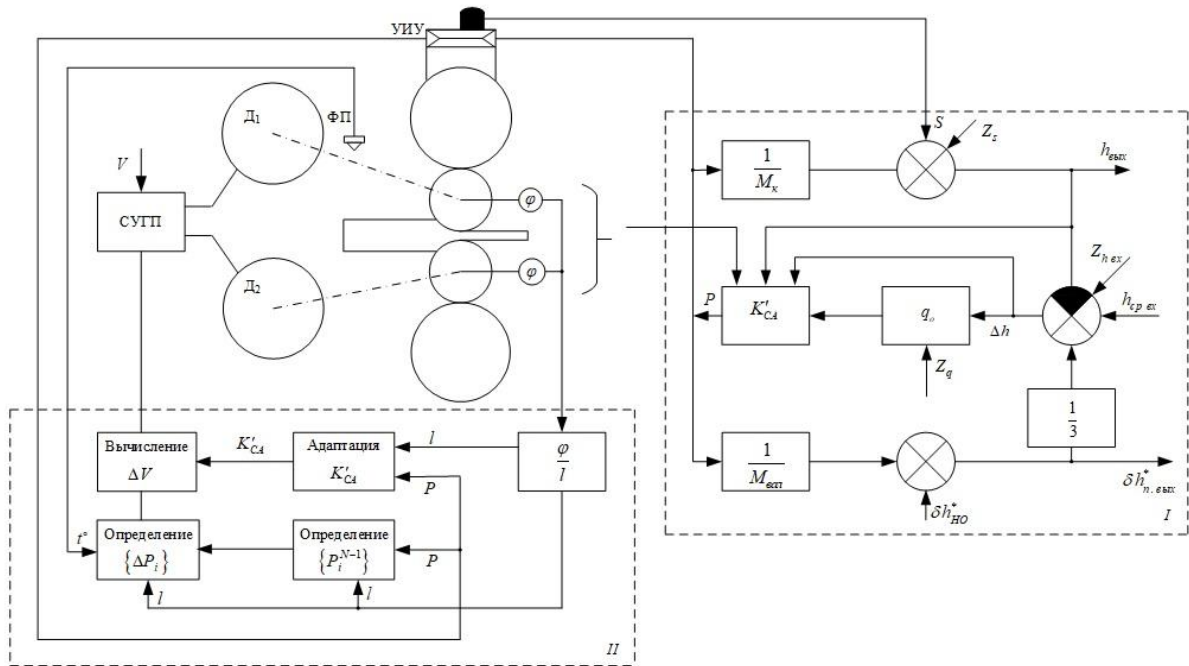


Рисунок 1 – Структурная схема регулирования разнотолщинности проката со скоростной асимметрией индивидуального привода: 1 – схема замещения очага деформации с СА, 2 – схема регулирования, $Z_q, Z_s, Z_{h_{ex}}$ – возмущения по жесткости полосы, раствору валков, входной толщине, СУГП – система управления главным приводом, УИУ – устройство измерения усилий прокатки, φ – датчики угла поворота, ФП – фотопирометр, D_1, D_2 – прокатные двигатели, φ/l – преобразователь угла поворота в координаты длины раската

Среднее обжатие в регулируемом пропуске:

$$\Delta h_{cp} = h_{cp}^{N-1} - h_{зад}, \quad (10)$$

где $h_{зад}$ – заданная толщина листа.

На основании расчетных данных N -го пропуски по модели пластической деформации прогнозируется среднее усилие прокатки в регулируемом пропуске $P_{cp.pac}^N$, определяются вытяжка λ в регулируемом пропуске и коэффициент β :

$$\lambda = \frac{h_{cp}}{h_{зад}}, \quad \beta = \frac{P_{cp.pac}^N}{P_{cp}^{N-1}}. \quad (11)$$

Затем вычисляется распределение усилия прокатки в регулируемом пропуске с привязкой по координате длины. Эти данные заносятся в память:

$$P_i^N = P_i^{N-1} \beta + \varphi(t_i), \quad l_i^N = l_i^{N-1} \lambda, \quad (12)$$

где $\varphi(t_i)$ – поправка, учитывающая «температурный клин».

Из множества P_i^N определяются наименьшее P_{min}^N и разность $\Delta P_i = P_i^N - P_{min}^N$.

Уставка $\frac{\Delta V}{V}$ вычисляется по формуле

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P_i (h_i^{N-1})^2}{P_i^N h_{зад} R} K_{CA}, \quad (13)$$

где R – радиус валков, $K_{CA} = \frac{q}{q_0}$ – коэффициент влияния СА на жесткость полосы q , q_0 – жесткость полосы при $\Delta V = 0$.

Коэффициент K_{CA} определяется экспериментально и автоматически уточняется в процессе прокатки после получения фактических значений параметров процесса и подстановки их в формулу (13).

Таким образом, в результате проделанных расчетов имеется массив данных: $\{l_i^N\}$ – координаты по длине от головы (хвоста) листа, $\{P_i^N\}$ – усилия прокатки при отсутствии СА, $\{\Delta P_i\}$ – прогнозируемые отклонения усилия прокатки от минимального значения, $\Delta V/V$ – значение уставок СА, требуемое для компенсации отклонений усилия прокатки. Рассчитанная уставка проверяется на ограничения и фиксируется в массиве управляющих воздействий.

Схема алгоритма функционирования системы управления скоростной асимметрией в регулируемом пропуске приведена на рис. 2.

Алгоритм начинает функционировать по инициативному сигналу, формируемому через определенный угол поворота валков. Далее производится опрос датчиков для корректировки коэффициента K_{CA} . Вычисление фактического значения K_{CA}^ϕ производится с использованием формулы (13):

$$K_{CA}^\phi = \frac{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_i^\phi P_i^\phi R h_i^\phi}{(P_i^N - P_i^\phi)(h_i^{N-1})^2}, \quad (14)$$

где индексом (ϕ) обозначены фактические значения координат.

Коэффициент передачи для последующих расчетов берется как среднее

$$K_{CA}^1 = \frac{K_{CA} + K_{CA}^\phi}{2}. \quad (15)$$

Затем определяется уставка, подаваемая в систему управления главным приводом. Для чего вычисляется координата выдачи уставки по длине полосы, которая должна быть отработана в координате l_i^N :

$$l_i = l_{i+1} - V\tau - \frac{dV}{dt}\tau^2, \quad (16)$$

где τ – время отработки системой управления главным приводом данной уставки.

Далее из массива данных выбирается значение $\Delta V/V_i$, определяется поправка на уставку

$$m = \frac{K_{CA}^1}{K_{CA}}, \quad (17)$$

где K_{CA} – коэффициент, при котором рассчитывается уставка.

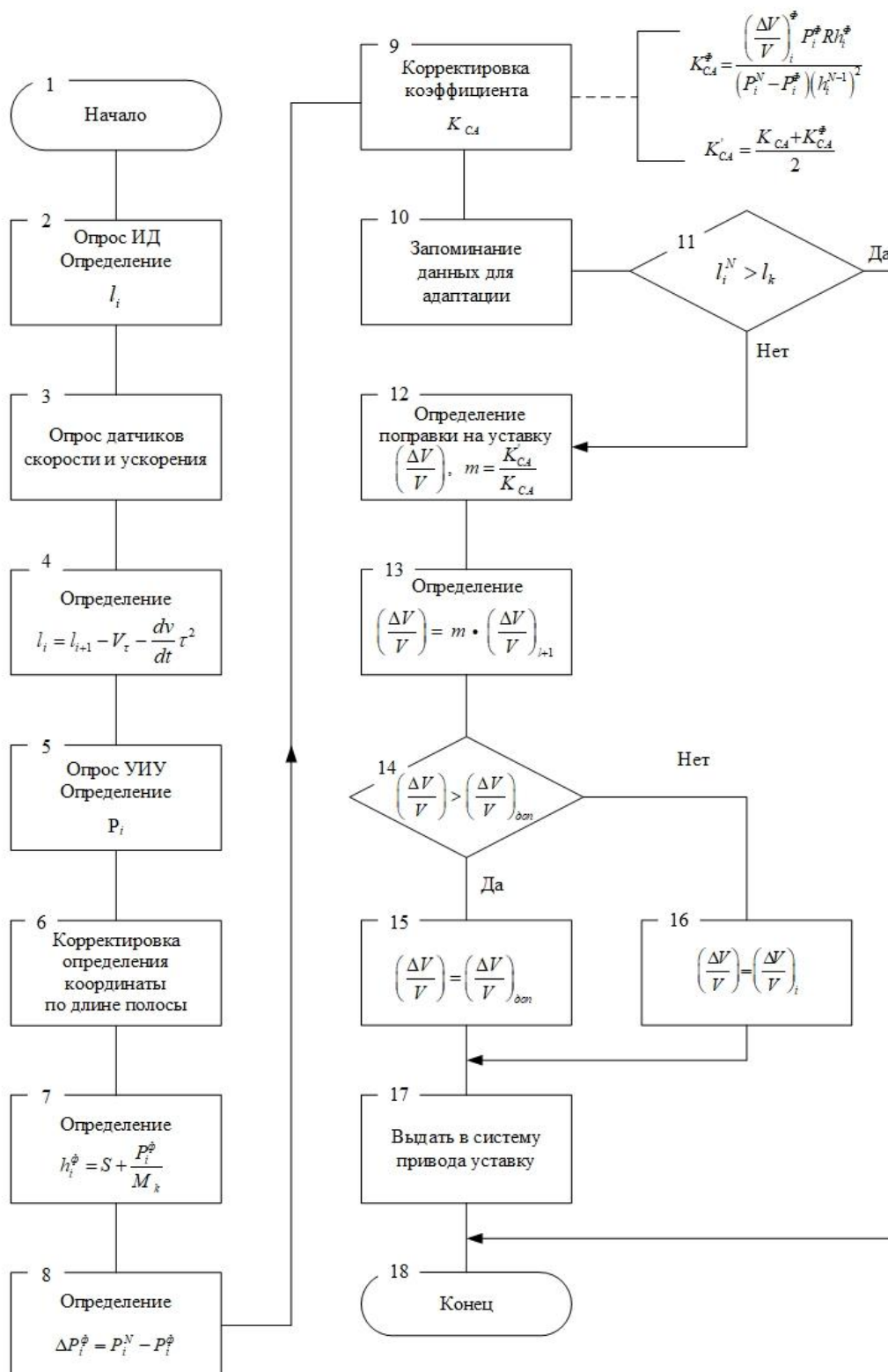


Рисунок 2 – Схема алгоритма функционирования системы управления скоростной асимметрии

Скорректированное значение

$$\frac{\Delta V}{V} = m \left(\frac{\Delta V}{V} \right)_{i+1} \quad (18)$$

выдается в систему управления главным приводом в момент прохождения сечения l_i .

Для расчета уставки используется зависимость

$$\left(\frac{\Delta V}{V} \right)_i = \frac{\Delta P_i (h_i^{N-2})^2}{P_i^N h_{3\text{ад}} R} K_{CA}. \quad (19)$$

Это оперативная корректировка коэффициента K_{CA} модели определения рассогласования. Кроме того, в алгоритме производится запоминание измерений и расчетов в пропуске и партии полос для последующей возможной адаптации моделей канала скоростной асимметрии.

Как указывалось выше, существуют ограничения при использовании эффекта скоростной асимметрии – энергосиловые, связанные с перераспределением момента прокатки между валками. Это ограничение учтено при разработке алгоритма автоматического управления рассогласованием скоростей, где осуществляется проверка по допустимому моменту на один валок. При этом следует отметить, что проведенные исследования и промышленная проверка системы управления позволяют сделать вывод о возможности применения рассогласования во всем диапазоне изменения соотношений между моментами, даже в случае, когда один из валков воспринимает двойной момент прокатки, а другой при этом работает в генераторном режиме. Это объясняется тем, что регулирование продольной разнотолщинности осуществляется в последних пропусках прокатки в чистовой клети, где момент прокатки значительно меньше допустимого, так как обжатие, а, следовательно, и длина дуги захвата имеют минимальные значения. Другое ограничение – технологическое, связанное с изгибом полосы. При автоматическом управлении с рассогласованием скоростей это ограничение также учтено в соответствующем алгоритме, для чего сигнал рассогласования скоростей подается после «захвата» металла с выдержкой времени, которая позволяет переднему концу полосы попасть на первый станинный ролик. Следует также отметить, что при прокатке на ТЛС 3600 в исследуемом интервале рассогласования скоростей в последних двух пропусках чистовой клети изгиба раската на нижний или на верхний валки, приводящего к нарушению технологического процесса, не наблюдалось.

3. Выводы

Рост требований потребителей листового проката к его качеству требует от производителей листового проката поиска новых технологий и воплощения их в производство. Одним из таких процессов является асимметричная прокатка (АП). Асимметричная прокатка позволяет понизить усилие прокатки и энергозатраты на процесс деформации, уменьшить продольную и поперечную разнотолщинность, улучшить плоскостность и форму полосы. Одним из наиболее управляемых и эффективных параметров АП является соотношение линейных скоростей рабочих валков, характеризуемое коэффициентом асимметрии. Применение скоростной асимметрии дает возможность регулировать рассогласование скоростей валков в широком диапазоне непосредственно в процессе прокатки, а также позволяет использовать системы автоматического управления.

Проведенные исследования и промышленная апробация позволяют сделать вывод об эффективности использования скоростной асимметрии для управления продольной разнотолщинностью листов на толстолистовых станах, а приведенные в статье зависимости целесообразно использовать в системах управления скоростной асимметрией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пименов А.Ф., Скороходов В.Н., Трайно А.И. [и др.]. Асимметричные процессы прокатки – анализ, способы и перспективы применения. *Сталь*. 1982. № 3. С. 53–56.
2. Синицын В.Т. Несимметричная прокатка листов и лент. М.: Metallurgiya, 1984. 167 с.
3. Горелик В.С., Будакова А.А., Гринчук П.С. Освоение прокатки толстых листов со скоростной асимметрией на стане 3600. *Сталь*. 1984. № 12. С. 31–33.
4. Ієвлєв М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
5. Ієвлєв М.Г., Грабовський Г.Г. Теоретичні та експериментальні дослідження математичних моделей площинності товстолистого прокату. *Науково-технічна інформація*. 2016. № 1 (67). С. 54–62.
6. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М.: Metallurgiya, 1980. 318 с.
7. Архангельский В.И., Грабовский Г.Г., Твардовский В.П. Управление геометрией проката. *Автоматизация конвертерного и прокатного производства*. К.: Институт автоматизи, 1987. С. 75–83.
8. Иванченко Ф.К., Красношапка В.А. Динамика металлургических машин. М.: Metallurgiya, 1983. 293 с.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2019