

*І. А. МАРИНИЧ, О. Ю. СЕРДЮК***МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ НАТЯГУ В ЧОРНОВІЙ ГРУПІ КЛІТЕЙ НЕПЕРЕРВНОГО СОРТОВОГО СТАНУ**

Предметом дослідження є особливості моделювання системи автоматичного керування режимом натягу чорнкової групи клітей, яка враховує зміни швидкості прокатки на виході попередньої кліті і вході в наступну кліть. Системи управління швидкісним режимом прокатки на сортових станах, є найбільш відповідальними системами, так як від їх роботи в більшій мірі залежить безаварійна робота прокатного стану. Під управлінням швидкісним режимом прокатки розуміють регулювання натягу в чорновій групі клітей і стабілізацію петлі прокату в чистових групах. Вплив таких технологічних факторів як нерівномірність нагріву заготовок, зміна режиму обтіску в клітях і т. п. призводить до виникнення сил натягу або підпора, відхилення петлі прокату від заданих значень. Прокатка з натягом на відміну від прокатки з петлею є стійким режимом прокатки. Однак, (при значних величинах натягу в прокаті) такий режим прокатки призводить до різної товщини готової продукції. Режим прокатки з петлею є нестійким режимом і не можливий без систем автоматичного керування. Як при режимі прокатки з натягом, так і при режимі вільної прокатки з петлею необхідно дослідження систем автоматичного керування з метою визначення можливостей компенсації збурюючих впливів і отримання прокату заданої точності. Тому основним завданням системи автоматичного керування є підтримання режиму прокатки з мінімально можливим натягом. Для досягнення поставленої мети безпосередній контроль натягу смуги прокату сучасними технічними засобами досить ускладнений, і робота систем керування натягом ґрунтується на непрямих методах його вимірювання, а дослідження ефективності роботи системи зводиться до моделювання самого процесу. Розроблена модель складається з трьох клітей та двох міжклітєвих проміжків, тому що вона враховує зміни швидкості прокатки на виході попередньої кліті і вході в наступну кліть. Саме завдяки цьому одержано адекватні результати моделювання наближенні до реального процесу прокатки.

Ключові слова: автоматизація, валки, кліть, міжклітєвий проміжок, моделювання, натяг петлі, прокатний стан, чорнова група.

*И. А. МАРИНИЧ, О. Ю. СЕРДЮК***МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМА НАТЯЖЕНИЯ В ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ НЕПРЯВНОГО СОРТОВОГО СТАНА**

Предметом исследования являются особенности моделирования системы автоматического управления режимом натяжения черновой группы клетей, которая учитывает изменения скорости прокатки на выходе предыдущей клетки и входе в следующую клетку. Системы управления скоростным режимом прокатки на сортовых станах, является наиболее ответственными системами, так как от их работы в большей степени зависит безаварийная работа прокатного стана. Под управлением скоростным режимом прокатки понимают регулирования натяжения в черновой группе клетей и стабилизации петли проката в чистовых группах. Влияние таких технологических факторов как неравномерность нагрева заготовок, изменение режима обжима в клетях и т. п. приводит к возникновению сил натяжения или подпора, отклонение петли проката от заданных значений. Прокатка с натяжением в отличие от прокатки с петлей является устойчивым режимом прокатки. Однако, (при значительных величинах натяжения в прокате) такой режим прокатки приводит к различной толщине готовой продукции. Режим прокатки с петлей является неустойчивым режимом и невозможен без систем автоматического управления. Как при режиме прокатки с натяжением, так и при режиме свободной прокатки с петлей необходимо исследование систем автоматического управления с целью определения возможностей компенсации возмущающих воздействий и получения проката заданной точности. Поэтому основной задачей системы автоматического управления является поддержание режима прокатки с минимально возможным натяжением. Для достижения поставленной цели непосредственный контроль натяжения полосы проката современными техническими средствами достаточно затруднен, и работа систем управления натяжением основывается на косвенных методах его измерения, а исследования эффективности работы системы сводится к моделированию самого процесса. Разработанная модель состоит из трех клетей и двух межклетевых промежутков, так как она учитывает изменения скорости прокатки на выходе предыдущей клетки и входе в следующую клетку. Именно благодаря этому получены адекватные результаты моделирования приближенные к реальному процессу прокатки.

Ключевые слова: автоматизация, валки, клеть, межклетевых промежутков, моделирование, натяжение петли, прокатный стан, черновая группа

*I. A. MARYNYCH, O. Y. SERDIUK***MODELING OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC REGULATION OF THE TENSION MODE IN THE ROUGHING GROUP OF STANDS OF A CONTINUOUS SECTION MILL**

The subject of the research is automatic control system modeling features for tensioning of stands roughing group, which takes into account changes in the rolling speed at exit of the previous stand and entrance to the next stand. Control systems for high-speed rolling on section mills are the most critical systems, since the trouble-free operation of rolling mill largely depends on their work. Rolling speed control is understood to mean tension regulation in the roughing group of stands and stabilization of the rolling loop in the finishing groups. The influence of such technological factors as uneven heating of blanks, change in the crimping mode in stands, etc. leads to the appearance of tension or back-up forces, deviation of rolled loop from the specified values. Tension rolling, in contrast to loop rolling, is a stable rolling mode. However, (at significant values of tension in the rolled products) such a rolling mode leads to different thicknesses of the finished product. The loop rolling mode is an unstable mode and is impossible without automatic control systems. Both in the tension rolling mode and in the free rolling mode with a loop, it is necessary to study automatic control systems in order to determine the possibilities of compensating for disturbing influences and obtaining rolled products of the given accuracy. Therefore, the main task of the automatic control system is to maintain the rolling mode with the lowest possible tension. To achieve this goal, direct control of the tension of the rolled strip with modern technical means is rather difficult, and the operation of tension control systems is based on indirect methods of measuring it, and the study of the system efficiency is reduced to modeling the process itself. The developed model consists of three stands and two inter-stand spaces, since it takes into account changes in rolling speed at the exit of previous stand and the entrance to the next stand. It is due to this that adequate simulation results are obtained that are close to the real rolling process.

Keywords: automation, rolls, stand, inter-stand spacing, modeling, loop tension, rolling mill, roughing group

Вступ. Сучасний розвиток сортопрокатного безперервних процесів, високими швидкостями виробництва характеризується впровадженням прокатки і зростанням вимог до точності готової

продукції. Завдання підвищення точності прокату можуть бути вирішені як за рахунок поліпшення технологій прокатки, так і при автоматизації технологічних процесів. Успішна розробка і впровадження систем керування технологічними процесами з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки може бути здійснена тільки на базі якісного інформаційного забезпечення. Отримання різноманітної інформації про процес, аналіз її за допомогою ЕОМ дає можливість синтезувати ефективні алгоритми управління прокатним станом.

Системи керування швидкісним режимом прокатки на сортових станах, є найбільш відповідальними системами, так як від їх роботи в більшій мірі залежить безаварійна робота стану. Під керуванням швидкісним режимом прокатки розуміють регулювання натягу в чорновій групі клітей і стабілізацію петлі прокату в чистових групах. Вплив таких технологічних факторів як нерівномірність нагріву заготовок, зміна режиму обтиску в клітях і т. п. призводить до виникнення сил натягу або підпору, відхилення петлі прокату від заданих значень. Основним завданням системи автоматичного керування є підтримання режиму прокатки з мінімально можливим натягом. Безпосередній контроль натягу смуги сучасними технічними засобами здійснити важко, тому робота системи автоматичного керування режиму натягу ґрунтується на непрямих методах та моделюванні [1].

Моделювання такої системи найкраще проводити у пакеті у пакеті Simulink, що входить до складу пакету MATLAB.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розміри по ширині залежать головним чином від величини розширення металу при прокатці, на процес розкату якого визначальний вплив мають міжклітві зусилля. Тому, не випадково, на сортових станах засоби вимірювання і управління міжклітвіми зусиллями займають важливе місце в заходах спрямованих на підвищення точності виробленого прокату. Одним з основних режимів, що виключає виникнення натягу між клітями дрібносортових станів, є прокатка з петлями в міжклітвих проміжках. Існує велика різноманітність конструкцій перетворювачів, основним призначенням яких є утворення і стабілізація заданої величини петлі

У роботах [2–4] розглянуті варіанти існуючих систем автоматичного регулювання натягу у чорнових та чистових групах клітей, а також система стабілізації натягу зі статичним петлетримачем і датчиком натягу. Але налаштування цих систем ґрунтується на непрямих методах вимірювання натягу петлі, а наприклад у роботі [3] у якості опорної кліті береться середня кліть безперервної групи (наприклад, для групи з семи клітей опорною є четверта). Тому аналіз ефективності роботи тієї або іншої системи все одно зводиться до моделювання процесу.

Метою цієї статті є побудова моделі, яка буде складатися з трьох клітей та двох міжклітвих проміжків для одержання адекватних результатів

моделювання наближених до реального процесу прокатки. Сформована таким чином модель надає різні можливості для аналізу роботи системи керування режимом натягу, а саме регулювання довжини петлі прокату, можливість зміни натягу в міжвалкових відстанях і стабілізацію геометричних розмірів перерізу прокату.

Методика оцінки міжклітвого натягу. Стабільність технологічного процесу прокатки в більшій мірі залежить від напруженого стану металу між валками суміжних клітей.

З цієї точки зору будемо розрізняти три швидкісних режими прокатки:

- режим вільної прокатки;
- режим натягу;
- режим стиснення (підпору).

Той чи інший режим прокатки встановлюється при певному співвідношенні швидкостей металу, а відповідно і частот обертання двигунів валків.

Для процесу прокатки на безперервних дрібносортових станах в чорновій групі можливий режим прокатки з натягом і з підпором прокату. У проміжній і чистовій групах клітей характерний режим вільної прокатки.

У перших клітях чорнової групи сучасних сортових станів, через великі коливання розмірів перетину заготовок пов'язаних із зачищенням їх поверхні має місце порушення сталості секундних обсягів, що призводить до значних змін міжклітвих зусиль. У свою чергу, зміна поздовжніх зусиль в перших клітях через випередження металу призводить до порушення налаштувань швидкісного режиму всього стану [5]. Тому важливість безпосереднього регулювання міжклітвих зусиль в перших клітях чорнової групи очевидна. В інших же міжклітвих проміжках немає необхідності контролювати зусилля на всій довжині розкату, так як в протилежному випадку необхідна кількість технічних засобів значно зростає і проблеми, пов'язані з обслуговуванням, виступають на передній план.

Зменшення коливань розмірів заготовок за останньою чорною кліттю здійснюється шляхом стабілізації витяжки в першій кліті чистової групи, для чого проводиться коригування міжклітвих зусиль в останніх проміжках чорнової групи [3]. Величину витяжки прокату, що характеризує її коефіцієнт можна отримати, визначаючи площу поперечного перерізу заготовки до і після обтиску в прокатній кліті. Однак, в даний час через технічні складності цей метод неможливий. Розглянемо роботу пристрою непрямого визначення коефіцієнта витяжки, робота якого полягає в наступному.

Приріст довжини петлі розкату визначається наступною залежністю [7]:

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

де Δl_i – приріст довжини петлі розкату;
 $V_{1,i}$ – швидкість розкату на виході з i -ї кліті;

$V_{0,i+1}$ – швидкість розкату на вході у $(i+1)$ -ту кліть.

Виразивши швидкість розкату через частоту обертання приводів, робочі радіуси і випередження отримаємо [7]:

$$\Delta l_i = \frac{R_i(1+S_i)}{\eta_i} \int_0^t \omega_i dt - \frac{R_{i+1}(1+S_{i+1})}{\eta_{i+1}\mu_{i+1}} \int_0^t \omega_{i+1} dt, \quad (2)$$

де R_i, R_{i+1} – робочий радіус i -ї і $(i+1)$ -ї клітей;

S_i, S_{i+1} – випередження i -ї і $(i+1)$ -ї клітей;

ω_i, ω_{i+1} – частота обертання приводів i -ї і $(i+1)$ -ї клітей;

η_i, η_{i+1} – коефіцієнт передачі редуктору i -ї і $(i+1)$ -ї клітей;

μ_{i+1} – коефіцієнт подовження розкату у $(i+1)$ -й кліті.

Розглянутий метод передбачає однаковість випереджень в i -й і $(i+1)$ -й клітях. Більш точно можна визначити величину витяжки в першій по ходу прокатки кліті, у якій в суміжних міжклітєвих проміжках прокатка ведеться з петлеутворювачем.

У міру наростання натягу швидкість виходу металу V_1 з валків попередньої кліті 1 буде зростати, прагнучи до величини швидкості $V_{0,2}$ входу металу у валки подальшої кліті 2, яка зменшується при збільшенні заданого натягу [8].

Крім ефекту зміни швидкості прокатки на виході кліті 1 і входу в кліть 2 за рахунок пружного подовження прокату натяг впливає також на зміну випередження прокату і його відставання.

Математичний опис відноситься до випадку прокатки прямокутної смуги в циліндричних валках. Тому обчислення і інші геометричні параметри рекомендується розраховувати за методом наведеної смуги.

В умовах прокатки в калібрах звичайні показники деформації стають змінними по ширині калібру. Для розрахунку розширення і середньої витяжки виникає необхідність у визначенні середнього абсолютного і відносного обтиску в калібрах. На практиці використовується поняття наведеної прямокутної смуги, тобто профіль прямокутного поперечного перерізу ширина якого дорівнює ширині заготовки [9].

Блок-схема двох суміжних міжклітєвих проміжків контурів регулювання петлі наведена на рис. 1.

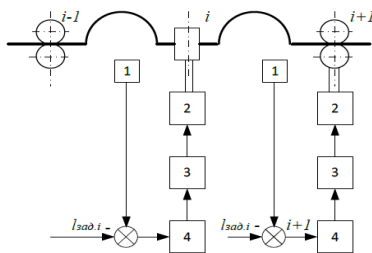


Рис. 1. Блок-схема контурів системи стабілізації петлі у двох проміжках: 1 – давач петлі; 2 – двигун прокатної кліті;

3 – система регулювання швидкості двигуна прокатних валків; 4 – регулятор петлі

На рис. 2 наведено структурну схему, яка відповідає блок-схемі наведеній на рис. 1. Пробні впливи подаються в ланцюг завдання приводу i -ї кліті. Це викликає зміну довжини петлі металу в обох прилеглих міжклітєвих проміжках.

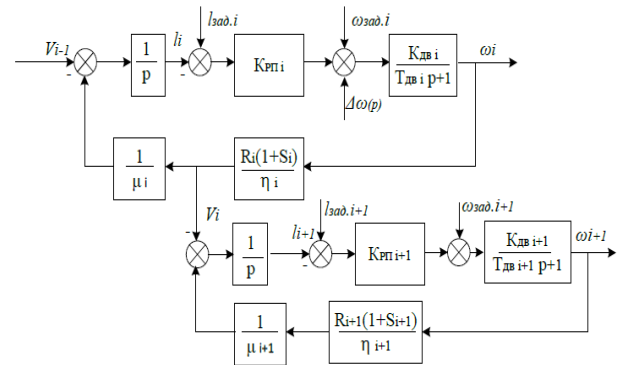


Рис. 2. Структурна схема контурів системи стабілізації петлі у двох проміжках

Суттєвим є те, що величина виділених змінних складових залежить від параметрів прокатки тільки в даній кліті i , таким чином, вплив змін швидкості металу при виході з попередньої і входу в наступну кліть на точність вимірювання витяжки усувається.

Витяжка визначається як відношення змінних складових довжини петлі, взята за абсолютною величиною [5]:

$$\mu_{i+1} = \left| \frac{\Delta l_{i+1}}{\Delta l_i} \right|. \quad (3)$$

Таким чином, зміна величини петлі в проміжках чистової групи пов'язана з нерівномірністю геометричних параметрів, що викликаються застосуванням натягу при прокатці в чорнових групах клітей. При регулюванні довжини петлі вихідний сигнал регулятора петлі може побічно служити показником якості налаштувань режиму натягу в міжклітєвих проміжках. Регулюючи довжину петлі зміною натягу прокату в міжвалкових проміжках можна тим самим стабілізувати і геометричні розміри перерізу прокату.

Моделювання режиму натягу. При моделюванні режиму натягу необхідно враховувати зміни швидкості прокатки на виході попередньої кліті і входу в наступну кліть, за рахунок пружного подовження прокату і його відставання [6]. Якщо натяг прокату в міжклітєвому проміжку збільшується, наприклад, через підвищення швидкості обертання валків, наступної кліті, то одночасно з цим зростає відставання металу в цій кліті, а також зростає випередження в валках попередньої кліті. Збільшення випередження призведе до зростання швидкості прокату на виході з попередньої кліті, а збільшення відставання – до зменшення швидкості прокату на вході в наступну кліть. Внаслідок цього дійсне збільшення натягу відбудеться в меншій мірі,

ніж це б мало місце при незмінній величині випередження і відставання. Таким чином, випередження сприяє самовирівнюванню натягу.

Модель прокатної кліті (рис. 3) виконана за відповідними математичними залежностями і включає в себе блоки розрахунку випередження з урахуванням натягу, розрахунку швидкості прокату на вході і виході в кліть, моменту прокатки при прокатці з натягом і розширенням.

- Вхід 1 – частота обертання валків i -ї кліті;
- Вхід 2 – задній натяг смуги i -ї кліті;
- Вхід 3 – передній натяг смуги i -ї кліті;
- Вихід 1 – швидкість смуги на виході з i -ї кліті;
- Вихід 2 – швидкість смуги на вході в i -ту кліть;
- Вихід 3 – момент прокатки i -ї кліті;
- Вихід 4 – ширина смуги на виході з i -ї кліті.

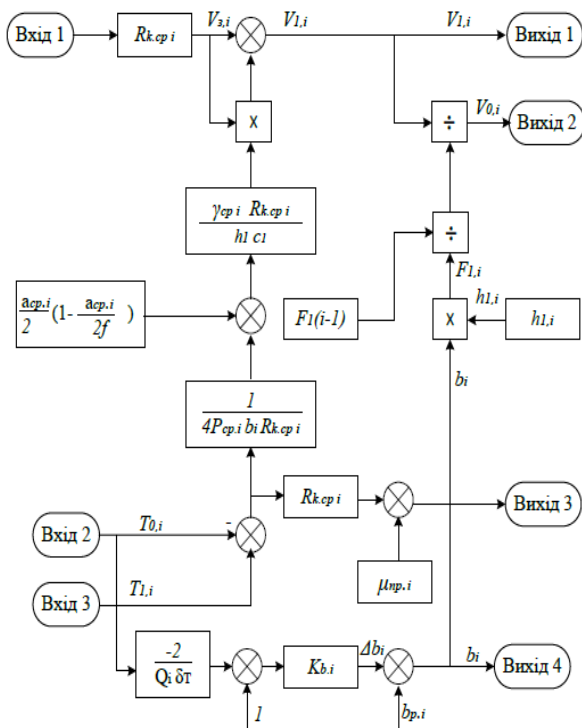


Рис. 3. Модель прокатної кліті

Моделювання проводилось у пакеті Simulink, що входить до складу пакету MATLAB [12]. У зв'язку з тим, що постійні часу зміни натягу склали приблизно 0,02 с і модель досить складна введений масштабуючий коефіцієнт постійних часу. Також були прийняті спрощення умов прокатки, для отримання більш прийнятних залежностей.

Кліть і міжклітєвий проміжок для дослідження перехідних процесів представлені в абсолютних одиницях. Тому в місцях стикування структурних схем в відносних і абсолютних одиницях необхідні коефіцієнти переведення відносної частоти обертання валу двигуна в абсолютне значення і абсолютне значення моменту двигуна в статичний струм якоря [10].

Для числових розрахунків при моделюванні системи керування натягом прокату прийнята система

витажних калібрів овал – квадрат. Така система калібрів застосовується на сортових станах для послідовного зменшення площі поперечного перерізу заготовки. Основні параметри першого, другого та третього квадратних і овальних калібрів неперервного сортового стану, що визначають геометричні розміри прокату [11] були використані при побудові моделі.

Так як модель вийшла досить громіздка, то вона була реалізована за допомогою блоків Subsystem. Так наприклад на рис. 4. наведено зображення моделі кліті №3, а на рис. 5 її повне зображення.

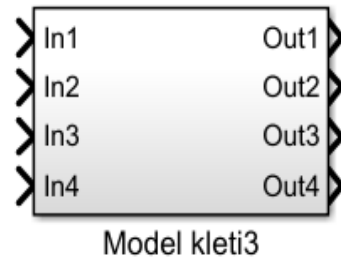


Рис. 4. Блок Subsystem кліті №3

Для отримання адекватних результатів, модель повинна містити два міжклітєвих проміжки і відповідно три кліті, а також блоки розрахунку випередження з урахуванням натягу, розрахунку швидкості прокату на вході і виході в кліть, моменту прокатки при прокатці з натягом і розширенням.

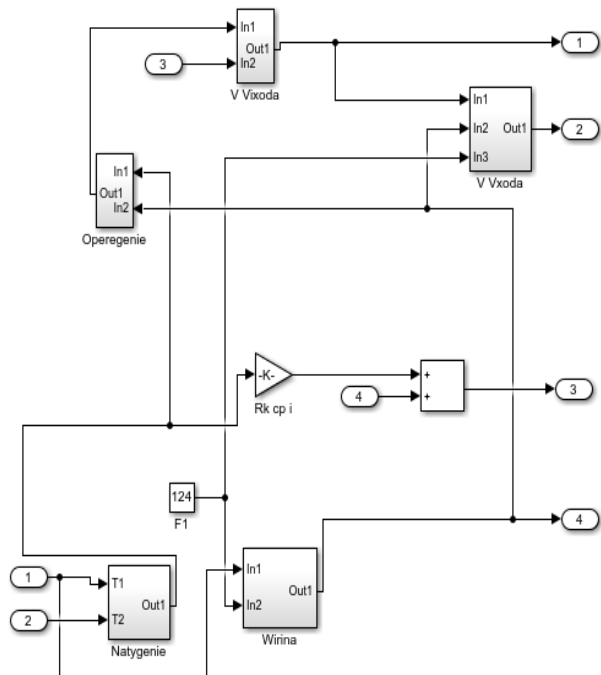


Рис. 5. Модель кліті № 3

На рис. 6 наведену повну модель системи, яка складається з трьох клітей та двох міжклітєвих проміжків. Вона включає в себе блоки розрахунку випередження з урахуванням натягу, розрахунку швидкості прокату на вході і виході в кліть, моменту прокатки при прокатці з натягом і розширенням.

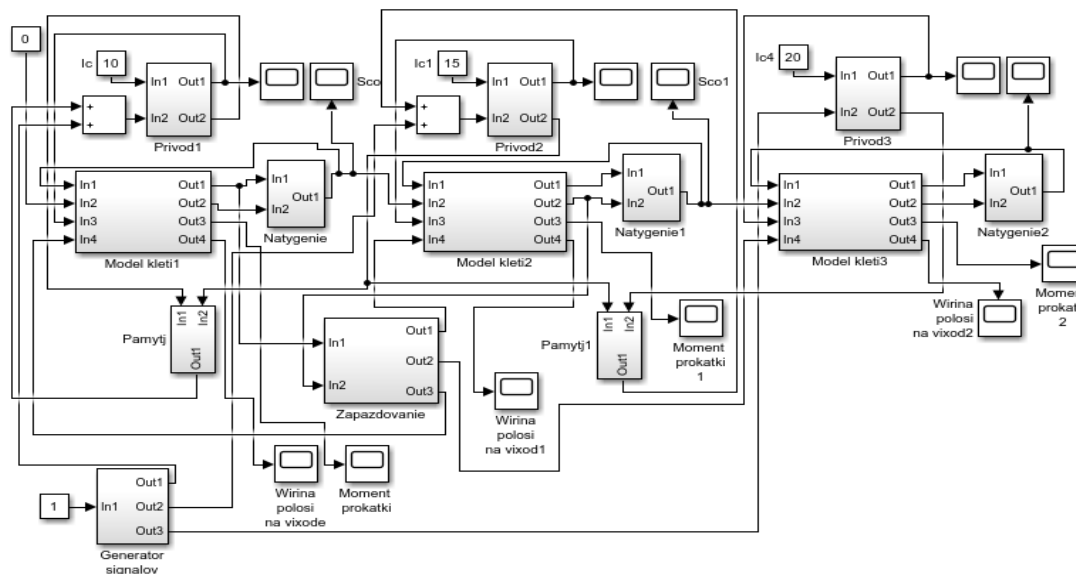


Рис. 6. Повна модель системи

При дослідженні системи моделювалося два можливих проміжки і відповідно три кліті.

У зв'язку з тим, що постійні часу зміни натягу склали приблизно 0,02 с. і модель досить складна введений масштабуючий коефіцієнт постійних часу, наведений графік показує роботу привода при установці початкових зазорів і захоплення металу валками без натягу. Так як регулятор швидкості виконується у вигляді пропорційної ланки спостерігається невелика просадка частоти обертання (див. рис. 7).

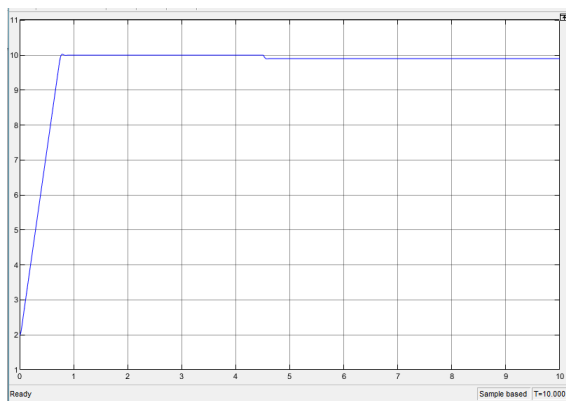


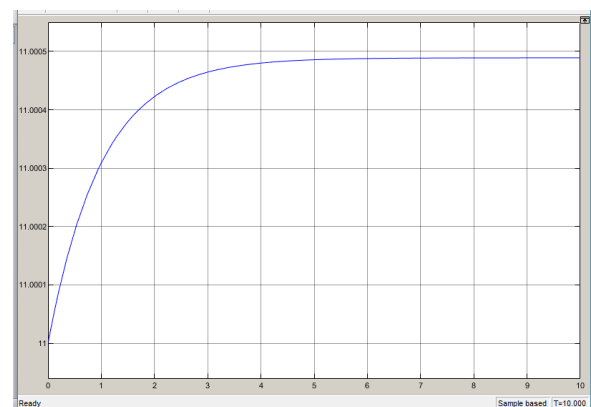
Рис. 7. Графік перехідного процесу по швидкості без натягу

Наведені струмові діаграми на ділянках установки початкових зазорів, захоплення металу. Так як встановлено режим близький до вільної прокатки, то при захопленні металу валками струми двигунів 1, 2 і 3 практично не змінювалися. При встановленому режимі близькому до вільної прокатки зміна завдання швидкості другого привода проводилася за допомогою генератора гармонійних сигналів.

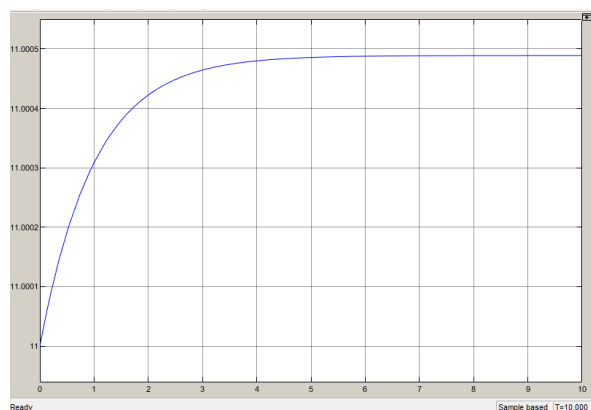
При таких пробних впливах розширення прокатки в другій кліті (рис. 8, б) змінилося на 0,03 мм., що цілком допустимо в умовах реальної прокатки.

При захопленні валками прокату при заповненні чорнової групи клітей, по перепаду струмів якірного

ланцюга двигуна оцінюється настройка швидкісного режиму прокатки. В разі невірному встановлення початкових частот обертання валків клітей швидкісний режим прокатки коригується.



а



б

Рис. 8. Перехідний процес, що характеризує розширення смуги прокату: а – на виході першої кліті, б – на виході другої кліті

Режим натягу прокату позначається на зміні витяжки прокату по його довжині. Тому більш точна оцінка якості налаштувань швидкісного режиму прокатки визначається за непрямыми оцінками при зміні величини петлі прокату за чорною групою. Неточності налаштувань компенсуються зміною режиму натягу в останньому міжклітовому проміжку чорнової групи. Вплив регулятора натягу на частоту обертання головних приводів здійснюється через систему цифрового завдання і узгодження частот обертання головних приводів.

На рис. 9 зображені струмові діаграми при прокатці з натягом. Після захоплення металу валками другою кліттю в міжклітовому проміжку 1–2 створюється натяг.

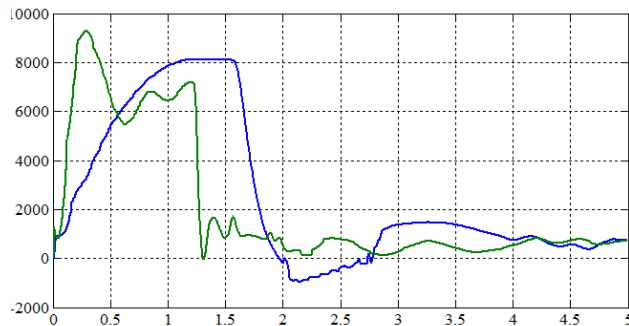


Рис. 9. Перехідні процеси за струмом в двох міжклітових проміжках

Такий натяг призводить до зміни розширення прокату $\Delta b_2 = 0,13$ мм. значення струму якоря приводу в першій клітці впало навіть до нульової позначки, а струм якоря приводу першої клітці зріс до значення рівного $2I_{H2}$.

На рис. 10 наведена діаграма зміни частоти обертання головних приводів при реальній прокатці на стані з питомим натягом $q_{12} = 4,84$ Н/м².

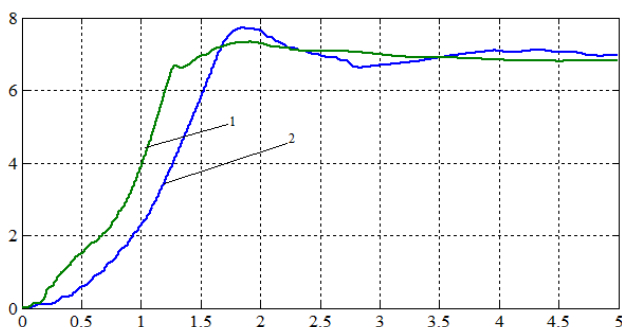


Рис. 10. Перехідні процеси за швидкістю в двох міжклітових проміжках

Видно, що після захоплення металу валками, частота обертання двигуна першої клітці дещо зросла, за рахунок створення натягу прокату, а другої впала $\Delta\omega_1 = 0,15\%$, $\Delta\omega_2 = 0,151\%$.

При захопленні металу валками клітці 2 запам'ятовується струм двигуна клітці 1 і після цього визначається зміна струму в клітці 1. Якщо значення струму зменшилася, що говорить про режим натягу, то регулятор натягу впливає на завдання швидкості клітці

1 до тих пір поки поточне значення струму не стане рівним заданому.

На рис. 11 представлені графік зміни частот обертання клітей 1, 2 і 3 та зміна швидкості у двох міжклітових проміжках з натягом.

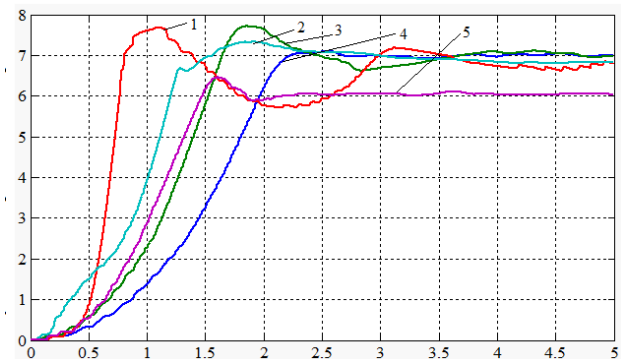


Рис. 11. Графіки перехідних процесів для кутової швидкості робочих валків клітей (1–3) та двох міжклітових проміжках (4–5)

Спостерігаються ділянки просадки швидкості після захоплення металу валками першої клітці, заповнення міжклітового проміжку регулювання від значення $\omega_1 = 6$ рад/с до $\omega_1' = 6,8$ рад/с, що забезпечує режим близький до вільної прокатки.

Висновки. Математичний опис процесу прокатки у чорновій групі клітей, який ліг в основу побудови моделі прокатної клітці, що включає в себе блоки розрахунку випередження з урахуванням натягу, розрахунку швидкості прокату на вході і виході в кліть, моменту прокатки при прокатці з натягом і розширенням, підтвердив вірність розрахунків. Моделювання проводилося для двох міжклітових проміжків і відповідно трьох клітей. Для спрощення системи було враховано тип калібрів квадрат, так як вони значно легші для моделювання.

Аналіз результатів моделювання створеної системи, а саме зміни швидкостей та струмів приводів трьох клітей та двох міжклітових проміжків, показав що розроблена система автоматичного керування натягом чорнової групи клітей повною мірою є працездатною й задовольняє заданим вимогам.

Список літератури

1. Маринич І. А., Сердюк О. Ю., Грам О. О., Романов С. О. Особливості моделювання режиму натягу чорнової групи клітей неперервного сортового стану. *Розвиток промисловості та суспільства. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції (17–20 листопада 2020р., Кривий Ріг)*. Кривий Ріг: КНУ, 2020. С. 259.
2. Солод В. С., Бенетский А. Г., Мамаев А. Н. Моделирование процесса сортовой прокатки с помощью программного комплекса «СОПТ-ПРО». *Обработка материалов давлением*. 2010. № 3 (24). С. 60–63.
3. Карандаев А. С., Храпшин В. Р., Андрияшин И. Ю., Головин В. В. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки. *Известия вузов. Электромеханика*. 2009. № 1. С. 12–20.
4. Егоров А. П., Егоров В. С., Ханин М. И., Зворыкин В. Б. Моделирование системы управления толщиной полосы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки: учебное пособие. Днепропетровск: ИПК МК, 2000. 125 с.

5. Восканьянц А. А. Автоматизированное управление процессами прокатки: учебное пособие. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 85 с.
6. Учитель А.Д., Ткаченко Г. И., Хижняк В. Я., Мохнатый А. В. *Средства и системы автоматизации в горно-металлургическом комплексе*. Киев: ВПК «Экспрес-Поліграф», 2013. 184 с.
7. Грудев А. П., Машкин А. Ф., Ханин М. И. *Технология прокатного производства*. Москва: Металлургия, 1994. 651 с.
8. Бабенко М. А., Коротченко В. М., Носиков В. Л. Измерение скорости вращения валков прокатных клетей на основе микропроцессорной техники. *Металлургия и горнорудная промышленность*. 2002. №1. С. 43–45.
9. Бабенко М. А., Коротченко В. М., Носиков В. Л. Микропроцессорный датчик наличия металла в валках прокатной клетки. *Металлургия и горнорудная промышленность*. 2003. №1. С. 49–53.
10. Шохин В. В., Андреев А. И., Морковина П. С. Моделирование прокатного стана с использованием физических и математических моделей. *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №2(35). С.13–18.
11. Шохин В. В., Пермякова О. В., Короткова Е. В. Моделирование взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода прокатного стана. *Международ. сб. науч. трудов. Вып. 21. Магнитогорск: гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*, 2013. С. 70–75.
12. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems, Simulink. Москва: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
- широкopolосного стана гoryachej prokatki [Mathematical modeling of interconnected electromechanical systems of inter-stand spacing of wide-strip hot rolling mill]. *Izvestiya vuzov. E'lektromekhanika*. 2009, no. 1, pp. 12–20.
4. Egorov A. P., Egorov V. S., Khanin M. I., Zvory'kin V. B. *Modelirovanie sistemy upravleniya tolshhinoj polosy nepreryvnogo shirokopolosnogo stana goryachej prokatki: uchebnoe posobie* [Modeling of strip thickness control system for continuous broadband hot rolling mill: Study guide]. Dnepropetrovsk: IPK MK Publ., 2000. 125 p.
5. Voskan'yanc A. A. *Avtomatizirovanное upravlenie processami prokatki: uchebnoe posobie* [Automated control of rolling processes: Study guide]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2010. 85 p.
6. Uchitel' A.D., Tkachenko G. I., Khizhnyak V. Ya., Mokhnaty'j A. V. *Sredstva i sistemy avtomatizacii v gorno-metallurgicheskom komplekse* [Automation tools and systems in mining and metallurgical complex]. Kiev: VPK «Ekspres-Poli'graf» Publ., 2013. 184 p.
7. Grudev A. P., Mashkin A. F., Khanin M. I. *Tekhnologiya prokatnogo proizvodstva* [Rolling production technology]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1994. 651p.
8. Babenko M. A., Korotchenkov V. M., Nosikov V. L. *Izmerenie skorosti vrasheniya valkov prokatny'kh kletej na osnove mikroprocessornoj tekhniki* [Measurement of rotation speed of rolling stands rolls based on microprocessor technology]. *Metallurgiya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2002, no. 1, pp. 43–45.
9. Babenko M. A., Korotchenkov V. M., Nosikov V. L. *Mikroprocessorny'j datchik nalichiya metall v valkakh prokatnoj kleti* [Microprocessor-based sensor for presence of metal in rolling stand rolls]. *Metallurgiya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2003, no. 1, pp. 49–53.
10. Shokhin V. V., Andreev A. I., Morkovina P. S. *Modelirovanie prokatnogo stana s ispol'zovaniem fizicheskikh i matematicheskikh modelej* [Rolling mill simulation using physical and mathematical models]. *E'lektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2017, no. 2(35), pp.13–18.
11. Shokhin V. V., Permyakova O. V., Korotkova E. V. *Modelirovanie vzaimosvyazannogo chastotno-reguliruemogo e'lektroprivoda prokatnogo stana* [Simulation of interconnected variable frequency drive of rolling mill]. *Mezhdunar. sb. nauch. trudov. Vip. 21* [Int. collection of scientific. works Vol. 21]. Magnitogorsk: gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova Publ., 2013, pp. 70–75.
12. Cherny'kh I. V. *Modelirovanie e'lektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems, Simulink* [Simulation of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems, Simulink]. Moscow: DMK Press Publ., 2008. 288 p.

References (transliterated)

1. Marinich I. A., Serdyuk O. Yu., Gram O. O., Romanov S. O. *Osoblivosti modelyuvannya rezhimu natyagu chornovoyi grupi kli'tej neperevno sortovogo stanu* [Features of modeling tension mode of rough group of stands of continuous varietal condition]. *Rozvitok promislivosti ta suspi'l'stva. Tezy dopovidey mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (17-20 listopada 2020r., Kriviy Ri'g)* [Development of industry and society. Abstracts of reports of the international scientific and technical conference (November 17-20, 2020, Kryvyi Rih)]. Kryvyi Rih: KNU Publ., 2020. p. 259.
2. Solod V. S., Beneczkij A. G., Mamaev A. N. *Modelirovanie processa sortovoy prokatki s pomoshh'yu programmno kompleksa «SORT-PRO»* [Modeling section rolling process using the "SORT-PRO" software package]. *Obrabotka materialov davleniem*, 2010, no. 3 (24), pp. 60–63.
3. Karandaev A. S., Khramshin V. R., Andryushin I. Yu., Golovin V. V. *Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvyazanny'kh e'lektromekhanicheskikh sistem mezhkletevogo promezhutka*

Надійшла 15.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Маринич Іван Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Криворізький національний університет, доцент кафедри Автоматизації, комп'ютерних наук і технологій; м. Кривий Ріг, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9036-8532>; e-mail: marynych@knu.edu.ua

Сердюк Ольга Юрійвна – кандидат технічних наук, Криворізький національний університет, старший викладач кафедри Автоматизації, комп'ютерних наук і технологій; м. Кривий Ріг, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0505-0800>; e-mail: olgajs28@knu.edu.ua

Маринич Иван Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Криворожский национальный университет, доцент кафедры Автоматизации, компьютерных наук и технологий; г. Кривой Рог, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9036-8532>; e-mail: marynych@knu.edu.ua

Сердюк Ольга Юрьевна – кандидат технических наук, Криворожский национальный университет, старший преподаватель кафедры Автоматизации, компьютерных наук и технологий; г. Кривой Рог, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0505-0800>; e-mail: olgajs28@knu.edu.ua

Marynych Ivan Anatolyevich – candidate of technical sciences, docent, Kryvyi Rih National University, Associate Professor of the Department of Automation, Computer Science and Technology; Kryvyi Rih, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9036-8532>; e-mail: marynych@knu.edu.ua

Serdiuk Olga Yuriyuna – candidate of technical sciences, Kryvyi Rih National University, Senior Lecturer of the Department of Automation, Computer Science and Technology; Kryvyi Rih, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0505-0800>; e-mail: olgajs28@knu.edu.ua