УДК 621.31:62-83:004.9

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ СТАНА ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ НА ОСНОВІ БАЗИ ДАНИХ ЙОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

НАЗАРОВА О.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна , e - mail : nazarova16@gmail.com;

ВАСИЛЬЄВ Б.В. магістр кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e - mail : vasbohdan@gmail.com;

ШОКУРОВ Д.Р. студент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна , e - mail : danilshokurov03@gmail.com.

Мета роботи. *Удосконалити систему діагностики стана холодної прокатки на основі бази даних його електромеханічних процесів, шляхом розробки нечіткої системи прийняття рішення про стан електоприводів прокатного стана, що підвищить ефективність існуючої системи діагностики.*

Методи дослідження. *Математичне та комп'ютерне моделювання.*

Отримані результати. *Розроблено нечітку систему прийняття рішень про стан двох взаємопов'язаних електроприводів розмотувального механізму та прокатної кліті для дослідження та попередження передаварійного стану, пов'язаного з обривом смуги металу, що прокатується. Вказана система прийняття рішень побудована на основі бази даних електромеханічних процесів електроприводів дресирувального одноклітьового стана холодної прокатки цеху холодної прокатки №1 ПАТ «Запоріжсталь». На вході цієї системи задано напругу якірного кола двигуна розмотувального механізма, струм якірного кола двигуна розмотувального механізма, натяг смуги металу, що прокатується, на ділянці між розмотувачем та прокатною кліттю. На виході отримано загальний стан системи, який залежить від значень вхідних даних. Отримання вимірювальної інформації про параметри діагностування здійснено на основі даних давачів стуму та напруги, які встановлені на промисловому обладнанні. Інформацію про значення сили натягу смуги металу, що прокатується можна отримати як шляхом встановлення додаткових вимірювальних пристроїв, так і непрямим шляхом, використовуючи математичні моделі поточного радіусу рулона та лінійної швидкості смуги металу, що прокатується.*

Наукова новизна. *Удосконалено систему діагностики стана холодної прокатки шляхом введення до її складу нечіткої системи прийняття рішення на основі бази даних про електромеханічні процеси електроприводів розмотувального механізма і кліті, що дозволить попередити аварійний стан, обумовлений обривом смуги металу, що прокатується.*

Практична цінність. *Попередження обриву смуги металу, що прокатується на основі удосконаленої системи діагностики стана холодної прокатки, що використовує інформацію бази даних його електромеханічних процесів з метою підвищення ефективності процесу керування якістю продукції. Використовуючи повну упорядковану інформацію та досвід експлуатації стана холодної прокатки можна формувати технічні та технологічні рішення щодо модернізації діючого та розробки нового технологічного обладнання та систем автоматичного керування електроприводами прокатних станів.*

Ключові слова: діагностика; база даних; електромеханічні процеси; стан холодної прокатки; нечітка логіка; перехідний процес; моделювання.

I. ВСТУП

Діагностика обладнання складних технологічних установок – запорука їх безпечної та ефективної експлуатації. Метою створення систем діагностики є вчасне запобігання можливих відмов і порушень у роботі систем і устаткування; необхідність мати повну і цілісну картину фактичного технічного стану експлуатованих систем і устаткування; прогнозування з великою точністю залишкового ресурсу працездатності обладнання; мінімізація вартості та підвищення ефективності робіт із моніторингу технічного стану, технічного обслуговування, ремонту та управління ресурсними характеристиками систем і устаткування; безперервне вдосконалення, базуючись на об'єктивних даних експлуатації, фактичних характеристик безпеки, надійності та експлуатаційної готовності [1].

В даний час застосування мікропроцесорної техніки посприяло «інтелектуалізації» промислового обладнання. Яскравий приклад тому — електричні приводи, що представляють собою системи, здатні до,

© Назарова О.С., Васильєв Б.В., Шокуров Д.Р., 2023
DOI 10.15588/1607-6761-2023-1-1

самоналаштування і адаптації. Подібні системи набувають все більшого поширення в якості приводної техніки для високопродуктивних ліній.

Автоматизована система діагностики електромеханічних процесів прокатних станів [2] є специфічною системою від якості роботи якої, залежить ефективність технологічних процесів та якість прокатної продукції. Будь-який збій в роботі датчиків чи програмного забезпечення може призвести до аварійного режиму та простою обладнання [3]. Через те потрібно правильно спроєктувати систему, якісно підібрати та встановити датчики, правильно виконати налагодження пристроїв моніторингу та діагностики, що є актуальною науковою задачею та має практичний інтерес.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У металургійній промисловості автоматизований електричний привід застосовується в переважній більшості установок і технологічних комплексів. До половини всієї споживаної металургійними підприємствами електроенергії припадає на електроприводну техніку [2]. Зростання потужностей прокатного виробництва останнім часом є пов'язаним з поширенням попиту на високоякісні різновиди прокату (з підвищеними вимогами до товщини листа та стану поверхні, з захисним покриттям, додатковою термічною обробкою). Це призвело до суттєвого підвищення витрат енергії на тону кінцевої продукції. Компенсація об'єктивного зростання таких витрат потребує постійного удосконалення обладнання, технології та автоматизації керування виробництвом [3].

У статті [1] розглянуті методи оперативного контролю технічного стану обладнання товстолистових прокатних станів. Визначено фактори, які впливають на ефективність використовуваних в АСУ алгоритмів діагностування, зокрема, організації збору та обробки статистичних даних по можливостях виникнення несправностей і за витратами на їх пошук і усунення. Виконано формалізацію методів побудови і опису математичних моделей об'єкта діагнозу. В роботі [2] наведено метод оцінки стану електричних приводів, заснований на побудові нейронної мережі. Розроблений метод діагностування дозволяє взяти на себе функцію контролю за динамікою швидкості і оперативно попереджати відхилення в роботі електроприводу прокатного стану кліті.

Вібродіагностичним методом проведено неруйнівний контроль стану підшипникових опор головного приводу горизонтальних валків стану 1150 ПАТ «Запоріжсталь». Проаналізовано причини виходу з ладу підшипникових вузлів з подальшою видачею рекомендацій щодо розробки методик діагностування приводів горизонтальних валків та визначення оптимального технічного рішення для їх реалізації [3].

Одним з найбільш важливих сучасних напрямів розвитку інформаційних технологій є застосування нечіткої логіки при розробці систем автоматизованої обробки інформації та управління. Перевагами використання нечіткої логіки є спрощення моделювання складних систем, створення гнучких алгоритмів підтримки прийняття рішень на основі зрозумілих людині наборів правил, можливість обробки неточної та неповної інформації [4]. У [5] розглянуто напрям створення інтелектуальних систем підтримки інженерних рішень для складних нелінійних електроенергетичних об’єктів з використанням математичного апарата штучного інтелекту. Виконано розробку програмного забезпечення для автоматизованого моніторингу залишкового ресурсу механічного обладнання прокатних станів [6]. Виміри показали, що реакція частоти обертання двигуна є сильною інформативною ознакою для визначення часу запізнювання реакції ділянок лінії привода поряд з сигналами вібрації і сигналом давача тиску в системі гідро-врівноважування валків.

У статті [7] розроблено систему моніторингу та діагностики стану на основі LabVIEW, яка використовується для діагностики товщини смуги шляхом аналізу різних параметрів. Стаття [8] фокусується на системі моніторингу для високошвидкісного прогону дроту, що складається з системи об’єму процесу та системи моніторингу вібрації на основі точності діагностики несправностей та вимог зниження енергії для високошвидкісного дротяного стану, і система забезпечить стабільну роботу обладнання та знизити споживання енергії. Основна мета консультативної системи [9] полягає в тому, щоб допомогти оператору налаштувати параметри промислового процесу, що регулюються вручну, з метою досягти необхідної якості продукції. Ця діагностика призначена для розпізнавання несправності процесу, яку неможливо легко виявити шляхом аналізу лише окремих сигналів, а натомість має бути задіяний аналіз у багатовимірному просторі даних. У статті [10] використовується база даних при розробці модельного прогностичного алгоритму для ідентифікації вільного ходу в електромеханічних приводах польоту. У роботі [11] здійснюється високоточна валідація цифрового двійника та створення експериментальної бази даних для електромеханічних приводів з урахуванням несправностей.

Для підвищення ефективності використання діагностичного обладнання найбільш доцільним є його використання для аналізу обладнання різного призначення за параметрами, що збережені у файлах та архівах у вигляді певної бази даних [12].

Розробка систем безперервного моніторингу та діагностики технічного стану електрообладнання металургійного підприємства є основним напрямком проектування інтелектуальних інформаційних систем для промислових підприємств [13]. В даній роботі представлено метод діагностики обладнання за зміною струму двигуна. У цьому документі [14] пропонується метод, що аналізує крутний момент навантаження та зміну швидкості двигуна в клітях приводів

чорнового та чистового стану відповідно до сталі, яку потрібно прокатувати. Результати можуть бути використані як частина експертної системи для автоматичної оцінки споживання електроенергії на стані гарячої прокатки.

Отже, параметри, за якими проводять моніторинг та діагностику прокатного обладнання умовно можна розділити на механічні та електричні, але в більшості випадків вони досить сильно взаємопов'язані один з одним. З огляду на розглянуті вище джерела, можна дійти висновку, що при розробці систем моніторингу та діагностики варто віднести до основних електромеханічних параметрів силу прокатки, струм і напругу двигуна, частоту обертання, момент навантаження. Досить часто для перевірки працездатності запропонованих систем діагностики та моніторингу використовуються певні математичні та комп'ютерні моделі обладнання [14-16]. Перспективними напрямами розвитку цих систем є використання баз даних систем моніторингу та експертних знань у системах прийняття рішень для обслуговуючого персоналу, а також елементів штучного інтелекту для систем автоматичного контролю технологічного процесу.

III. МЕТА РОБОТИ

Удосконалити систему діагностики стана холодної прокатки на основі бази даних його електромеханічних процесів, шляхом розробки нечіткої системи прийняття рішення про стан електроприводів прокатного стана, що підвищить ефективність існуючої системи діагностики.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сучасне металопрокатне виробництво характеризується інтенсифікацією навантажень на технологічне обладнання. У цих умовах зростає роль різних систем автоматичного діагностування, контролю та регулювання, що забезпечують підвищення продуктивності та якості продукції, що випускається. На сьогоднішній день з'являється все більше нових мікропроцесорних систем, які дозволяють діагностувати та передавати для аналізу різні сигнали по інформаційних каналах.

Для вирішення завдання вимірювання електромеханічних параметрів дресирувального одноклітинного стану холодної прокатки цеху холодної прокатки №1 ВАТ «Запоріжсталь» використовується багатоканальний комплекс, який призначений для моніторингу та архівування отриманих даних. Схему розміщення обладнання показано на рисунку 1, де Р – розмотувач (розмотувальний пристрій); К – кліть з натискними пристроями; М – моталка (намотувальний пристрій); РД – редуктори двигунів розмотувального та намотувального механізмів, кліті; Д - двигуни електроприводів розмотувального механізму, кліті та намотувального механізму; ω1, ω2 – кутові швидкості розмотувача та моталки; V1, V2 - лінійні швидкості смуги на вході та на виході кліті.

Комплекс використовує інформацію, отриману від датчиків швидкості, струму та напруги. По кожному з чотирьох електроприводів [32, 33] контролюються такі координати: напруга двигуна, струм збудження, струм якоря, а також швидкість кліті, яка береться з урахуванням калібрувального коефіцієнта пропорційно до напруги тахогенератора.

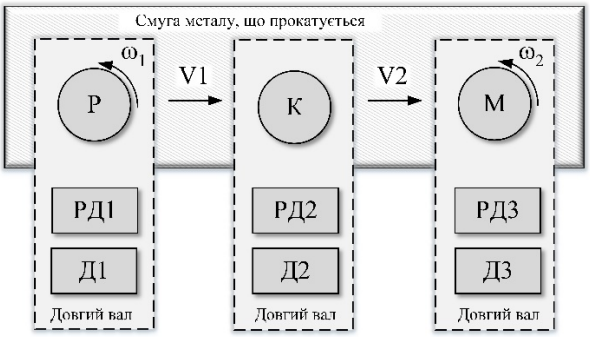

Рисунок 1. Схема розміщення обладнання прокатного стану

Програмне забезпечення комплексу було спеціально розроблене на базі вбудованої системи мікроконтролера КПС19-06. Розроблена програма дозволяє вводити необхідні назви каналів, калібрувати канали, змінювати параметри графіків. Для налаштування зображення графіків у програмі передбачено можливість зміни кольору, товщини ліній графіка; для зручності дослідження кривих може відображатися сітка та задаватися її крок; для дослідження графіків у загальному вигляді (без відображення впливу шумів на сигнал) передбачено функцію усереднення значень. Функціями інформаційно-вимірювального комплексу є прийом інформації про напругу, швидкість і струм двигунів прокатної кліті, моталки і розмотувача; візуалізація отриманої інформації у числовій формі та формі тимчасових діаграм. У пам'яті промислового комп'ютера зберігаються також база даних налаштування стану, щоденні звіти по роботі та файли тимчасових діаграм, записаних автоматично. На персональному комп'ютері проводиться обробка щоденних звітів та зареєстрованих діаграм. Отримані дані аналізуються, з них робляться висновки, які дозволяють вносити коригування в налаштування та функціонування окремих вузлів залежно від якості отриманої продукції та від вихідного продукту. Таким чином, створюється досить ґрунтовна база даних прокатки кожного рулону щодня, яка доступна як у графічному відображенні, так і у табличному, що розширює можливості використання та анлізу отриманих даних.

На рисунку 2 наведено електромеханічні процеси (1 - напруга кліті, 2 - напруга моталки, 3 - струм якоря розмотувача, 4 - напруга розмотувача, 5 - струм кліті, 6 - швидкість кліті) при прокатуванні смуги в нормальному режимі. На рисунку 3 наведено аналогічні

криві для випадку з аварією – обривом смуги.

Рисунок 2. Графіки електромеханічних процесів при нормальній прокатці рулону

Рисунок 3. Графіки електромеханічних процесів при аварійній прокатці – обрив смуги

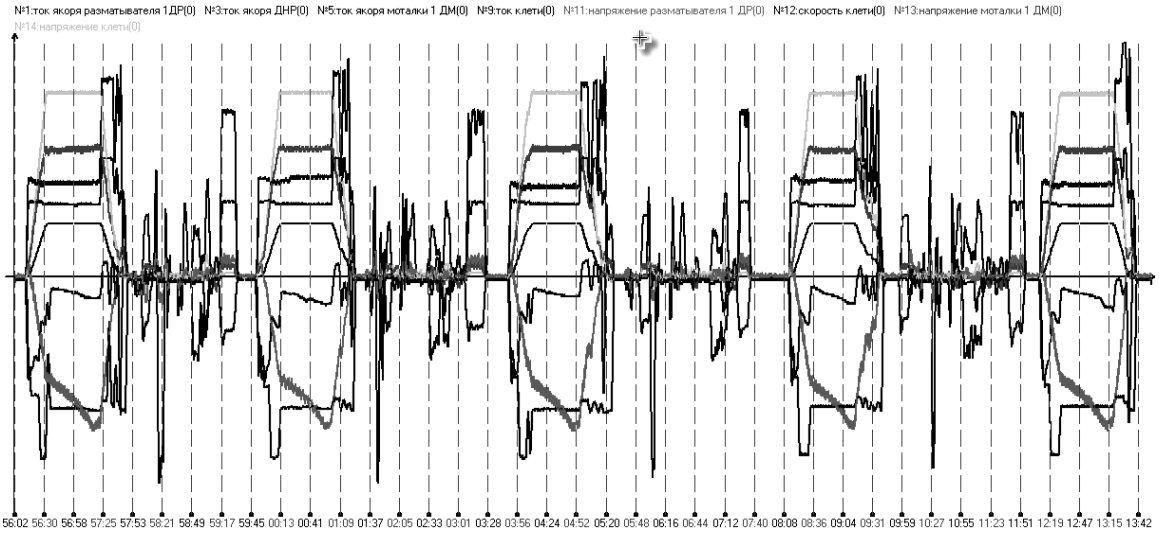

Рисунок 4. Графіки електромеханічних процесів при прокатці п’яти рулонів

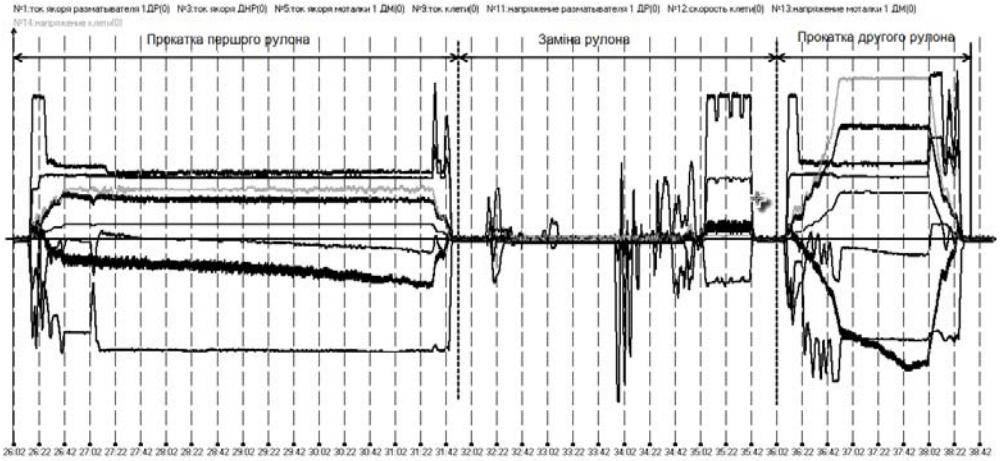

Рисунок 5. Графіки електромеханічних процесів при прокатці на різних швидкостях

Графічний редактор відображення електромеханічних процесів дозволяє легко редагувати виведення на екран контрольованих величин та часу, за допомогою чого можна одночасно бачити кілька однотипних операцій (наприклад, прокатка п'яти рулонів показана на рис. 4), що дозволяє аналізувати швидкість та темп прокатки, завантаженість обладнання. Типовий нормальний режим прокатки одного рулону містить основні режими роботи стану, а саме робота на заправній швидкості (заправка смуги), розгін до робочої швидкості, прокатка при стабільній робочій швидкості, гальмування і робота на зниженій швидкості, зміна рулону. Струм якоря моталки побічно характеризує натяг смуги. Співвідношення діючих струмів натяжних роликів, кліті та моталки показує залежність між переднім та заднім натягом. Розглянувши режими роботи приводів можна визначити динамічну і статичну складові струмів і моментів. З рисунку 5 видно, що зі збільшенням значення швидкості смуги зменшується час прокатки, оскільки показані графіки отримані для двох однакових рулонів.

Результати розробки та аналізу одержаних результатів моніторингу показали напрями досліджень, у яких можна виділити такі основні етапи: аналіз технологічного обладнання; виявлення «проблемних» режимів; дослідження режимів прокатки та їх удосконалення. За допомогою цього моніторингу можна оптимізувати налаштування систем керування як окремими каналами регулювання, так і багатопараметричною системою загалом.

У своїй більшості електромеханічні, електротехнічні та електроенергетичні об’єкти представляють собою нелінійні та взаємопов’язані системи, що обумовлює складність регулювання процесів, які в них виникають. Проблеми ефективного керування зазначеними об’єктами набувають усе більшої актуальності, відносяться до числа фундаментальних науково-технічних проблем. Відомо, що класичні методи керування ефективні для обмеженої низки об’єктів, або для об’єктів, до яких застосовані певні спрощення при математичному описі цього об’єкта [5]. Серед найпоширеніших проблем застосування традиційних методів управління можна виділити такі: використання лінійних регуляторів для об’єктів з нестабільними станами, навантаженнями, нелінійностями, збурення; фіксованість параметрів регуляторів; робота в екстремальних режимах; параметрична невизначеність електроенергетичної системи, тощо. Більшість із цих проблем можна вирішувати, застосовуючи синергетичні алгоритми керування, нечіткі нейронні мережі і методи нечіткої логіки.

Актуальність використання принципів штучного інтелекту в електроенергетичних системах полягає в забезпеченні необхідного рівня обміну інформацією між складовими елементами системи на основі інтелектуальних методів. На теперішній час одним із шляхів розв’язання задачі побудови ефективної автоматичної системи керування або прийняття рішення є використання інтелектуальних методів на основі математичного апарата нечіткої логіки, які реалізують керування на основі експертних відомостей і не потребують математичного опису поведінки системи [5]. Нечітка логіка дає можливість широко використовувати експертні знання при побудові систем прийняття рішень та систем автоматичного керування завдяки наявності розмитих в кількісному відношенні параметрів. Тому при розробці систем управління об'єктами, що складно формалізуються, доцільно застосовувати моделі та методи на принципах нечіткої логіки [18]. Такі ситуації мають місце при наявності участі операторів у функціонуванні технологічного об’єкта або за відсутності точних знань щодо цього об’єкта керування.

Об’єктом удосконалення існуючого інформаційно-вимірювального діагностичного комплекса є ділянка розмотувальний механізм – прокатна кліть. Основною задачею удосконалення є розробка системи діагностики, яка попереджатиме про передаварійний стан щодо обриву смуги металу, що прокатується. Інші дефекти та ділянки прокатного стану не розгля-

даються.

На основі аналізу результатів моніторингу електромеханічних процесів дресирувального одноклітьового стана 1700 ПАТ «Запоріжсталь» [16] виявлено, що умови, при яких відбувається обрив смуги, виникають при різкому зниженні напруги кола якоря приводного двигуна розмотувального механізма, різкому збільшенні струму якірного кола цього ж двигуна. Під різким збільшенням та зменшенням мається на увазі період часу 1-1,5 с, за які відбувається стрибок у 2-2,5 рази. Такі зміни значень електромеханічних процесів є передумовами до такої ж різкої зміни натягу смуги, що прокатується, тому пропонується додати до параметрів, які беруть участь у діагностиці, ще один – натяг смуги. Для отримання вимірювальної інформації про силу натягу пропонується використати непрямий метод вимірювання, скориставшись відомими виразами для її знаходження [17,18]:

$$\begin{cases} F_C(p) = \dfrac{C_p}{p}\{v_r(p) - [1+\varepsilon(p)]\cdot v_{kl}\}; \\ \varepsilon(p) = \dfrac{1}{C_p \cdot l}\cdot F_C(p); \\ v_r(p) = R_p \cdot \omega_1(p); \\ v_{kl}(p) = R_{kl}\cdot \omega_2(p), \end{cases} \quad (1)$$

де F_C - сила натягу смуги металу, що прокатується; C_p - жорсткість пружної ланки (смуги металу, що прокатується); v_r, v_{kl} - лінійні швидкості смуги металу на виході з розмотувального механізма та прокатної кліті; ε - відносне подовження смуги металу; l - відстань між осями розмотувального механізма і прокатної кліті; R_p - радіус розмотувального механізма; R_{kl} - радіус прокатної кліті; ω_r, ω_{kl} - кутові швидкості розмотувального механізма та проктної кліті.

Радіус прокатної кліті має постійне значення і не змінюється під час технологічного процесу. Радіус розмотуального механізма змінюється у процесі прокатки, що обумовлене зменшенням радіуса рулона, який встановлено на барабан розмотувального механізма.

Радіус рулона можна знайти за формулою [16]:

$$R_p = \sqrt{R_b^2 + \frac{h}{\pi}\int_0^t v_r dt}, \quad (2)$$

де R_b - радіус барабана розмотувального механізма.

Зв'язок між радіусом рулона та швидкістю перемотки може бути встановлений, якщо записати вираз для зміни об'єму рулона ΔV_p за час t, впродовж якого радіус рулона змінюється від R_p до R_b. [16]

$$\Delta V_p = \pi \cdot (R_p^2 - R_b^2)\cdot b, \quad (3)$$

де b - ширина смуги металу, що прокатується.

Таким чином, для побудови елементу удосконалення системи діагностики пропонується скористатися засадами нечіткої логіки. На вході цієї нечіткої системи прийняття рішення про об'єкт діагностування було задано наступні значення: напруга якірного кола двигуна розмотувального механізма; струм якірного кола двигуна розмотувального механізма; натяг смуги металу, що прокатується, на ділянці між розмотувачем та прокатною кліттю. На виході отримано загальний стан системи, який напряму залежить від значень вхідних даних [18]. На рисунку 6 показано загальний вигляд розробленої нечіткої системи.

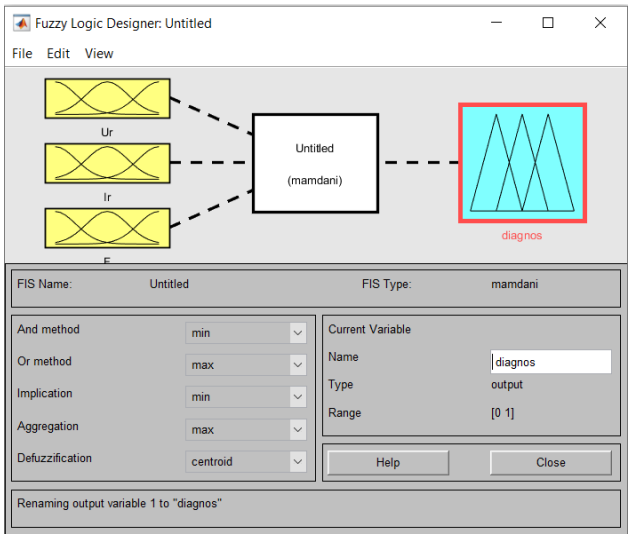

Рисунок 6. Загальний вигляд розробленої нечіткої системи

Далі для кожної з вхідних змінних, а також для виходу створено функції приналежності. Для входів і виходів було обрано функції типу «trimf», адже вона дозволяє досить просто візуально показати зміну значень. Далі встановлено межі значень, в яких очікуються коливання вхідних і вихідних даних [18].

Згідно технологічної інструкції номінальний струм якірного кола складає 1100 А, номінальна напруга якірного кола складає 600 В, максимальна сила натягу 1500 Н. Регулювання кутової швидкості електропривода розмотувального механізма може здійснюватися у двох зонах: перша зона – збільшенням напруги якірного кола до номінального значення, друга зона – ослабленням магнітного потоку. При номінальному навантаженні електропривод повинен вийти на номінальні значення напруги. Зменшені значення напруги не можна віднести до неправильної роботи електропривода, тому що може здійснюватися прокатка при зниженій швидкості при заправці смуги металу у валки суміжних електроприводів, а також підвищення швидкості до робочої з подальшим гальмуван-

ням та дотягуванням смуги. Аналогічним чином варіюються значення струму якірного кола розмотувального механізма. Допустимими при роботі електропривода вважаються значення з нуля до номінального значення струму, проте при розгоні і гальмуванні треба враховувати динамічну складову, яка є припустимою у межах близько 1,5-2 рази від номінального значення. Максимальне припустиме значення струму обумовлюється двократним перевищенням номінального значення і розраховється при виборі захисного обладнання від перевищення пускових струмів. Сила натягу регламентується діаграмою натягу смуги металу, що прокатується. Ця діаграма має декілька ділянок. Перша ділянка має лінійний характер та називається зоною пружності, тут смуга металу підлягає закону Гука. Друга ділянка – невелика горизонтальна пряма, називається зоною загальної текучості, тут відбувається суттєва зміни довжини смуги без суттєвого збільшення навантаження. Третя зона – зона зміцнення, тут подовження смуги супроводжується зростанням навантаження, але більш повільним, ніж на пружній ділянці. Найвища точка кривої цієї діаграми – це співвідношення максимальної сили, яку здатна витримати смуга металу, до його початкової площі поперечного перетину, має назву межі міцності. Остання ділянка кривої – відповідає руйнуванню властивостей металу та руйнуванню смуги металу, що відповідає розриву смуги.

Проаналізувавши електромеханічні процеси двох взаємопов'язаних електроприводів розмотувального механізму і приводної кліті, для входів було призначено межі, а саме для напруги розмотувального механізма (Ur) від 0˚В до 600˚В:

- менше 200˚В – напруга низька;
- від 200˚В до 620˚В – напруга в нормі;
- від 620˚В до 700 В – напруга вище норми.

Для струму якірного кола розмотувального механізма від 0 А до 2200 А:

- від 0 А до 1100 А – струм в нормі;
- від 1100 А до 1600 А – струм підвищений;
- від 1600 А до 2200 А – струм високий.

Для натягу смуги металу, що прокатується від 0 Н до 1500 Н:

- від 0 Н до 1200 Н – натяг менше норми;
- від 1200 Н до 1500 Н – натяг в нормі;
- від 1500 Н – натяг перевищує норму.

Для загального стану системи було умовно встановлено шкалу від 0 до 1:

- від 0 до 0,3 – відмінний стан (excellent);
- від 0,3 до 0,8 – нормальний стан (normal);
- від 0,8 до 1 – передаварійний стан (bad).

Функції приналежності напруги, струму, натягу, а також кінцевого стану системи зображені відповідно на рисунках 7 – 10.

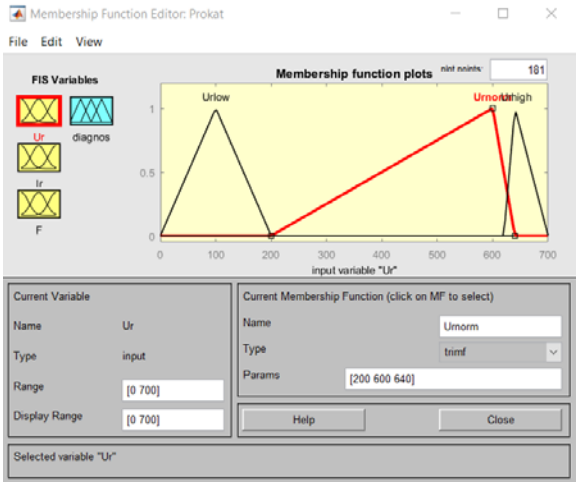

Рисунок 7. Функції приналежності напруги розмотувального механізма

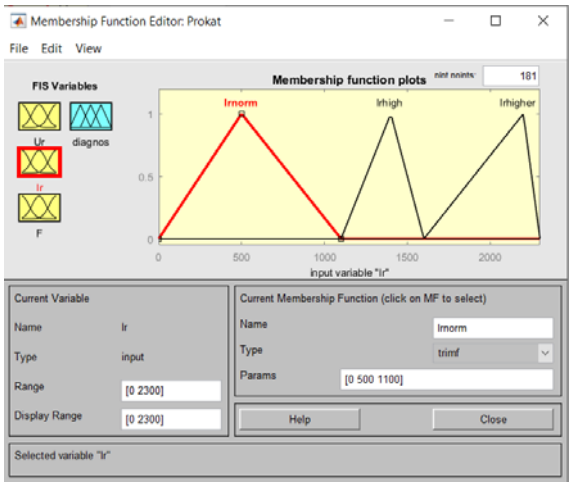

Рисунок 8. Функції приналежності струму якірного кола розмотувального механізма

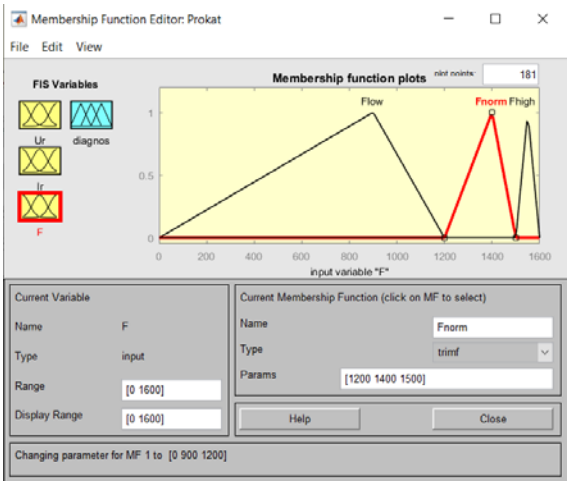

Рисунок 9. Функції приналежності натягу смуги металу, що прокатується, на ділянці між розмотувальним механізмом і прокатною кліттю

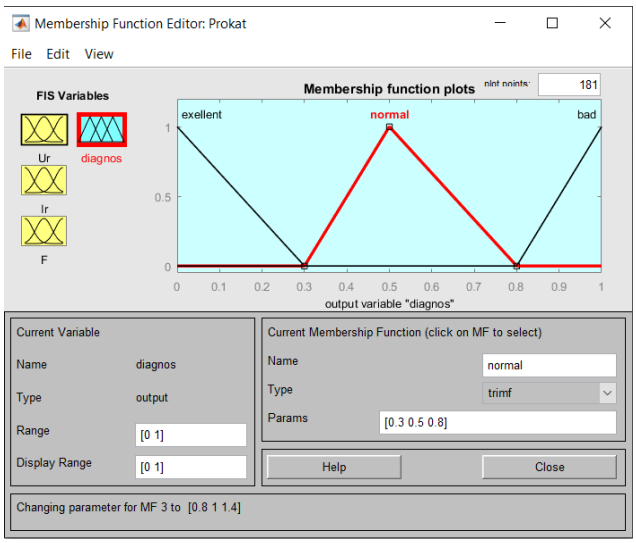

Рисунок 10. Функції приналежності стану системи

З використанням заданих функцій приналежності розроблено базу нечітких правил. Для побудови цієї бази правил використовують модель типу «якщо – то», за допомогою якої встановлюються зв'язки між вхідними та вихідними параметрами системи.

Основне призначення бази нечітких правил – це передати у формальній формі знання експертів або результати експериментів, які отримані емпіричним шляхом, у певній проблемній області.

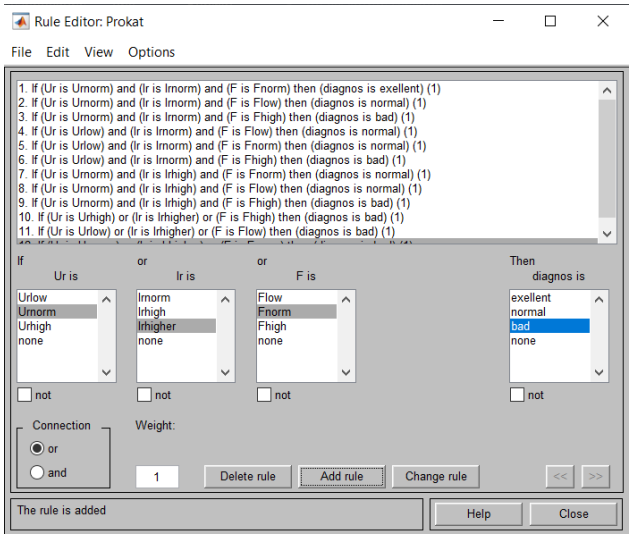

Рисунок 11. Перелік правил у вікні редактора правил Fuzzy Matlab

Для підтвердження правильності роботи створеної нечіткої системи, представлено таблицю даних з результатами моделювання (табл. 1), використовуючи графічне зображення нечіткого виводу моделі прийняття рішень щодо стану двох взаємопов'язаних електроприводів (розмотувального механізма та прокатної кліті) стана холодної прокатки.

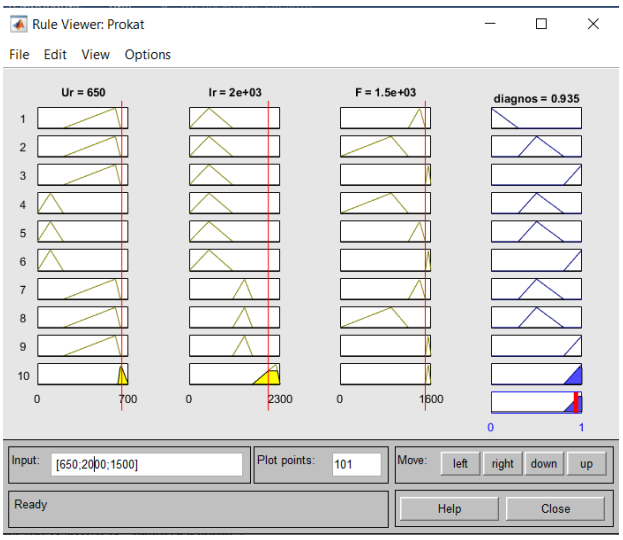

Рисунок 12. Графічне зображення нечіткого виводу моделі прийняття рішень щодо стану двох взаємопов'язаних електроприводів (розмотувального механізма та прокатної кліті) стана холодної прокатки

Таблиця 1. Результати моделювання нечіткої системи

Вхідні значення			Вихідне значення
Напруга якірного кола (Ur), В	Струм якірного кола (Ir), А	Натяг смуги металу (F), Н	Стан системи (diagnos), у.о.
100	500	1570	0.928
660	1400	1570	0.857
600	1400	1400	0.653
500	1000	1500	0.523
600	1100	1400	0.289
200	1100	1400	0.587
300	1100	1200	0.551
600	2000	1400	0.839
600	2290	1400	0.812
670	2290	1400	0.847
690	2290	1580	0.858
650	2000	1500	0.935

Отже, в результаті верифікації елемента прийняття рішення на базі нечіткої логіки удосконаленої автоматизованої системи моніторингу та діагностики електромеханічних процесів стана холодної прокатки, було змодельовано різні ситуації з вхідними та вихідними даними і зроблено висновок про те, що система працює коректно, відповідно до встановлених вимог, а також до розробленої бази нечітких правил.

V. ВИСНОВКИ

Удосконалено систему діагностики електромеханічних процесів стану холодної прокатки шляхом її доповнення нечіткою системою прийняття рішення про об'єкт діагностування на основі бази даних електромеханічних процесів двох взаємопов'язаних електроприводів: розмотувального механізму і прокатної кліті. На вході цієї системи задано напругу якірного кола двигуна розмотувального механізма, струм якірного кола двигуна розмотувального механізма, натяг смуги металу, що прокатується, на ділянці між розмотувачем та прокатною кліттю. На виході отримано загальний стан системи, який напряму залежить від значень вхідних даних.

Для отримання вимірювальної інформації про параметри діагностування використовуються дані давачів струму та напруги, які вже встановлені на промисловому обладнанні цеху холодної прокатки №1 ПАТ «Запоріжсталь». Інформацію про значення сили натягу смуги металу, що прокатується можна отримати як шляхом встановлення додаткових вимірювальних пристроїв, так і непрямим шляхом, використовуючи математичні моделі поточного радіусу рулона та лінійної швидкості смуги металу.

Проведене моделювання системи прийняття рішень про стан об'єкта діагностики на базі нечіткої логіки з урахуванням різних ситуацій з вхідними та вихідними даними показало, що система працює коректно, відповідно до встановлених вимог, а також до розробленої бази нечітких правил і може бути використана для діагностики передаварійного стану, пов'язаного з обривом смуги металу, що прокатується.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Грабовський, Г.Г. Системи контролю та діагностики в інтегрованих АСУ товстолистовими станами [Текст]/ Г.Г. Грабовський, М.Г. Ієвлєв, С.Є. Мойсеєнко // Математичні машини і системи, 2021. - № 4. - С.58-69. DOI: 10.34121/1028-9763-2021-4-58-69

[2] Мещанінов, С.К. Діагностика автоматизованих систем прокатних станів з використанням нейронної мережі [Текст] / С.К. Мещанінов, О.В. Сай, В.В. Багрій, Р.В. Волошин // Математичне моделювання, 2020. - № 1(42). – С. 78-84.

[3] Баглай, А.В. Вибрационное обследование стана 1150 [Текст] / А.В. Баглай // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2017. - № 1. - С 54–57. https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.09

[4] Шушура, О. М. Методологічні основи побудови інформаційних технологій для автоматизації управління складними системами на принципах нечіткої логіки [Текст] : дис. докт. техн. таук : 05.13.06 : захищена 11.03.18 : утв. 24.09.18 / Шушура Олексій Миколайович. - Київ, 2018. – 322 с.

[5] Кирик, В.В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник [Текст] / В.В. Кирик. – Київ : КПІ ім Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 224 с.

[6] Крот, П.В. Методи і технічні засоби автоматизованого моніторингу динамічних навантажень та діагностики зносу ліній приводу прокатних станів [Текст] / П.В. Крот, В.В. Вереньов // Зб. статей проектів за програмою «РЕСУРС» НАН України, 2009. - С. 123-129.

[7] Yue, W. The Design and Application of Distributed Mill's Monitoring and Diagnostic System Base on LabVIEW / W. Yue, G. Shengfeng, S. Lin // Electrical and Control Engineering, International Conference. - Wuhan, China, 2010. - pp. 2295-2298. doi: 10.1109/iCECE.2010.566

[8] Liang, S. Research and Application of Monitoring System for High-speed Wire Running / S. Liang, et al. // 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. - Shangshai, China, 2011. - pp. 1019-1022. doi: 10.1109/ICMTMA.2011.536

[9] Puchr, I. Probabilistic advisory system for operators can help with diagnostics of rolling mills / I. Puchr, P. Herout // 2017 21st International Conference on Process Control (PC), 2017. - pp. 132-136. doi: 10.1109/PC.2017.7976202.

[10] Rito, G. Di. Model-Based Prognostic Health-Management Algorithms for the Freeplay Identification in Electromechanical Flight Control Actuators / G. Di Rito, F. Schettini, R. Galatolo // 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Rome, Italy, 2018, pp. 340-345, doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453552.

[11] Baldo, L. High-Fidelity Digital-Twin Validation and Creation of an Experimental Database for Electromechanical Actuators Inclusive of Failures / L. Baldo, M. Bertone, M. D. L. Dalla Vedova, P. Maggiore, // 2022 6th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), Venice, Italy, 2022, pp. 19-25, doi: 10.1109/ICSRS56243.2022.10067403.

[12] Rednikov, S. N. Experience in Using Combined Diagnostic Systems for Assessing State of Metallurgical Equipment / S. N. Rednikov, E. N. Akhmedyanova and D. M. Zakirov // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 2018. - pp. 1-6. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570148.

[13] Karandaev, A. S. Design of Smart Technical Condition Analysis Systems for Electric Equipment of an Iron-and-Steel / A. S. Karandaev, R. G. Mugalimov, M. Y. Petushkov, S. I. Lukyanov, A. S. Sarvarov // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. - pp. 448-453. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877612.

[14] Orcajo, G. A. Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills / G. A. Orcajo et al. // IEEE Transactions on Industry Applications, 2016. - Vol. 52. - No. 3. - pp. 2714-2723. doi: 10.1109/TIA.2016.2533483.

[15] Назарова, Е. С. К вопросу разработки систем диагностирования электромеханических систем станов холодной прокатки [Текст] / Е. С. Назарова // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – № 1. – С. 36-41. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-6

[16] Sadovoi, O. Modeling and research of electromechanical systems of cold rolling mills. Monograph. / O. Sadovoi, O. Nazarova, V. Bondarenko, A. Pirozhok, T. Hutsol, T. Nurek, Sz. Glowacki – Krakow: Traicon, 2020. – 138 p.

[17] Назарова, О.С. Нечітка логіка в системі моніторингу та діагностики електромеханічних процесів стану холодної прокатки / О. С. Назарова, Б. В. Васильєв // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості. Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, Івано-Франківськ, 13 жовтня 2022 р. [Електронний ресурс] - Івано-Франківськ : ВНЗ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2022. – С. 151-152.

[18] Nazarova, O. S. Monitoring of electromechanical processes of the cold rolling mill taking into account the variation of the inertia moment / O.S. Nazarova, B.V. Vasiliev, M.S. Punda // International scientific conference «Interaction between science and technology in modern conditions» : conference proceedings (November 3–4, 2022. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2022. - P. 50-54. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-264-7-12

Стаття надійшла до редакції 10.01.2023

IMPROVEMENT OF THE COLD ROLLING MILL DIAGNOSTIC SYSTEM BASED ON THE DATA BASE OF ITS ELECTROMECHANICAL PROCESSES

NAZAROVA O.S. Candidate of Technical Science, Associate professor, Associate professor of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e - mail: nazarova16@gmail.com;

VASYLIEV B.V. Master of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e - mail: vasbohdan@gmail.com

SHOKUROV D.R. Student of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e - mail: danilshokurov03@gmail.com

Purpose. *To improve the diagnostic system of the cold rolling mill based on the database of its electromechanical processes, by developing a fuzzy decision-making system as to the condition of the rolling mill electrical drives, which will increase the efficiency of the existing diagnostic system.*

Methodology. *Mathematical and computer modeling.*

Findings.*A fuzzy decision-making system about the state of two interconnected electric drives of the unwinding mechanism and the rolling mill has been developed to investigate and prevent the pre-emergency state associated with the break of the rolling metal strip. The specified decision-making system is built on the basis of a database of electromechanical processes of electric drives of the skin-threat single-celled state of cold rolling of the cold rolling shop No. 1 of PJSC "Zaporizhstal". At the input of this system, the voltage of the armature circuit of the unwinding mechanism motor, the armature circuit current of the unwinding mechanism motor, the tension of the rolled metal strip in the area between the unwinder and the rolling cage are set. At the output, the general state of the system is obtained, which depends on the values of the input data. Information on the value of the tensile strength of the rolled metal strip can be obtained on the basis of the pressure data and voltage sensors, which are installed on industrial equipment. Information about the value of the tension force of the rolled metal strip can be obtained both by installing additional measuring devices and indirectly, using mathematical models of the roll current radius and the linear speed of the rolled metal strip.*

Originality. *The system for diagnosing the condition of cold rolling has been improved by introducing a fuzzy decision-making system into its composition based on a database of electromechanical processes of the electric drives of the unwinding mechanism and the cage, which will allow to prevent an emergency condition caused by a break in the*

rolled metal strip.

Practical value. *Prevention of breaking of the rolled metal strip on the basis of an improved system for diagnosing the state of cold rolling, which uses information from the database of its electromechanical processes in order to improve the efficiency of the product quality management process. Using complete organized information and experience of operating a cold rolling mill, you can form technical and technological solutions for the modernization of existing and development of new technological equipment and systems for automatic control of electric drives of rolling mills.*

Keywords: diagnostics; database; electromechanical processes; cold rolling mill; fuzzy logic; transient process; modeling.

REFERENCES

[1] Hrabovskyi, H.H., Iievliev M.H., Moiseienko S.Ie. (2021). Systemy kontroliu ta diahnostyky v intehrovanykh ASU tovstolystovymy stanamy [Control and diagnostic systems in integrated ACS by thick-sheet mills]. Mathematical machines and systems, 4, 58-69. DOI: 10.34121/1028-9763-2021-4-58-69 (in Ukrainian)

[2] Meshchaninov, S.K., Sai, O.V., Bahrii, V.V., Voloshyn, R.V. (2020). Diahnostyka avtomatyzovanykh system prokatnykh staniv z vykorystanniam neironnoi merezhi [Diagnostics of automated systems of rolling mills using a neural network]. Mathematical modeling, 1(42), 78-84. (in Ukrainian)

[3] Bahlai, A.V. (2017). Vybratsyonnoe obsledovanye stana 1150 [Vibration inspection of mill 1150]. Technical diagnostics and non-destructive testing, 1, 54–57. https://doi.org/10.15407/tdnk2017.01.09 (in Russin)

[4] Shushura, O. M. (2018). Metodolohichni osnovy pobudovy informatsiinykh tekhnolohii dlia avtomatyzatsii upravlinnia skladnymy systemamy na pryntsypakh nechitkoi lohiky [Methodological foundations of the construction of information technologies for the automation of management of complex systems based on the principles of fuzzy logic] : dys. dokt. tekhn. nauk : 05.13.06 : zakhyshchena 11.03.18 : утв. 24.09.18 / Shushura Oleksii Mykolaiovych. - Kyiv, 322. (in Ukrainian)

[5] Kyryk, V.V. (2019).Matematychnyi aparat shtuchnoho intelektu v elektroenerhetychnykh systemakh: pidruchnyk [Mathematical apparatus of artificial intelligence in electric power systems]. K. Politekhnika, 224. (in Ukrainian)

[6] Krot, P.V., Verenov, V.V. (2009). Metody i tekhnichni zasoby avtomatyzovanoho monitorynhu dynamichnykh navantazhen ta diahnostyky znosu linii pryvodu prokatnykh staniv [Methods and technical means of automated monitoring of dynamic loads and diagnostics of wear of rolling mill drive lines]. Zb. statei proektiv za prohramoiu «RESURS» NAN Ukrainy, 123-129. (in Ukrainian)

[7] Yue, W., Shengfeng, G., Lin, S. (2010). The Design and Application of Distributed Mill's Monitoring and Diagnostic System Base on LabVIEW. Electrical and Control Engineering, International Conference. Wuhan, China, 2295-2298. doi: 10.1109/iCECE.2010.566

[8] Liang, S. (2011). Research and Application of Monitoring System for High-speed Wire Running. Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Shangshai, China, 1019-1022. doi: 10.1109/ICMTMA.2011.536

[9] Puchr, I., Herout, P. (2017). Probabilistic advisory system for operators can help with diagnostics of rolling mills. 21st International Conference on Process Control (PC), 132-136. doi: 10.1109/PC.2017.7976202.

[10] Rito, G. Di, Schettini, F., Galatolo, R. (2018). Model-Based Prognostic Health-Management Algorithms for the Freeplay Identification in Electromechanical Flight Control Actuators. 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Rome, Italy, 340-345, doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453552.

[11] Baldo, L., Bertone, M., Dalla, M. D. L. (2022). Vedova and P. Maggiore, "High-Fidelity Digital-Twin Validation and Creation of an Experimental Database for Electromechanical Actuators Inclusive of Failures. 6th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), Venice, Italy, 19-25, doi: 10.1109/ICSRS56243.2022.10067403.

[12] Rednikov, S. N., Akhmedyanova, E. N., Zakirov D. M. (2018). Experience in Using Combined Diagnostic Systems for Assessing State of Metallurgical Equipment. Global Smart Industry Conference (GloSIC), 1-6. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570148.

[13] Karandaev, A. S., Mugalimov, R. G., Petushkov, M. Y., Lukyanov, S. I., Sarvarov, A. S. (2019). Design of Smart Technical Condition Analysis Systems for Electric Equipment of an Iron-and-Steel. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 448-453. doi: 10.1109/URALCON.2019.8877612.

[14] Orcajo, G. A. (2016). Dynamic Estimation of Electrical Demand in Hot Rolling Mills. IEEE Transactions on Industry Applications, 52, 3, 2714-2723. doi: 10.1109/TIA.2016.2533483.

[15] Nazarova, O. S. (2013). K voprosu razrabotky system dyahnostyrovanyia эlektromekhanycheskykh system stanov kholodnoi prokatky [On the issue of developing systems for diagnosing electromechanical systems of cold rolling mills]. Electrical engineering and power engineering, 1, 36-41. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2013-1-6

[16] Sadovoi, O., Nazarova, O., Bondarenko, V., Pirozhok A., Hutsol, T., Nurek, T., Glowacki, Sz. (2020). Modeling and research of electromechanical systems of cold rolling mills. Krakow, Traicon, 138.

[17] Nazarova, O. S., Vasyliev, B. V. (2022). Nechitka lohika v systemi monitorynhu ta diahnostyky elek-

tromekhanichnykh protsesiv stanu kholodnoi prokatky [Fuzzy logic in the system for monitoring and diagnosing electromechanical processes of the cold rolling state. Abstracts of the All-Ukrainian scientific and practical conference of young scientists and students on Information technologies in education, technology and industry, 151-152. (in Ukrainian)

[18] Nazarova, O. S., Vasyliev, B.V., Punda, M.S. (2022). Monitoring of electromechanical processes of the cold rolling mill taking into account the variation of the inertia moment. International scientific conference on Interaction between science and technology in modern conditions, Riga, Latvia, 50-4. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-264-7-12