

УДК 681.5.004:669

№ держреєстрації 0123U104590

Товариство з обмеженою відповідальністю
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з науково-дослідної
роботи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»



Володимир КУХАР

«11» липня 2024 року

ПРОМІЖНИЙ ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
«Автоматизація та енергозабезпечення виробничих процесів в мехатроніці та робототехніці в умовах гірничо-металургійного комплексу» (проміжний)

Етап 1. Обробка початкових інформації й проведення досліджень в галузі інтелектуальних систем управління та визначення енергоефективних технологій в умовах гірничо-металургійного комплексів України

Науковий керівник:

професор, докт. техн. наук

Віктор ХІЛОВ

«28» червня 2021 року

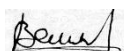
2024

Рукопис закінчено «28» червня 2024 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», протокол № 9 від «11» липня 2024 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, докт.
техн. наук, професор
Відповідальний
виконавець, канд. техн.
наук, доцент
Виконавець, канд. техн.
наук, доцент
Виконавець, канд. техн.
наук, доцент
Виконавець, старший
викладач
Виконавець, канд. техн.
наук, доцент
Виконавець, канд. техн.
наук, доцент
Виконавець, докт. техн.
наук, професор
Виконавець, канд. техн.
наук, доцент
Виконавець, канд. техн.
наук, професор
Виконавець, старший
викладач
Виконавець, канд. техн.
наук, доцент



Виконавець, студент
групи 174-23-1м



Виконавець, студент
групи 174-23-1м



Виконавець, студент
групи 141-23-1п



Виконавець, студент
групи 141-23-1п



Віктор ХІЛОВ
(вступ, розділ 7)
Артем РУХЛОВ
(розділ 7)

Олег БУНДЗА
(розділ 5)
Микола ГОЛОТЮК
(розділ 5)
Андрій ІСАЄВ
(розділ 4)

Олексій КОЙФМАН
(розділ 1)

Вікторія МІРОШНІЧЕНКО
(розділ 1)

Олена НАЛОБІНА
(розділ 5)

Олексій РАЗЖИВІН
(розділ 6)

Олександр СІМКІН
(розділ 2)

Сергій СОКОЛ
(розділ 4)

Олег СУБОТІН
(розділ 3)

Ігор СТЕБЕЛЬКО
(Розділ 1)

Юрій УЗЛОВ
(Розділ 2)

Василь КІНШАКОВ
(Розділ 7)

Дмитро СНІГОВИЙ
(Розділ 7)

РЕФЕРАТ

ПРОМІЖНИЙ ЗВІТ з НДР: 125 с., 101 джерело.

Ключові слова: ідентифікація, енергоефективність, інформаційне та програмне забезпечення, технічне діагностування.

Об'єкт дослідження: автоматизовані системи управління інтелектуальними, електротехнічними, робототехнічними системами та їх енергоефективні режими.

Мета дослідження: визначити, обґрунтувати та розробити методи та інформаційно-програмне забезпечення для автоматизації та енергоефективності роботи гірничо-металургійного виробництва в Україні на основі інтелектуальних, електротехнічних та робототехнічних систем.

Предмет дослідження: математичні моделі об'єкту керування, алгоритми керування в інтелектуальних, електротехнічних та робототехнічних системах, енергоефективні режими.

Результати та їх новизна:

- для теорії

- визначено універсальний метод ідентифікації параметрів об'єкту керування шляхом дослідження відомих методів для розімкнених систем автоматичного регулювання;

- побудовано модель для визначення витрат палива в процесі регулювання нагріву заготовки металу;

- розроблено метод оцінки достовірності прийому оптичних кодованих сигналів у фотоелектричних вимірювальних перетворювачах, що дає можливість оцінити дію випадкових оптичних і електромагнітних завад на канали інформаційно-вимірювальної системи;

- розроблено алгоритм перетворення аналогового сигналу у цифровий код з подальшою його обробкою для підвищення точності вимірювання;

- встановлено модель процесу екскавації та пересування роторного екскаватора, що перебуває в експлуатації за межами строку, встановленого заводом-виробником;

- одержали розвиток алгоритм спільного керування та побудова структури системи керування електричними та тепловими параметрами, за якими нема потреби конструктивних змін існуючих систем керування енергетичними параметрами плавки печі при інтеграції АСУ ЕТП

- встановлені моделі та технологічні передумови для впровадження ефективного регулювання режимів електроспоживання технологічних процесів шахт.

- для практики:

- розроблено алгоритму визначення параметрів об'єкту керування на працюючому агрегаті (технологічному процесі);

- визначені умови запобігання надлишкових витрат теплової енергії та енергоресурсів шляхом забезпечення перехідного процесу з допустимими динамічними показниками якості;

- розроблені структури цифрової кодоімпульсної послідовності сигналів, що має високу реальну завадостійкість і швидкодію при мінімальній довжині коду;

- розроблені принципової електричної схеми та друкованої плати приладу для вимірювання параметрів технологічних процесів за допомогою сенсорів з виходом у вигляді електричної величини: напруги, струму або опору, обробки вимірюваних сигналів та подальшої передачі в систему АСУ ТП;

- зроблено оцінку технічного стану без розбирання основних вузлів та механізмів роторного екскаватора;

- розроблені структури технічної реалізації та обґрунтувати можливість організації АСУ ЕТП шляхом інтеграції в існуючі дворівневі розподілені системи управління з використанням мережевих промислових технологій Profibus та Industrial Ethernet;

- визначені режимів функціонування основних технологічних комплексів шахт для використання їх в якості ефективних споживачів-регуляторів з урахуванням сучасних умов електрозабезпечення підприємств.

Інформація щодо впровадження – для ефективного впровадження технічних рішень, що пропонуються, необхідний технічний аудит обладнання, що включає комплексне інструментальне обстеження існуючого технологічного обладнання з метою визначення поточного стану, залишкового ресурсу та обґрунтування подальших дій з активами обладнання (експлуатація, ремонт, модернізація).

Зв'язок з іншими роботами: робота безпосередньо зв'язана з дослідженнями, які охоплені програмою національної Стратегії розвитку «Індустрія 4.0».

Рекомендації щодо використання – результати може бути використані при розробці типових систем автоматизації та програмного забезпечення лабораторних робіт та курсових робіт, а також випускних робіт здобувачів- магістрів, а саме:

- використання отриманих результатів для визначення параметрів моделі об'єкту керування, що забезпечить оптимальні показники якості процесу регулювання;

- розроблені рекомендації щодо налаштування динамічних параметрів керуючих пристроїв, які дозволять економити паливо в режимах нагріву металевих заготовок;

- використання запропонованого модулю засобів одержання первинної інформації для інформаційно-вимірювальної системи прокатного стану, що дозволяє підвищити швидкодію системи і достовірність контролю;

- розроблені принципової схеми та програми для видачі вимірюваного сигналу на індикатор, у вигляді цифрового сигналу та у вигляді

струму в стандартному діапазоні, що дозволяє безпосереднього їх використання;

- визначена методика оцінки технічного діагностування основних вузлів та механізмів роторного екскаватора;
- сформульована концепція інформаційного забезпечення розподіленої АСУ електротермічними печами;
- встановлені енергоефективні режими електроспоживання технологічних процесів шахт.

Сфера застосування: планується впровадження на гірничо-металургійних підприємствах міжнародної групи компаній Метінвест, яка володіє видобувними та металургійними активами в Україні, Європі та США. Результати досліджень впроваджуються у навчальний процес, науково-дослідну роботу.

Економічна та соціально-економічна ефективність роботи: зменшення собівартості та підвищення якості продукції чорної металургії, якісна підготовка здобувачів вищої освіти.

Значимість роботи: полягає в покращенні рівня автоматизації та режимів енергозабезпечення виробничих процесів в мехатроніці та робототехніці в умовах гірничо-металургійних комплексів групи компаній Метінвест.

Висновки, пропозиції щодо розвитку об'єкта дослідження й доцільності продовження досліджень: рекомендується продовжити дослідження з використанням інформації з діючих технологічних об'єктів.

Умови одержання ЗВІТУ: одержання дозволу від ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА».

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ	11
1.1 Огляд методів визначення параметрів об'єктів керування	12
1.2 Алгоритм та результати дослідження на прикладі однієї кривої розгону	20
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ТА НАЛАШТУВАНЬ РЕГУЛЯТОРА НА ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ НАГРІВУ МЕТАЛУ	32
2.1 Загальний підхід до постановки задач дослідження	32
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОКАТНИМИ СТАНАМИ	38
3.1 Аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем контролю технологічних параметрів прокатних станів	38
3.2 Аналіз способів та засобів формування первинної виробничої інформації в інформаційно-вимірювальних системах контролю технологічних параметрів прокатних станів	45
3.3 Система автоматичного стеження за слябами у пічному районі	47
4 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ, АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМ ВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В АСУ ТП	53
4.1 Існуючі технічні засоби	53
4.2 Розробка структурної схеми макету технологічного об'єкту	59
4.3 Тестування макету технологічного агрегату	61
4.4 Подальші плани з роботи з макетом технологічного об'єкту	67

5 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА ШЛЯХОМ РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНАСТУВАННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ТА МЕХАНІЗМІВ	68
5.1 Існуючі методики технічного діагностування	68
5.2 Технічне обслуговування та ремонт редукторів роторних екскаваторів	74
6 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ АСУ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМИ ПЕЧАМИ	76
6.1 Автоматизована система управління тепловим режимом плавки технологічного комплексу «ПІЧ-КІВШ	76
6.2 Реалізація алгоритму функціонування автоматизованої системи керування	83
7 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ШАХТ	93
7.1 Електроспоживання вугільних шахт за технологічними процесами	93
7.2 Аналіз режимів електроспоживання шахтних технологічних установок на прикладі вентилятору головного провітрювання	94
7.3 Регулювання електроспоживання вугільної шахти для зниження пікових навантажень в енергосистемі	100
ВИСНОВКИ	108
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	111

ВСТУП

З погляду економічної безпеки держави дуже важливо, щоб виробництво такого стратегічного продукту, як сталь, було, по-перше, в Україні, по-друге, в Євросоюзі. Перебуваючи в Євросоюзі важливо мати власну сучасну базу виробництва якісної сталевих продукції всередині своєї країни. Це одна з перспективних ніш, де можливо посісти своє місце в Європейському Союзі. Це буде поштовхом у ланцюжку доданої вартості, щоб рухатися далі до інших галузей: на трубну промисловість, вироби з металу, на виробництво металопродукції з більшою доданою вартістю для машинобудування, виготовлення продукції під замовлення великими партіями під кожного конкретного споживача. У цьому напрямку є перспективи розвитку країни.

Майбутнє гірничо-металургійного комплексу України полягає на природних причинах: великі поклади якісної залізорудної сировини; добре розвинена база трудових ресурсів, створюваних десятиліттями; працюють підприємства, які не тільки конкурують але вже давно інтегровані до світового ланцюжка виробництва.

Ефективність функціонування гірничо-металургійного комплексу напряму залежить від автоматизації виробництва.

Розв'язанню комплексу задач з автоматизації та енергозабезпечення виробничих процесів в мехатроніці та робототехніці в умовах гірничо-металургійного виробництва на підприємствах холдингу Метінвест спрямовані дослідження науково-дослідної роботи.

Основною висунутою ідеєю у НДР є можливість встановлення закономірностей функціонування технологічних об'єктів керування та спостереження, розробки адекватного математичного опису процесів, що дозволить розробити: методи універсальної ідентифікації; методи керування тепловими процесами з обмеженням витрат палива; методи діагностування гірничих машин та комплексів для відкритих гірничих робіт;

створити інформаційно-програмне забезпечення процесів автоматизації прокатних станів; алгоритми спільного керування енергетичними параметрами плавки печі при інтеграції АСУ ЕТП; підвищити енергоефективності гірничо-металургійного виробництва в Україні з використанням інтелектуальних, електротехнічних та робототехнічних систем, покращення режимів енергоспоживання.

В основу робочої гіпотези покладено припущення можливості складання математичної моделі технологічного процесу, що є об'єктом дослідження, визначення припущень за яких модель побудована, визначення меж у яких модель є адекватною, формулювання та обчислення критерія подібності для розробленої моделі та зіставленні отриманих результатів на розробленої моделі з експериментальними даними, що дозволить визначити коректність висунутої ідеї та межі припустимості похибок функціонування моделі.

Реалізація висунутої ідеї та створеної робочої гіпотези дозволила отримати можливість розв'язання завдань, що сформульовані у галузях: сучасних методів ідентифікації об'єктів керування; динаміки керування з метою підвищення енергоефективності процесів; інформаційного забезпечення систем керування прокатними станами; програмного забезпечення підсистем технологічної інформації плавки в печі при інтеграції в АСУ ТП; методів технічного діагностування механізмів потужних видобувних гірничих комплексів; енергоефективних режимів електроспоживання технологічних процесів.

Розв'язок цих завдань дозволить міжнародній гірничо-металургійній групі компаній Метінвест успішно вирішувати технічні та технологічні питання, що напряму пов'язані з проблемами автоматизації, ідентифікації, інформаційного забезпечення, методів діагностування та енергоефективності функціонування підприємств чорної металургії України.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

Метою цього дослідження є аналіз методів ідентифікації об'єктів керування (ОК) для визначення універсального методу, що дозволить отримати в комплексі: мінімальну статичну похибку моделювання розімкнутої системи автоматичного керування, максимальне значення коефіцієнта детермінації моделі, а також забезпечити відповідність тривалості перехідного процесу в розімкнутій системі автоматичного керування вимогам технологічного процесу [1, 2].

В умовах промислового виробництва виникає потреба в періодичному налагодженні та налаштуванні систем автоматичного керування, спричинена поступовими змінами експлуатаційних характеристик керованого технологічного агрегату в процесі його функціонування. Наприклад, знос футерування робочого простору нагрівальної печі призводить до збільшення втрати теплоти, яке, у свою чергу, безпосередньо впливає на оптимальне керування температурним режимом в зонах. Ці зміни повинні бути враховані періодичним налаштуванням регуляторів відповідних технологічних параметрів. Сучасні локальні системи автоматичного регулювання обладнані переважно контролерами та програмними засобами з функцією налаштування регуляторів в автоматичному режимі, що дозволяє персоналу не заглиблюватись у ідентифікацію об'єктів керування. Недоліком цього способу є суттєва тривалість обчислень та забезпечення працездатності системи лише у вузькому діапазоні регулювання. Незважаючи на широке, зумовлене зручністю для персоналу, використання автоматичного налаштування промислових регуляторів, залишається багато невирішених проблем, пов'язаних з якістю налаштування системи регулювання, зміною параметрів об'єктів керування та зовнішніх збурень в процесі ідентифікації, а також забезпеченням потрібних показників якості процесів регулювання [3].

Ідентифікація ОК передбачає визначення параметрів, що характеризують їхні основні динамічні властивості, які є важливими з точки зору керування технологічними процесами, наприклад, інерційність та час реагування для статичних об'єктів із самовирівнюванням.

Найпоширенішим експериментом для налагодження систем автоматичного керування, зокрема, ідентифікації ОК, є отримання його реакції на вхідний ступінчастий вплив – кривої розгону (КР), що використовується для визначення моделі ОК в технологічних умовах у межах амплітуди кроку [4].

1.1 Огляд методів визначення параметрів об'єктів керування

Аналіз вітчизняних і закордонних джерел дозволяє розділити методи визначення параметрів ОК на наступні групи:

1.1.1 Інженерні методи

Інженерні методи передбачають: визначення точки А, в якій швидкість зміни регульованого параметру є максимальною; побудову дотичної в цій точці перегину та графічне визначення декількома способами значень параметрів [5] ОК як аперіодичної (інерційної) ланки першого порядку (рис. 1.1, а, б) з передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{K}{T_{об}p+1}, \quad (1.1)$$

а також аперіодичної (інерційної) ланки другого порядку (рис. 1.2) з передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{K}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \text{ при } T_1 > 2T_2, \quad (1.2)$$

або

$$W(p) = \frac{K}{(T_3p+1) \cdot (T_4p+1)}, \quad T_{3,4} = \frac{T_1 \pm \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}{2} \quad (1.3)$$

де K – коефіцієнт передачі об'єкта керування;

$T_{об}, T_1, T_2, T_3, T_4$ – сталі часу об'єкта керування.

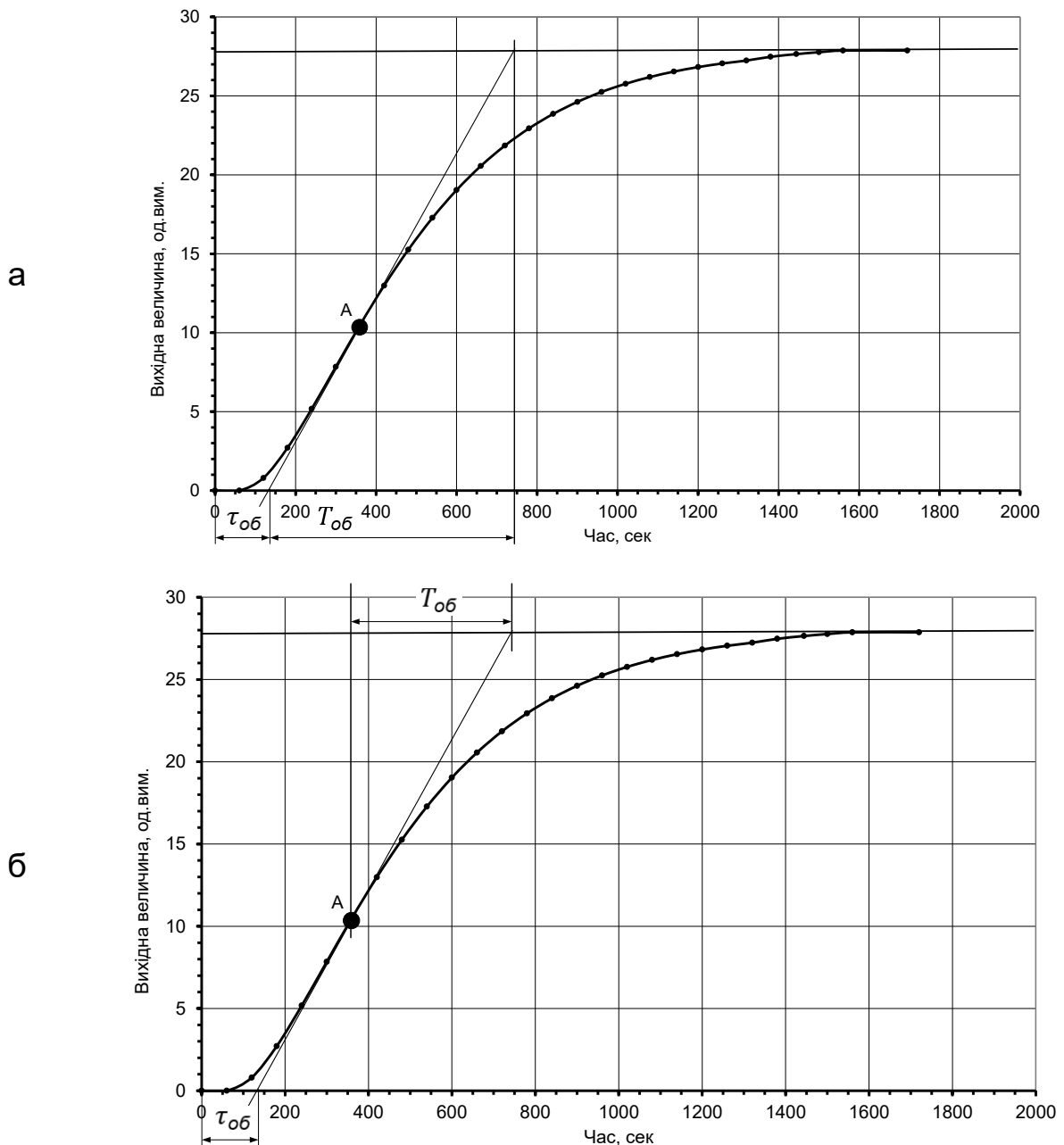


Рисунок 1.1 - Інженерні методи ідентифікації ОК: а) Методи 10 та 11, б) Методи 20 та 21

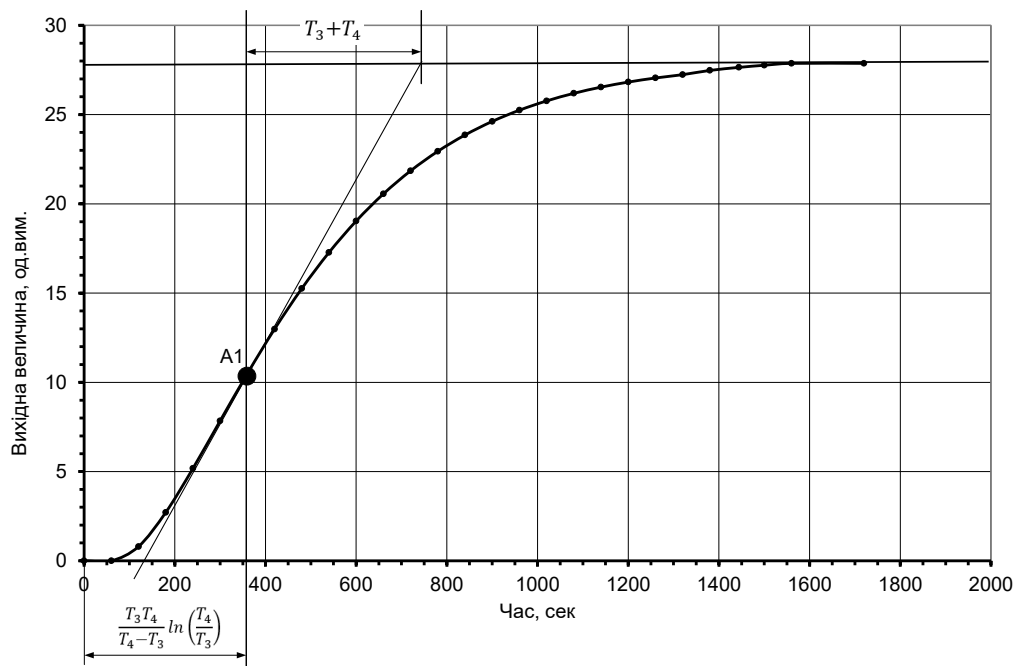


Рисунок 1.2 - Інженерні методи ідентифікації ОК: Методи 30 та 31

В цьому дослідженні прийняті позначення: Метод 10, Метод 20, Метод 30, відповідно, до вищевказаних інженерних методів за умов визначення точки перегину в автоматичному режимі, а також Методи 11, 21, 31 – визначення точки перегину вручну за допомогою графічного способу обробки результатів експерименту.

1.1.2 Методи визначення реакції об'єкта в одній або двох точках

Метод точки 0,632 (Метод 60, рис. 1.3) рекомендовано використовувати для ідеального випадку, коли криву розгону ОК можна описати тільки експоненціальною функцією, тобто апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку без запізнення ($\tau_{об} = 0$). Значення сталої часу $T_{об}$ визначається як час, за який вихідна величина досягне 63,2% від нового сталого значення.

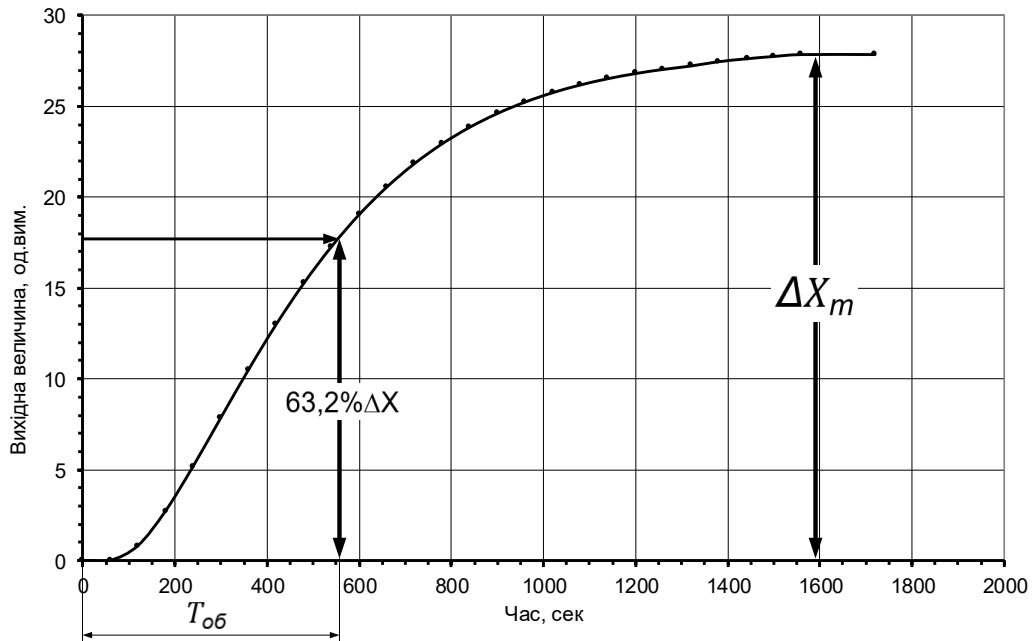


Рисунок 1.3 - Метод 60

Метод точок 0,1..0,15 та 0,8..0,85 (Метод 40, рис. 1.4) передбачає визначення на графіку кривої розгону часових координат двох точок за формулами:

$$\tau_1 = (0,1 \dots 0,15) T, \quad (1.4)$$

$$\tau_2 = (0,8 \dots 0,85) T, \quad (1.5)$$

де T – час, за який вихідна величина досягла нового сталого значення.

Відповідно визначаються координати по осі ординат для обох точок:

$$X(\tau_1) = (0,1 \dots 0,15) \Delta X_T, \quad (1.6)$$

$$X(\tau_2) = (0,8 \dots 0,85) \Delta X_T, \quad (1.7)$$

де ΔX_T – різниця між сталими значеннями параметру ОК.

За отриманими координатами обчислюють відносні ординати точок:

$$X_1 = \frac{X(\tau_1) - X(0)}{\Delta X_T}, \quad (1.8)$$

$$X_2 = \frac{X(\tau_2) - X(0)}{\Delta X_T} \quad (1.9)$$

де $X(0)$ – початкове стає значення параметру ОК.

Параметри об'єкта керування обчислюють за виразами:

$$\tau_{об} = \frac{\tau_2 \ln(1-X_1) - \tau_1 \ln(1-X_2)}{\ln(1-X_1) - \ln(1-X_2)} \quad (1.10)$$

$$T_{об} = \frac{\tau_{об} - \tau_1}{\ln(1-X_1)} \quad (1.11)$$

або

$$T_{об} = \frac{\tau_{об} - \tau_2}{\ln(1-X_2)} \quad (1.12)$$

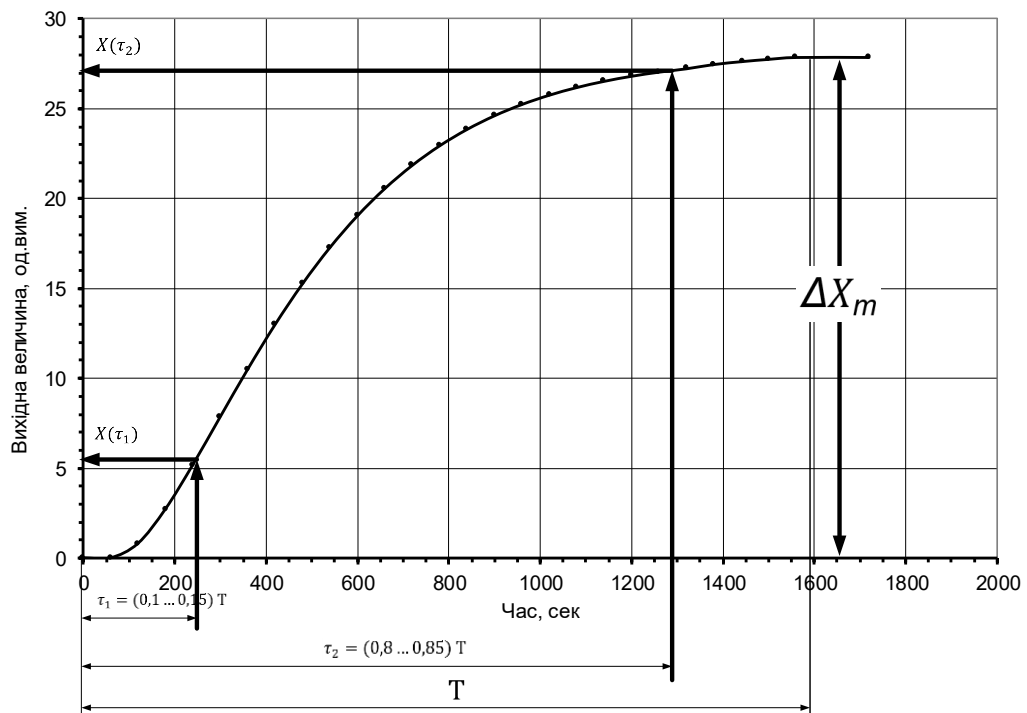


Рисунок 1.4 - Метод 40

Метод точок 0,283 та 0,632 (Метод 61, рис. 1.5) передбачає алгоритм визначення сталої часу та часу запізнення, який застосовують практично для усіх хімічних процесів [4]. На першому етапі для ординат $0,283 \cdot \Delta X_T$ та $0,623 \cdot \Delta X_T$ необхідно визначити координати по осі часу $\tau_{0,283}$ та $\tau_{0,632}$. На часовій шкалі ці дві точки є моментами, коли регульований параметр досягає 28,3 і 63,2% свого остаточного значення в стаціонарному стані. На другому етапі стала часу та час запізнення розраховуються за наступними формулами:

$$T_{об} = \frac{3}{2} (\tau_{0,632} - \tau_{0,283}) \quad (1.13)$$

$$\tau_{об} = \tau_{0,632} - T_{об} \quad (1.14)$$

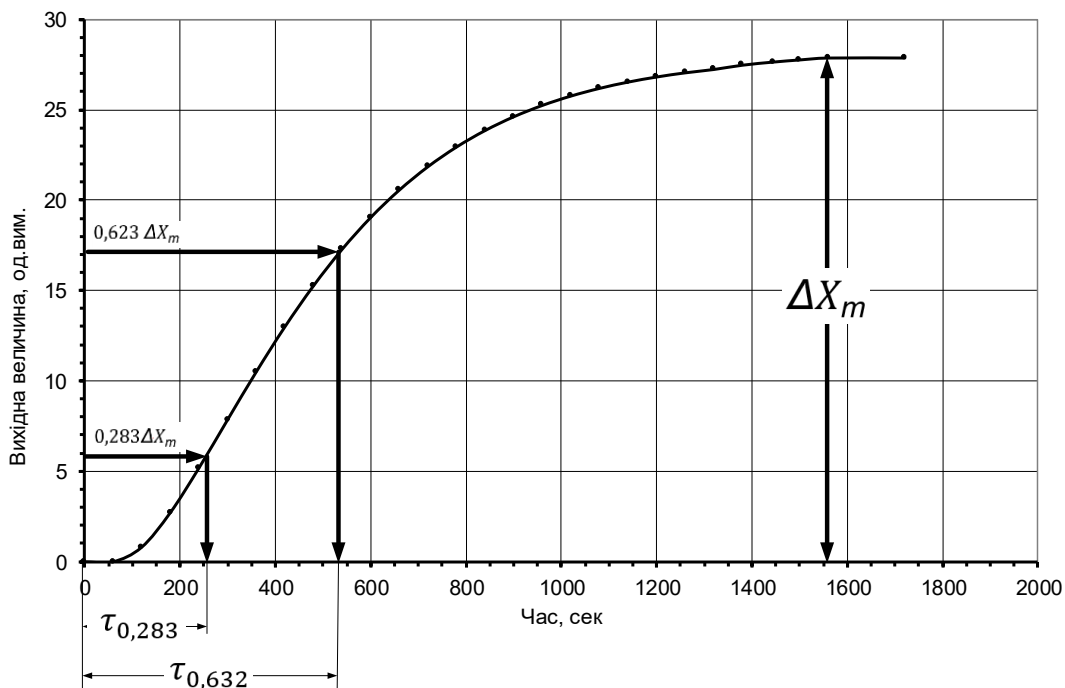


Рисунок 1.5 - Метод 61

Метод точок 0,353 та 0,853 (Метод 62, рис. 1.6) дозволяє апроксимувати дані кривої розгону ОК (аперіодичної ланки другого та вищого порядку) за допомогою передатної функції аперіодичної ланки

першого порядку із запізненням [5]. Алгоритм передбачає на першому етапі визначення координат по осі часу $\tau_{0,353}$ та $\tau_{0,853}$ для координат по осі ординат $0,353 \Delta X_T$ та $0,853 \Delta X_T$. На другому етапі параметри розраховуються за наступними виразами:

$$T_{06} = 0,675(\tau_{0,853} - \tau_{0,353}) \quad (1.15)$$

$$\tau_{06} = 1,294 \cdot \tau_{0,353} - 0,294 \cdot \tau_{0,853}. \quad (1.16)$$

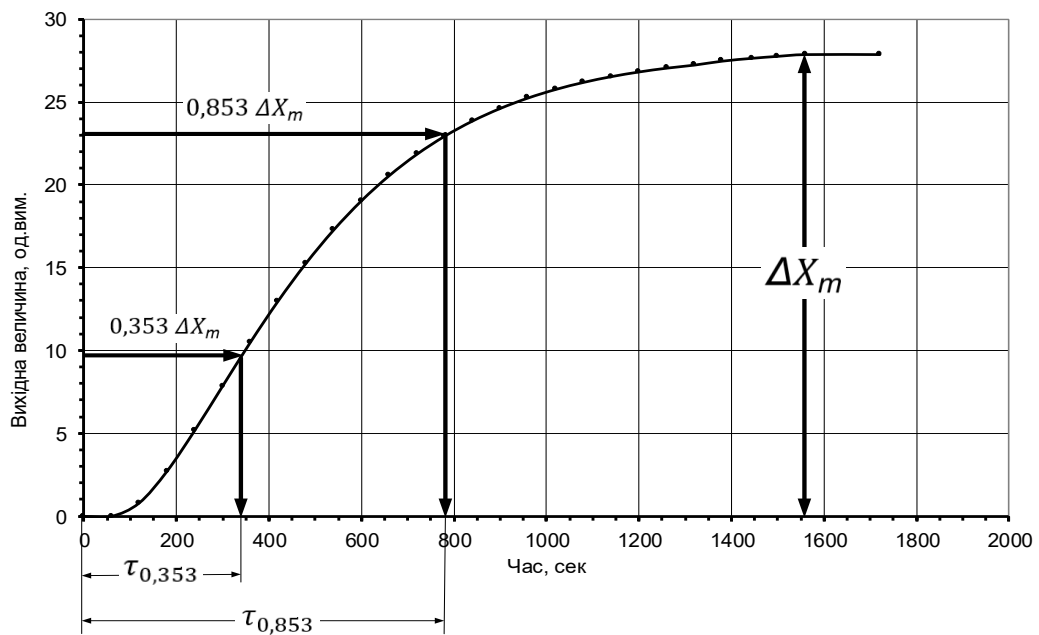


Рисунок 1.6 - Метод 62

Метод точок 0,25 та 0,75 (Метод 63, рис. 1.7) [6] використовується для визначення параметрів лінійних інваріантних систем [7], до яких можна віднести різноманітні технічні системи (електричні, механічні, термодинамічні тощо) та які описуються аперіодичною ланкою другого порядку. На першому етапі алгоритму необхідно визначити часові мітки, де регульований параметр досягає 25% і 75% від значення в стаціонарному стані. На другому кроці необхідно обчислити сталі часу T_1 та T_2 для аперіодичної ланки другого порядку:

$$T_2 = \frac{t_{75} - t_{25}}{X(1+1/P)}, \quad (1.17)$$

$$T_1 = \frac{T_2}{P}, \quad (1.18)$$

де

$$X = 14,2797 \cdot r^3 - 9,3891 \cdot r^2 + 0,25437 \cdot r + 1,32148,$$

$$r = \frac{t_{25}}{t_{75}},$$

$$P = -18,56075 \cdot r + \frac{0,57311}{r-0,20747} + 4,16423,$$

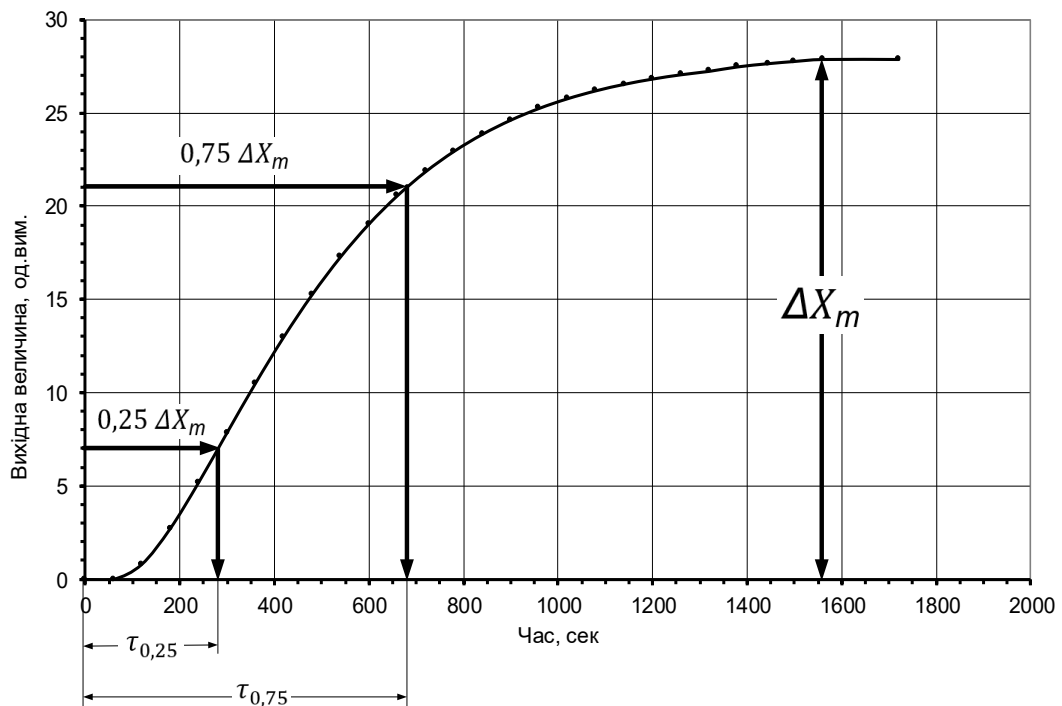


Рисунок 1.7 - Метод 63

1.1.3 Апроксимація кривої розгону

Методи (70 та 71) передбачають апроксимацію кривої розгону ОК рівнянням кривої розгону аперіодичної ланки першого з запізненням:

$$x(\tau) = K_{об} \left(1 - e^{-\frac{\tau - \tau_{об}}{T_{об}}} \right), \quad (1.19)$$

із визначенням $K_{об}$ та із наперед заданим значенням $K_{об}$ відповідно.

Методами (80 та 81) аналогічно апроксимують криву розгону ОК рівнянням кривої розгону аперіодичної ланки другого порядку:

$$x(\tau) = K_{об} \left(1 - \frac{1}{T_3 - T_4} \left(T_3 \cdot e^{-\frac{\tau}{T_3}} - T_4 \cdot e^{-\frac{\tau}{T_4}} \right) \right), \quad (1.20)$$

із визначенням $K_{об}$ та із наперед заданим значенням $K_{об}$ відповідно.

1.1.4 Бібліотеки Python для розв'язування задач керування

Алгоритм [8, 9], реалізований у відкритій бібліотеці Python, потребує додатково аналізу та реалізації надання інформації в необхідній формі.

1.1.5 Визначення параметрів ОК з використанням нейронної мережі для емуляції кривої розгону

Отримання результатів обробки емульованої нейронною мережею кривої розгону потребує більшої кількості вибірок експериментальних даних для одного об'єкту керування.

1.2 Алгоритм та результати дослідження на прикладі однієї кривої розгону

У цьому дослідженні наведено результати використання вказаних в пп. 1.1.1 – 1.1.3 методів без розгляду особливостей реалізації кожного з них для п'ятдесяти п'яти емпірично отриманих кривих розгону технологічних процесів, які можна представити об'єктом керування з самовирівнюванням, наприклад, регулювання температури або тиску у зоні нагрівальної печі, загальної витрати газу на опалення агрегату тощо.

1.2.1 Алгоритм обробки кривих розгону

Крок 1. Отримання параметрів $K_{об}$, $\tau_{об}$ та $T_{об}$ або T_1 та T_2 (або T_3 та T_4) кожним з наведених у попередньому розділі методів.

Коефіцієнт посилення $K_{об}$ визначається стандартно за виразом:

$$K_{об} = \frac{\Delta X_T}{\Delta Y}, \quad (1.21)$$

де ΔX_T – зміна вихідної величини;

ΔY – амплітуда ступінчастої зміни вхідної величини.

Або може визначатися як результат апроксимації.

Крок 2. Імітаційне моделювання в пакеті Xcos (Scilab) кривої розгону аперіодичної ланки першого порядку без запізнення (рис. 1.8), аперіодичної ланки першого порядку із запізненням (рис. 1.9) та аперіодичної ланки другого порядку (рис. 1.10).

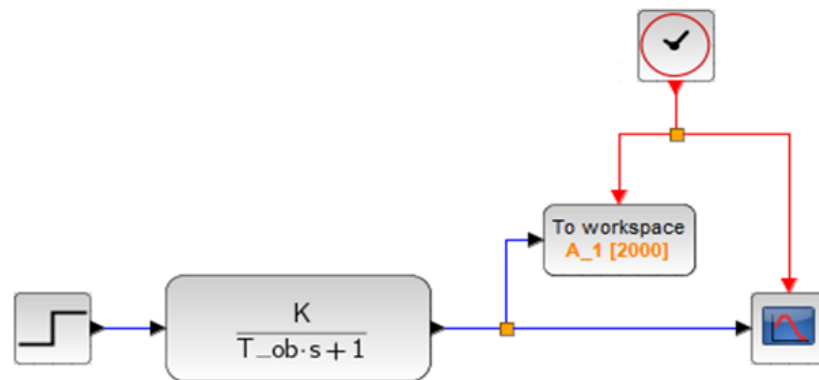


Рисунок 1.8 - Модель аперіодичної ланки першого порядку без запізнення

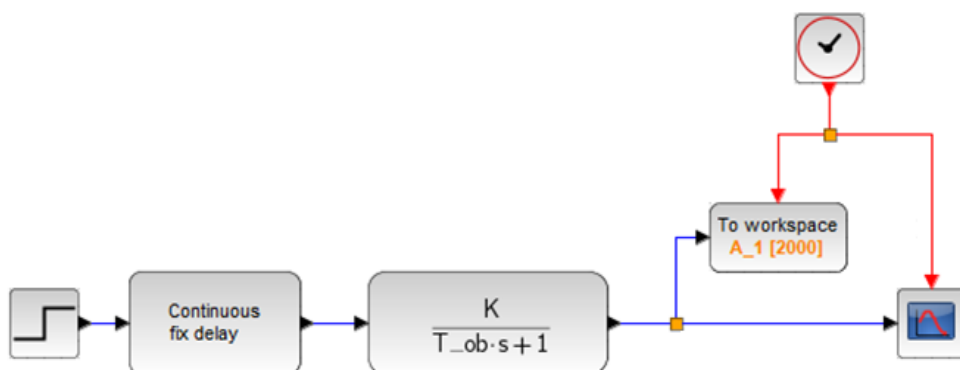


Рисунок 1.9 - Модель аперіодичної ланки першого порядку з запізненням

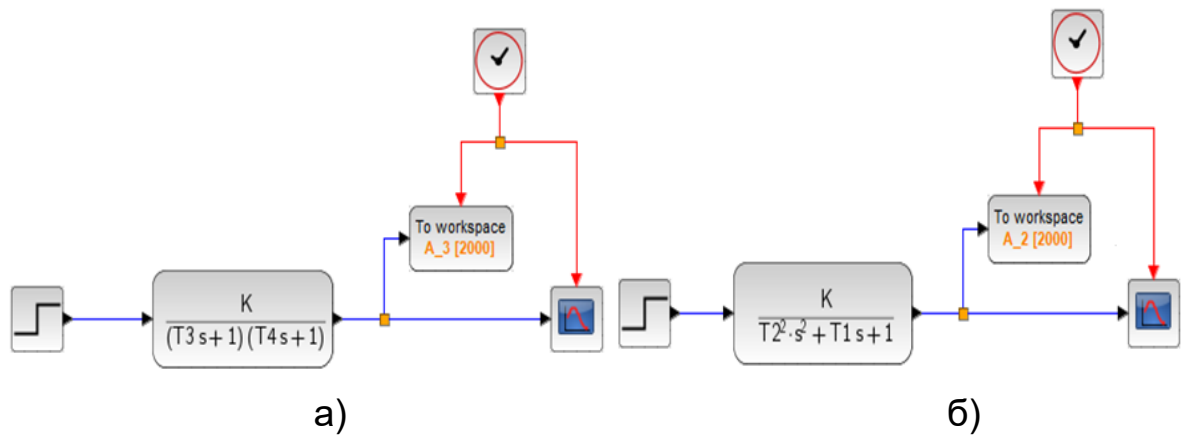


Рисунок 1.10 - Модель аперіодичної ланки другого порядку:
 а) із використанням констант T_3 та T_4 ; б) із використанням констант T_1 та T_2

Крок 3. Визначення коефіцієнта детермінації R^2 (R^2).

Крок 4. Визначення відносної статичної похибки моделювання ERR , що характеризує залишкове відхилення параметра при досягненні сталого значення (рис. 1.11). Для інженерних розрахунків в галузі автоматизації виробничих процесів прийнято допустимий розмір похибки до 0,05.

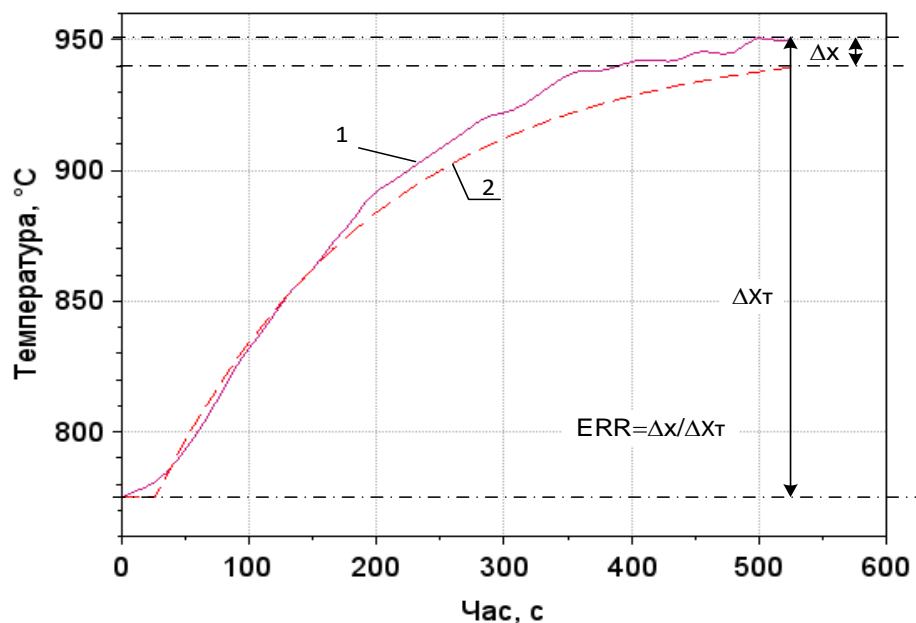


Рисунок 1.11 - Відносна статична похибка моделювання ERR

Крок 5. Порівняння результатів, отриманих різними методами визначення параметрів.

Наведений алгоритм було реалізовано в середовищі комп'ютерної математики Scilab [10], яке одночасно надає можливість програмування розробленого алгоритму, виведення інформації в зручній для подальшої обробки результатів формі, імітаційного моделювання з використанням вбудованих можливостей додатку Xcos.

1.2.2 Приклад реалізації алгоритму для однієї кривої розгону

На рис. 1.12 наведено криву розгону температурного режиму в зоні нагрівальної печі за умови вхідного впливу $\Delta Y = 20\% \text{ XPO}$.

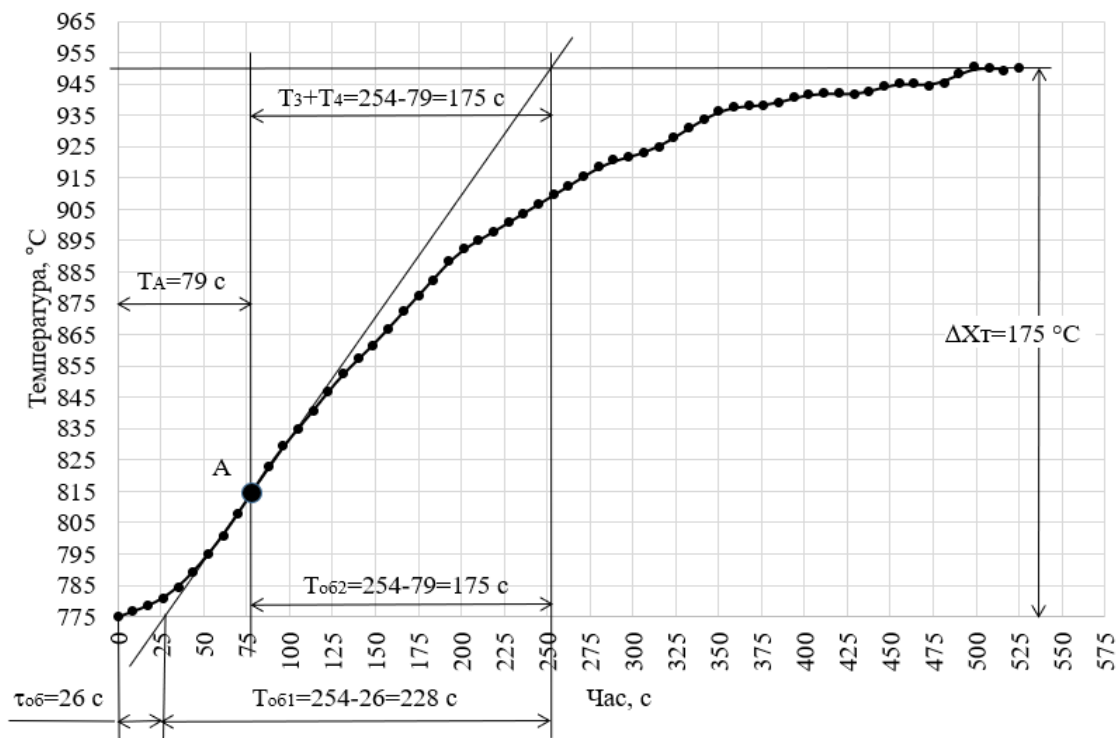


Рисунок 1.12 - Крива розгону по даним варіанта 24

1.2.2.1 Результати моделювання кривої розгону Методами 10/11, 20/21, 30/31

Геометричним способом визначені наступні параметри ОК (рис. 1.11):

Метод 11: $K_{об} = 8,75 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{XPO}$, $\tau_{об} = 26 \text{ с}$, $T_{об} = 228 \text{ с}$;

Метод 21: $K_{об} = 8,75 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{XPO}$, $\tau_{об} = 26 \text{ с}$, $T_{об} = 175 \text{ с}$;

Метод 31: Використовуючи рішення системи рівнянь (рис. 1.2):

$$\begin{cases} T_3 + T_4 = 175 \\ \frac{T_3 \cdot T_4}{T_3 - T_4} \ln \frac{T_3}{T_4} = 79 \end{cases}$$

визначено $K_{об} = 8,75 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{XPO}$, $T_3 = 120,4 \text{ с}$, $T_4 = 54,59 \text{ с}$.

За теоремою Вієта обчислені коефіцієнти T_1 та T_2 :

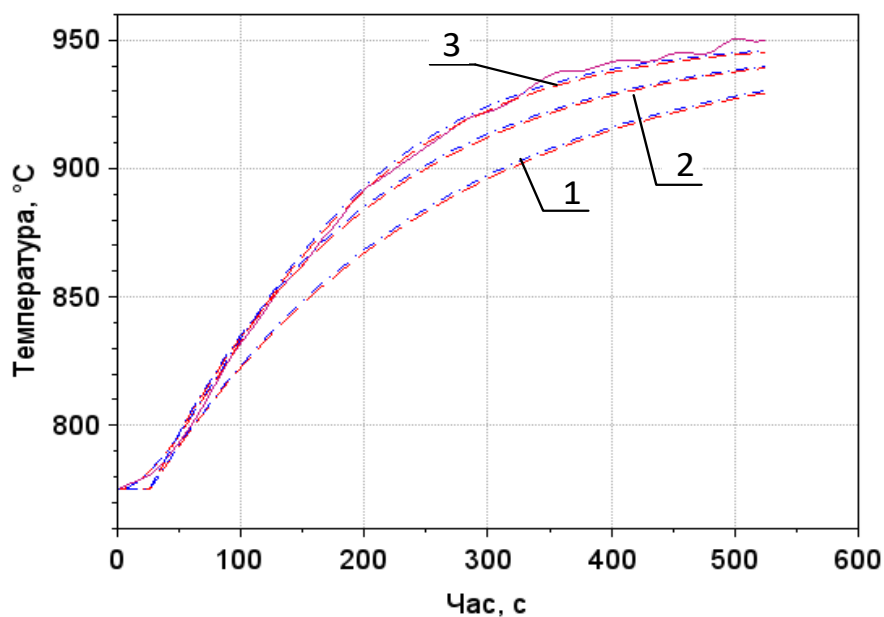
$$T_2 = \sqrt{T_3 \cdot T_4} = 81,1 \text{ с}, T_1 = T_2^2 \left(\frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4} \right) = 175 \text{ с}.$$

Очевидно, що виконується умова $T_1 > 2T_2$ для аперіодичної ланки другого порядку.

Також було реалізовано автоматичне визначення точки перегину [12], побудова дотичної та отримання параметрів об'єкту для інженерних методів 10, 20, 30. Результати наведені в табл.1.1 та на рис. 1.13.

Таблиця 1.1 - Параметри ОК, визначені методами 10/11, 20/21, 30/31

Автоматичне визначення				Ручне визначення			
$\tau_{об}$	$T_{об}$	ERR	R2	$\tau_{об}$	$T_{об}$	ERR	R2
Метод 10/11							
24,81 с	232,8 с	0,112	0,8507	26 с	228 с	0,1172	0,8351
Метод 20/21							
24,81 с	178,8 с	0,0576	0,9754	26 с	175 с	0,0613	0,9705
Метод 30/31							
T_3	T_4	ERR	R2	T_3	T_4	ERR	R2
126,61 с	52,26 с	0,0229	0,9975	120,4 с	54,59 с	0,0265	0,9976
T_1	T_2	ERR	R2	T_1	T_2	ERR	R2
178,87 с	81,34 с	0,0265	0,9976	175 с	81,1 с	0,0265	0,9976



--- ручне визначення, - - - автоматичне визначення

Рисунок 1.13 - Результати моделювання: 1 – Методи 10/11; 2 – Методи 20/21; 3 – Методи 30/31

Як видно з наведених результатів (рис. 1.13, табл. 1.1), найменшу похибку дають Методи 30/31. Моделювання аперіодичною ланкою другого порядку (Метод 30) дає найкращій збіг в період запізнення реакції об'єкта керування.

1.2.2.2 Результати моделювання кривої розгону Методом 60

На рис. 1.14 та в табл. 1.2 наведено результати Методу 60.

Таблиця 1.2 - Результати визначення параметрів ОК Методом 60

Параметр	Ручне визначення	ERR	R2
$\tau_{об}$	0	0,0658	0,936
$T_{об}$	192,5		

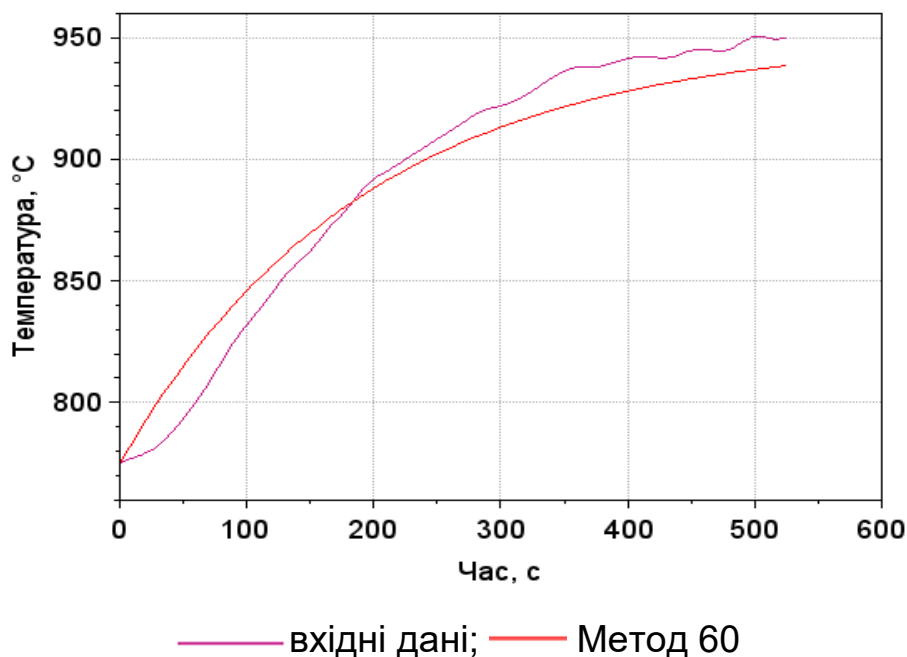


Рисунок 1.14 - Результати моделювання Методом 60

Як видно з наведених результатів (рис. 1.14 та табл. 1.2), при моделюванні кривої розгону Методом 60 отримані незадовільні значення відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2 за повної невідповідності графіків через відсутність в змодельованих результатах часу запізнення.

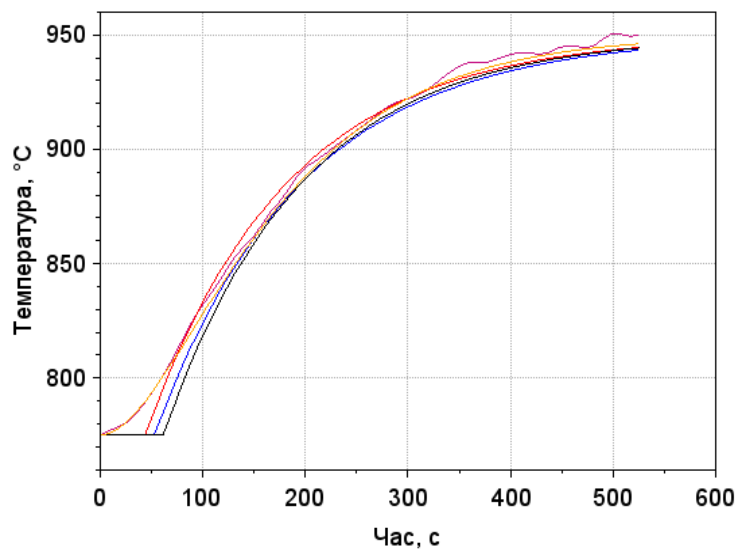
1.2.2.3 Результати моделювання кривої розгону Методами 40, 61, 62, 63

На рис. 1.15 та в табл. 1.3 наведено результати моделювання кривої розгону методами двох точок.

Як видно з наведених результатів (рис. 1.15, табл. 1.3) моделювання кривої розгону з використанням параметрів, визначених Методом 63, що передбачає застосування аперіодичної ланки другого порядку, знову дає кращій збіг в момент запізнення реакції ОК.

Таблиця 1.3 - Результати визначення параметрів ОК Методами 40, 61, 62, 63

Параметр	Автоматичне визначення	ERR	R2
Метод 40			
$\tau_{об}$	43,018	0,0311	0,9937
$T_{об}$	139,05		
Метод 61			
$\tau_{об}$	48,125	0,0376	0,9859
$T_{об}$	144,38		
Метод 62			
$\tau_{об}$	54,582	0,0327	0,981
$T_{об}$	135,84		
Метод 63			
T_1	76,986	0,021	0,998
T_2	105,05		



— вхідні дані; — Метод 40; — Метод 61; — Метод 62; — Метод 63

Рисунок 1.15 - Результати моделювання методами двох точок

1.2.2.4 Результати моделювання кривої розгону Методами 70 та 71

На рис. 1.16 та в табл. 1.4 наведено результати моделювання з використанням Методів 70/71, тобто апроксимації кривої розгону відповідним рівнянням аперіодичної ланки першого порядку із запізненням за формулою (19).

З використанням вбудованої функції datafit [11] для нелінійної обмеженої параметричної апроксимації вимірних даних було реалізовано два варіанти апроксимації: Методом 70 визначаються три параметри об'єкту керування: $K_{об}$, $\tau_{об}$, $T_{об}$; Методом 71 визначаються тільки час запізнення $\tau_{об}$ та стала часу $T_{об}$, коефіцієнт посилення $K_{об}$ визначається стандартним способом.

За результатами моделювання методом 70 отримали від'ємне значення відносної статичної похибки ERR, хоча за абсолютним значенням воно відповідає вимогам щодо точності (<0,05).

Також слід відмітити, що визначене в результаті апроксимації значення коефіцієнта підсилення ОК перевищує визначене стандартним способом. Отже можна передбачити, що змодельована з цими параметрами ОК крива розгону не досягне сталого значення за відведений час. Для перевірки цієї гіпотези були змодельовані криві розгону із значеннями параметрів, визначеними методами 70 та 71, тривалістю 2000 с (рис. 1.17). Як можна бачити, крива розгону ОК з параметрами, визначеними методом 71, досягне сталого значення за відсутності статичної похибки в момент часу 1100 с, замість тривалості вихідного експерименту 525 с. В той час як крива з параметрами за методом 70 стабілізується при 1300 с зі статичною похибкою у 0,14. Результати моделювання ставлять під сумнів коректність проведення експерименту по зняттю кривої розгону нагрівального пристрою, зокрема, визначеною тривалості експерименту.

Таблиця 1.4 – Результати моделювання кривої розгону з параметрами, визначеними Методами 70 та 71

Параметр	Автоматичне визначення	ERR	R2
Метод 70			
$K_{об}$	9,978	-0,0252	0,995
$\tau_{об}$	19,424		
$T_{об}$	217,695		
Метод 71			
$K_{об}$	8,750	0,0448	0,986
$\tau_{об}$	23,508		
$T_{об}$	160,902		

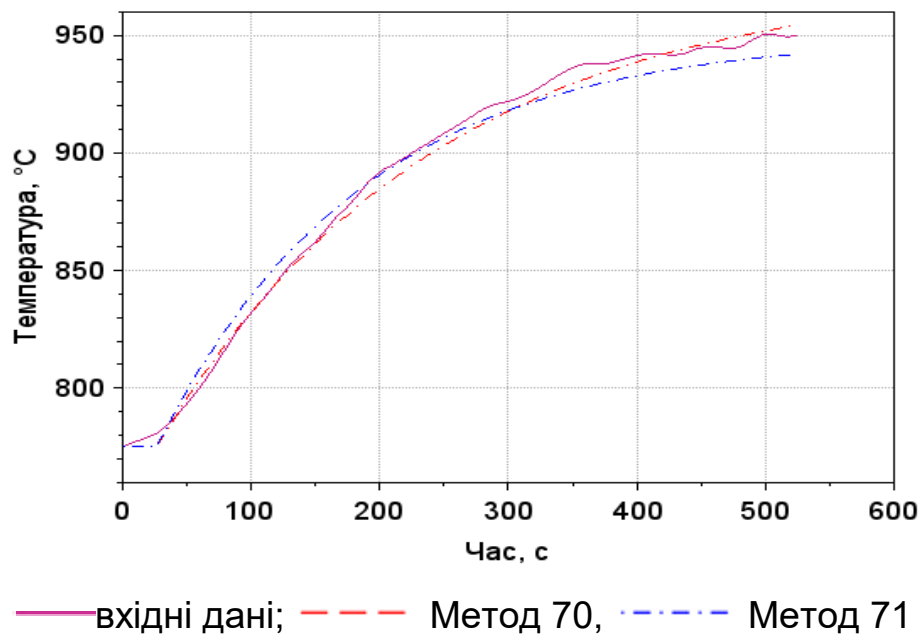
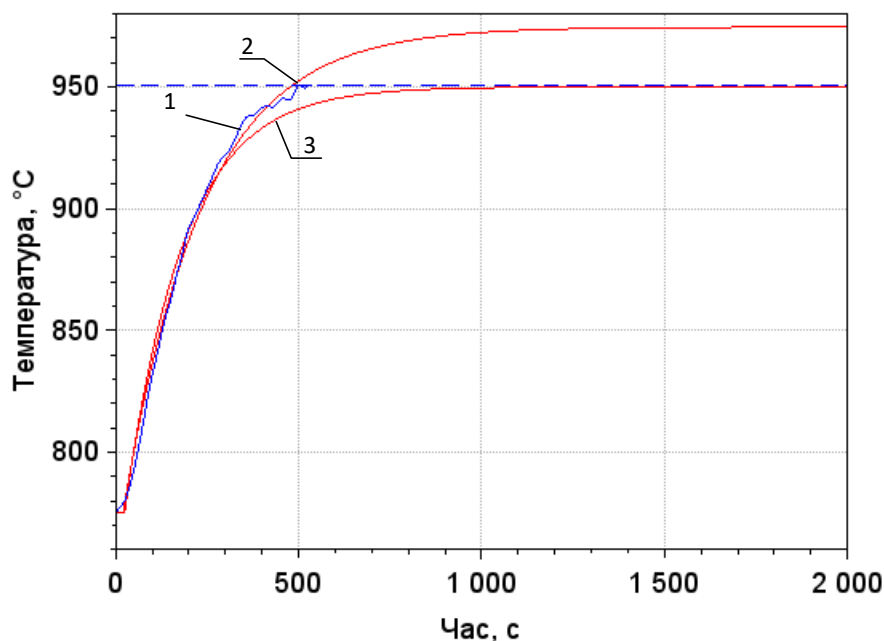


Рисунок 1.16 - Результати моделювання Методами 70 та 71



1 – вхідні дані, 2 – Метод 70, 3 – Метод 71

Рисунок 1.17 - Результати моделювання реакції ОК з параметрами, що визначені Методами 70 та 71, впродовж 2000 с

1.2.2.5 Результати моделювання кривої розгону Методами 80 та 81

На рис. 1.18 та в табл. 1.5 наведено результати моделювання з використанням Методів 80 та 81, тобто апроксимації кривої розгону відповідним рівнянням аперіодичної ланки другого порядку за формулою (20).

Аналогічно експерименту з Методами 70 та 71 було реалізовано два варіанти апроксимації: Методом 80 визначені три параметри: $K_{об}$, T_3 , T_4 ; Методом 81 визначені тільки параметри T_3 , T_4 ; коефіцієнт передачі $K_{об}$ визначається стандартним способом.

З наведених результатів можна бачити достатньо високий рівень відповідності змодельованих кривих розгону експериментальним даним.

Таблиця 1.5 - Результати моделювання кривої розгону з параметрами, визначеними Методами 80 та 81

Параметр	Автоматичне визначення	ERR	R2
Метод 80			
$K_{об}$	8,882	-0,009307	0,999389
T_3	67,385		
T_4	114,785		
Метод 81			
$K_{об}$	8,750	0,003374	0,999389
T_3	88,185		
T_4	88,181		

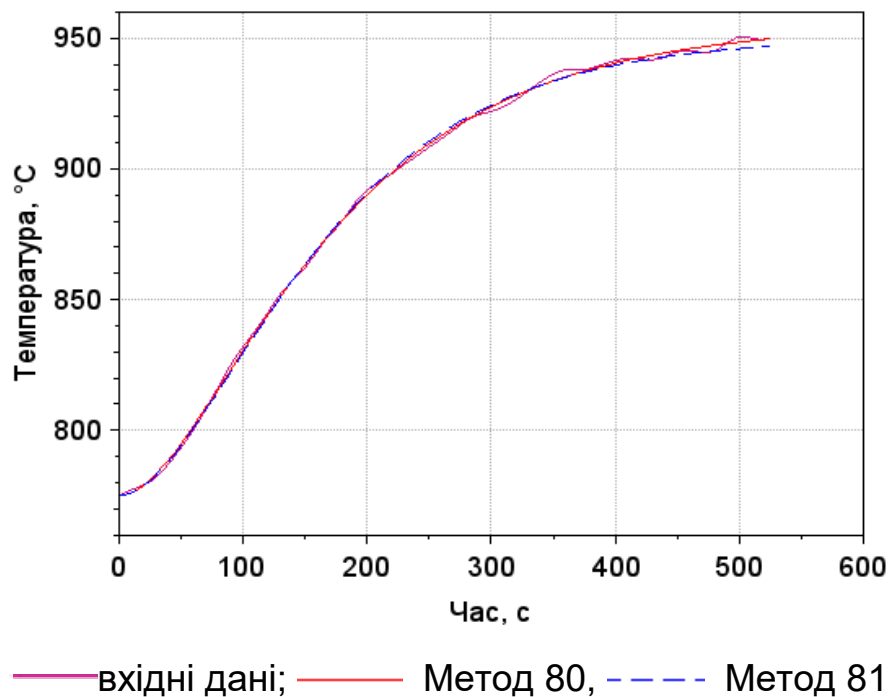


Рисунок 1.18 - Результати моделювання з використанням Методів 80 та 81

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ТА НАЛАШТУВАНЬ РЕГУЛЯТОРА НА ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ НАГРІВУ МЕТАЛУ

2.1 Загальний підхід до постановки задач дослідження

Для однозначного трактування поняття перехідних процесів та факторів, що на них впливають розглянемо це поняття більш детально. Перехідні процеси в системах автоматичного регулювання можуть мати різну форму, амплітуду та протяжність у часі. Це залежить від вхідного впливу, властивостей та параметрів об'єкта керування та налаштувань параметрів регулятора.

Вхідний вплив є рушієм процесів, які відбуваються в системі автоматичного регулювання. Розрізняють два види впливів: за збуренням (за навантаженням) та за завданням. Зазвичай розглядають тільки перехідні процеси які відбуваються під дією одного вхідного впливу. В системах автоматичного регулювання, в яких відбувається стабілізація значення технологічного параметра, розглядаються впливи за збуренням (за навантаженням). Такі впливи є зовнішніми відносно системи автоматичного регулювання. Вони зазвичай є шкідливими і заважають стабілізації параметра. При їх дії регульована величина відхиляється від заданого значення, а потім повинна повернутися до початкового заданого значення. Наприклад, це може бути стабілізація температури в томильній зоні методичної печі.

В системах автоматичного регулювання, в яких повинна відбуватися зміна значення технологічного параметра в часі, розглядають вхідні впливи за завданням. Такі впливи можна вважати внутрішніми цілеспрямованими впливами. Під їх дією значення параметра повинно змінитися від початкового заданого значення до кінцевого заданого

значення. Наприклад, це може бути зміна температури в нагрівальному колодязі при ступеневому нагріві.

В обох випадках розглядаються вхідні впливи прямокутної форми. Лінійні системи автоматичного регулювання мають такі властивості, що амплітуда вхідного впливу не впливає саме на форму перехідного процесу, а тільки на його амплітуду чи розмах. В реальних умовах роботи в системах автоматичного регулювання можуть відбуватися випадкові вхідні впливи, так що процес регулювання може бути змішаний з кількох перехідних процесів і мати нестандартну форму.

Об'єкт керування є невід'ємною складовою частиною системи автоматичного регулювання, а його властивості та параметри об'єктивно обумовлені конструкцією відповідного виробничого агрегату, та технологію виробництва. Таким чином об'єкт керування є пасивною складовою автоматичної системи регулювання і треба прийняти його таким як він є. Тому вплив об'єкта керування та його параметрів є постійним і від нього не залежать зміни у перехідних процесів.

Нарешті регулятор. Регулятор є тим технічним засобом чи програмною реалізацією в керуючому контролері (комп'ютері), який є активною складовою системи автоматичного регулювання. Налаштування його параметрів і в першу чергу коефіцієнта передачі регулятора впливають на форму перехідного процесу, його амплітуду (розмах) та на час регулювання. Тому за рахунок зміни параметрів налаштування регулятора ми можемо цілеспрямовано впливати на форму і показники перехідного процесу.

За своєю формою перехідні процеси можуть бути аперіодичні, гранично-аперіодичні, помірно коливальні, суттєво коливальні, незагасаючі та нестійкі. Дослідниками та практиками для практичного використання рекомендуються перехідні процеси від гранично-аперіодичного до помірно коливального з 40% перегулюванням. Звичайні аперіодичні процеси вважаються більш повільними і менш точними.

Суттєво коливальні процеси є дуже повільними та неточними. Незагасаючі та нестійкі взагалі призводять до непрацездатності системи автоматичного регулювання. Виділяють три стандартних рекомендованих типи процесів. Гранично-аперіодичний вважається найбільш швидким. Він має коефіцієнт перегулювання на рівні 0...4,32%. Перехідний процес з 40% перегулюванням вважається найбільш

точним. Для нього інтегральний показник якості у вигляді інтеграла квадрата відхилень (2.1) має найменше значення. Такий процес має коефіцієнт перегулювання на рівні 42,5%. Проміжне положення займає перехідний процес з 20% перегулюванням. Він відповідно має збалансоване співвідношення між швидкодією та точністю.

Для оцінки якості процесів регулювання та порівняння їх між собою використовується ряд параметрів. Найбільш важливими є динамічна помилка, час регулювання та інтегральний показник якості. Динамічна помилка характеризує точність перехідного процесу і дорівнює найбільшому відхиленню регульованої величини від заданого значення, яке зазвичай відбувається у першій напівхвилі коливань. Час регулювання характеризує швидкодію перехідного процесу і дорівнює відріzkу часу від вхідного впливу і до моменту, коли відхилення стає постійно менше заданої межі точності. Інтегральний показник якості одночасно характеризує точність і швидкодію і розраховується за формулою:

$$I = \int_0^{\tau_{\text{пер}}} \varepsilon^2 \quad (2.1)$$

де: $\tau_{\text{пер}}$ – час регулювання; ε – відхилення.

Оцінка перехідного процесу відповідними показниками є об'єктивною і цілком виправданою. Але вона відбувається з боку об'єкта керування. При цьому розглядається якийсь абстрактний керуючий вплив, який змінюється в часі за якоюсь закономірністю. Зазвичай його вимірюють

у безрозмірних відсотках ходу регулюючого органу. Треба відмітити, що зміна в часі керуючого впливу не завжди має правильну форму.

Але в реальній системі автоматичного регулювання з керуючим впливом пов'язані витрати якоїсь регулюючої речовини. Наприклад в нагрівальному пристрої це є витрати палива та витрати повітря. Таким чином керуючий вплив має матеріальне втілення, має кількісну і вартісну оцінку. Відповідно в залежності від перебігу перехідного процесу (процесу регулювання) буде залежати кількість палива і його вартість та кількість повітря, яке також має собівартість. В свою чергу вартість цих енергоресурсів є складовою собівартості металу і буде впливати на прибуток.

Відразу дати оцінку для цих залежностей досить складно. Але вірогідно така залежність існує. Тому представляє інтерес дослідити ці процеси та залежності. Це дасть можливість отримати відповіді на ряд питань:

1. Як впливає форма перехідного процесу на витрати регулюючої речовини (палива)?
2. Як впливають налаштування параметрів регулятора на витрати регулюючої речовини?
3. Що можна рекомендувати для зменшення витрат регулюючої речовини?
4. Чи можливо дати якісь додаткові рекомендації для налаштувань параметрів регулятора?

Для проведення досліджень необхідно побудувати ряд моделей. Модель нагріву заготовки металу необхідна для дослідження розподілу температур по перетину заготовки та визначення моменту закінчення перехідного процесу в її середині. При цьому на поверхню заготовки будемо подавати температуру, яка змінюється за відповідною формою перехідного процесу.

На першому етапі розглянемо одновірну модель у вигляді прямокутного стрижня з одного кінця якого відбувається дія температури рис. 2.1. Стрижень розіб'ємо на елементарні об'єми 1...n. На перший елемент діє зовнішня температура T_0 . В часі вона буде змінюватись відповідно до форми перехідного процесу. Далі тепло буде розповсюджуватися уздовж стрижня. Кожний елемент має температуру T та енергію Q . Зовнішній теплообмін крім передньої грані першого елемента відсутній.

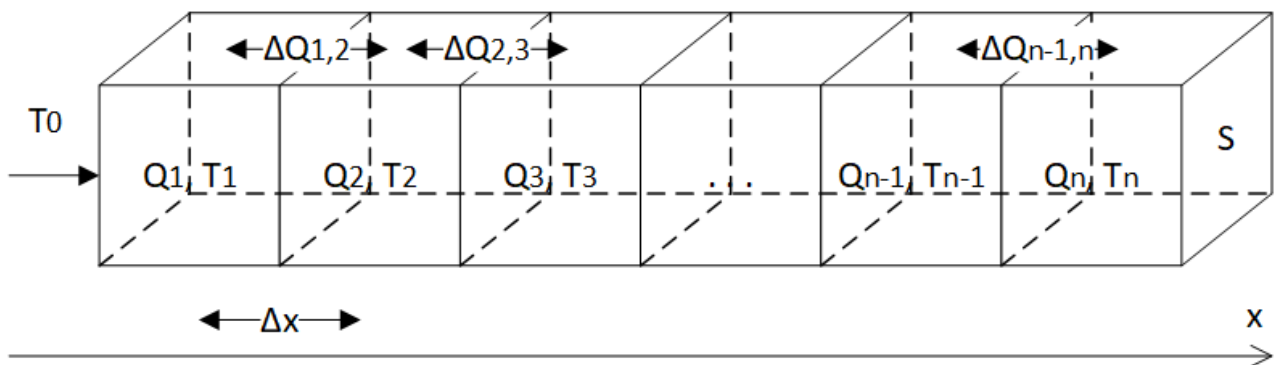


Рисунок 2.1 – Модель у вигляді стрижню

Теплообмін між елементарними об'ємами відбувається через дві грані за законом Фур'є:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} S \Delta \tau \quad (2.2)$$

де: ΔQ – кількість енергії; λ – коефіцієнт теплопровідності; $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ – градієнт температури; S – площа перетину стрижня; $\Delta \tau$ – крок часу.

Моделювання відбувається у просторі уздовж стрижня та у часі. Закінченням перехідного процесу будемо вважати момент часу, коли температура T вирівнялася в усіх елементах з заданою точністю.

Витрати палива будемо вважати пропорційними температурі. Очікуємо отримати залежності максимальної температури, часу регулювання та витрат палива від типу перехідного процесу та параметрів налаштувань регулятора.

На наступному етапі перейдемо до двомірної та/або тримірної моделі нагріву. Елементарний об'єм буде мати форму паралелепіпеду рис. 2.2. Теплообмін буде відбуватися одночасно через усі шість граней за рівняннями аналогічними (2.2).

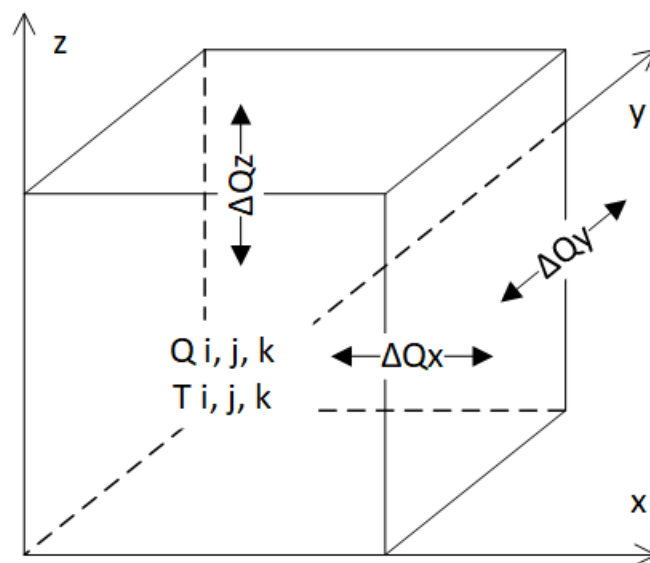


Рисунок 2.2 – Тримірна модель

Далі в планах побудова моделі зовнішнього теплообміну, та моделі для розрахунку зовнішньої температури в залежності від витрат палива та положення регулюючого органу.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОКАТНИМИ СТАНАМИ

3.1 Аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем контролю технологічних параметрів прокатних станів

Металургія та гаряча прокатка металів відрізняються складністю та різноманітністю технологічних процесів. Це визначає характер їхньої автоматизації. В даний час основними напрямками в комплексній автоматизації прокатних станів є ієрархічна побудова системи управління виробництвом в цілому, створення локальних систем автоматичного управління шляхом комплексної автоматизації окремих ділянок технологічної лінії стану, організація мікропроцесорного управління всім комплексом механізмів, починаючи зі складу слябів і закінчуючи моталками та складом рулонів (для технологічної лінії прокатного стану), а також створення інформаційно-вимірювальної системи збору, обробки, зберігання та видачі керуючої та статистичної інформації.

Клас завдань із управлінням прокатним виробництвом, вирішення яких практично відразу реалізується, а необхідна інформація надходить у міру розвитку виробничого процесу, вирішується локальними цеховими інформаційними системами. Ці системи розташовуються біля джерел інформації та виконують функції оперативного та технологічного управління. Такі локальні інформаційні системи в межах виробництва об'єднані в єдину інформаційно-вимірювальну систему (ІВС), побудовану за ієрархічним принципом.

Аналіз технологічних процесів прокатного виробництва [13 - 15] показав, що найбільш значущим технологічним завданням є контроль наявності та положення заготовок на технологічній лінії – організація системи інформаційного супроводу металу на лінії табору. Здійснення стеження за рухом кожного сляба, аж до передачі розкатоної і згорнутої в

рулон смуги на конвеєр, що охолоджує, відбувається за допомогою первинних перетворювачів, переважно фотоелектричного типу.

На рис. 3.1 наведено функціональну схему ІВС листового стану гарячої прокатки. Інформаційна система включає в себе підсистеми транспортної, технологічної та режимної автоматизації.

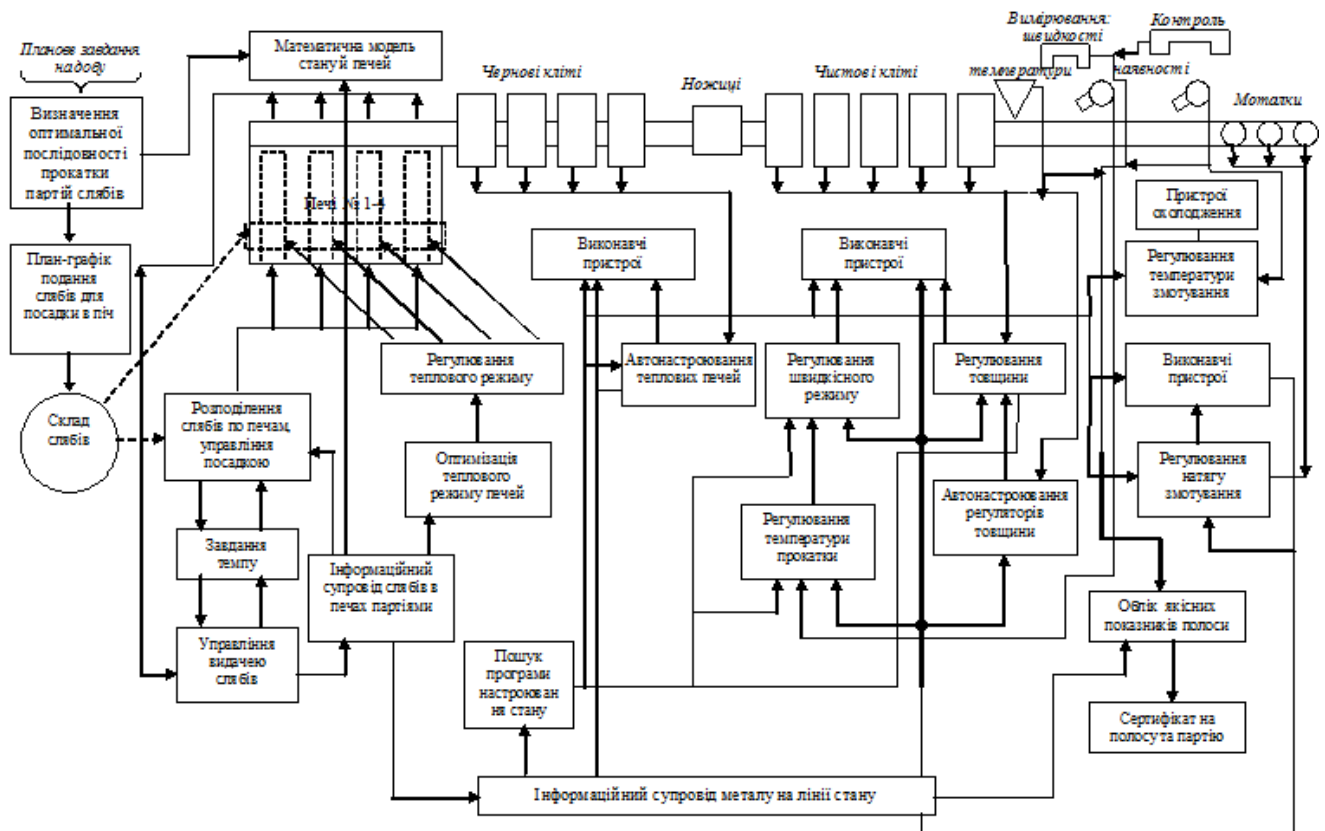


Рисунок 3.1 – Функціональна схема інформаційно-вимірювальної системи листового стану гарячої прокатки

Організація безперебійного, з одного боку, та ефективного (з малою часткою браку), з іншого боку, ходу технологічного процесу прокатки забезпечується на початковій його стадії – у пічному районі. Нестабільність часу нагріву злитків та часу їх прокатки на стані суттєво ускладнює роботу пічного району, ускладнюючи прогнозування часу закінчення нагріву злитків та часу звільнення печей для посадки нових

злитків. Збільшення часу знаходження злитків при високій температурі сприяє збільшенню чаду металу, при цьому не виключені і аварійні ситуації всередині самої печі через недостатню перешкодостійкість вимірювальних перетворювачів. Слабка організація виробництва, у пічному районі призводить, в такий спосіб, до зниження продуктивності всього стану. Для покращення становища,

Виданий з печі нагрітий сляб подається рольгангами до чорнової групи клітей, перед якими встановлений окалиноломач. Розкришена окалина видаляється з поверхні слябу гідрозбивом. При цьому мінливість температури слябів, що подаються в стан, визначає мінливість зусиль, що діють на валки, коливання величин силових деформацій клітей, і, як наслідок, коливання геометричних розмірів прокатного профілю, неузгодженості швидкостей металу на окремих ділянках технологічної лінії стану.

Вирішення перелічених завдань можна здійснити шляхом створення автоматизованої інформаційної системи стеження за слябами в пічному районі.

Ножиці служать для відрізання переднього витягнутого кінця розкатаного сляба без зупинки його рольгангу перед чистової групою клітей. Відрізання переднього кінця має на меті зменшення освіченої гострої "мови", що часто призводить до забурювання металу в клітях і в моталках. Команда включення приводу ножиць дається фотоелектричним вимірником товщини, встановленим перед ножицями, коли ширина переднього кінця досягає 70-80% номінальної. На момент сходження ножів передній кінець, просуваючись через ножиці, досягає ширини, близької номінальної. Точність різку та кількість відходів металу визначається головним чином швидкістю смуги, точністю та швидкодією первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) інформаційної системи контролю параметрів різку.

Часта зміна типорозмірів смуг, що прокочуються, означає часту перебудову стану і неминучу втрату часу для ретельного виконання цієї перебудови для зменшення виходу шлюбу і других сортів. Витрата часу на перебудову посилюється втратами металу при обрізанні через неминучу зміну швидкості прокатки.

Підвищення продуктивності стану пов'язано, передусім, із вибором максимальної швидкості руху смуги на стані. Тому, актуальним завданням є скорочення або виключення втрат часу на різання переднього та заднього некондиційного кінців смуги, що можливо досягти оптимальним компонуванням агрегату для різання металу або оптимальним керуванням швидкістю смуги в зоні різку. Слід зазначити, що летючі ножиці, що коливаються, дозволяють різати листи прокату з точністю до 0.8 мм, але тільки при швидкості не більше 2.0 м/с, що обумовлено досить високою інерційністю використовуваних первинних вимірювальних перетворювачів. Друге рішення більш перспективне, оскільки повністю здійснюється інформаційно-вимірювальною системою та підсистемою оптимізації різання прокату. Значна ширина та товщина підкату, широкий діапазон швидкості різання та руху смуги висувають підвищені вимоги до якості інформаційного забезпечення об'єкта управління. ІВС визначає момент запуску ножиць в умовах різної величини швидкості смуги та зміни її швидкості під час різку, що сприяє підвищенню точності різку, а отже, і зменшенню відходу металу. При цьому точність, швидкість і достовірність одержуваної первинної інформації визначається, в основному, точністю, швидкодією та перешкодозахисністю застосовуваних ПВП. Саме вони визначають основні технологічні, метрологічні та швидкісні показники всієї системи.

Отже, ефективність системи визначається швидкісними та якісними показниками первинних перетворювачів, що використовуються. ІВС визначає момент запуску ножиць в умовах різної величини швидкості смуги та зміни її швидкості під час різку, що сприяє підвищенню точності

різу, а отже, і зменшенню відходу металу. При цьому точність, швидкість і достовірність одержуваної первинної інформації визначається, в основному, точністю, швидкодією та перешкодозахисністю застосовуваних ПВП. Саме вони визначають основні технологічні, метрологічні та швидкісні показники всієї системи.

Відповідно до вимог до точності та швидкодії, що пред'являються до ряду вітчизняних (за чинними нормативами) та зарубіжних (наприклад, вимоги Національного Бюро Стандартів, США) систем оптимізації різання швидкодія їх має бути не менше 1100 вимірювань за секунду (~ 0.9 мс), для забезпечення заданої точності різання за необхідної швидкості різання. Існуючі вимірювальні перетворювачі фотоелектричного типу мають швидкодію на рівні 10...50 мс. Це зумовлює необхідність підвищення швидкості обробки інформації у фотоелектричних перетворювачах практично в 10 разів.

Дослідження стану автоматизації станів гарячої прокатки і ряду аналогічних виробництв показали, що існуючі фотоелектричні вимірювальні перетворювачі аналогового та імпульсного типу при роботі в умовах інтенсивних оптичних та електромагнітних перешкод, забезпечуючи ймовірність появи помилки контролю на рівні 10^{-3} , не відповідають повною мірою вимогам та достовірності формованої інформації. Це призводить до аварійних ситуацій у роботі прокатного стану (забурювання, заклинювання слябів у виконавчих пристроях, поломка обладнання) та, як наслідок, до значних матеріальних втрат.

На прокатних станах швидкість руху смуги в межах кожної групи клітей (або ділянок стану) збільшується в міру зниження її товщини і може змінюватися по довжині смуги за час прокатки в кліті. Тому швидкісний режим слід розглядати у функції часу прокатки, що змінюється в залежності від технологічної операції: транспортування смуги зі швидкістю прокатки в останній чорновій кліті; транспортування смуги на підвищеній швидкості проміжним рольгангом до рольгангу перед ножицями;

транспортування смуги рольгангом перед ножицями у режимі гальмування до швидкості різання 0.4...2.8 м/с та подальше зниження швидкості до швидкості підкату в першу чистову кліть.

Зважаючи на наявність перехідних зон між зазначеними ділянками, тривалість яких залежить від низки випадкових факторів, величину часу транспортування підкатом можна розглядати як випадкову величину, що підпорядковується нормальному закону розподілу. Це положення справедливе і підтверджено експериментально для станів з нерегульованою швидкістю прокатки в останній чорновій кліті - стани 1680, 1700, 2000 [16].

Імовірнісний характер часу транспортування слябу (підкату) між ділянками прокатного стану визначає велике значення первинних вимірювальних перетворювачів для реалізації інформаційного супроводу металу на стані та організації управління швидкісним режимом прокатки.

Різні швидкісні режими прокатки повинні сприяти надійному захопленню смуги робочими органами клітей, моталкою, робити надійне різання прокату, забезпечуючи високу продуктивність стану. Слід зазначити, що підвищення продуктивності прокатного стану можливе за рахунок підвищення швидкості прокатки (більше 20 м/с на тонколистових станах), а надійне захоплення переднього кінця моталками поки можливе лише при швидкості руху смуги не більше 10...11 м/с, а різання прокату - при 0,4...2,8 м/с. Виконання цих вимог обумовлює застосування оптимальних швидкісних режимів на окремих ділянках стану, адекватних якісним показникам первинних вимірювальних перетворювачів, що використовуються, що в більшості випадків призводить до зниження продуктивності за рахунок низької швидкодії використовуваних вимірювальних перетворювачів.

Вирішення завдання на користь продуктивності можливе шляхом створення або удосконалення ІВС контролю технологічних параметрів прокатного стану шляхом підвищення достовірності вимірювальної

інформації та швидкодії системи інформаційного супроводу металу на технологічній лінії прокатного стану.

Зміна швидкості в процесі прокатки, особливо в автоматичному режимі роботи стану пред'являє підвищені вимоги до швидкості реакції (швидкодії) системи на зміни технологічних параметрів прокатки і достовірності отриманої первинної інформації, що забезпечує своєчасність і надійність вимірювання параметрів прокатки при русі металу на різних ділянках стану.

Визначальну роль достовірність отриманої первинної інформації та швидкодії системи контролю відіграє при усуненні передаварійних та аварійних ситуацій на стані ("загортання" переднього кінця після чорнової кліті, надзвичайно висока швидкість смуги, забурювання металу при транспортуванні та заклинювання його в обладнанні), що забезпечує підвищення ефективності роботи стану, економію ресурсів та матеріальних засобів.

Для попередження аварійних ситуацій та підвищення ефективності системи управління станом та виробництвом в цілому, необхідно підвищувати швидкість реакції інформаційно-вимірювальної системи на динаміку зміни технологічного процесу, скорочувати час на опитування безлічі вимірювальних перетворювачів, що можливо за рахунок підвищення швидкодії їх вимірювальних каналів.

Ці обставини визначили першочергове вирішення завдань підвищення достовірності вимірювальної інформації та швидкодії ІВС контролю за технологічними параметрами прокатних станів з метою підвищення ефективності системи контролю та продуктивності прокатного стану.

Наведені приклади свідчать про значущість проблеми забезпечення систем контролю технологічних параметрів прокатних станів високонадійними безконтактними вимірювальними перетворювачами, здатними працювати в екстремальних умовах металургійного

виробництва, забезпечуючи високу достовірність та швидкодію контролю. Особливо важливу роль вони відіграють для нагрівальних печей, де є обмежений арсенал методів і технічних засобів контролю наявності, руху або досягнення заданого положення металу різного теплового стану в умовах, екстремальних за температурою та іншими перешкоджаючими факторами, зокрема оптичним перешкодам. Вони дозволяють вирішувати транспортну, технологічну та режимну автоматизацію як усієї лінії, так і окремих ділянок прокатних станів.

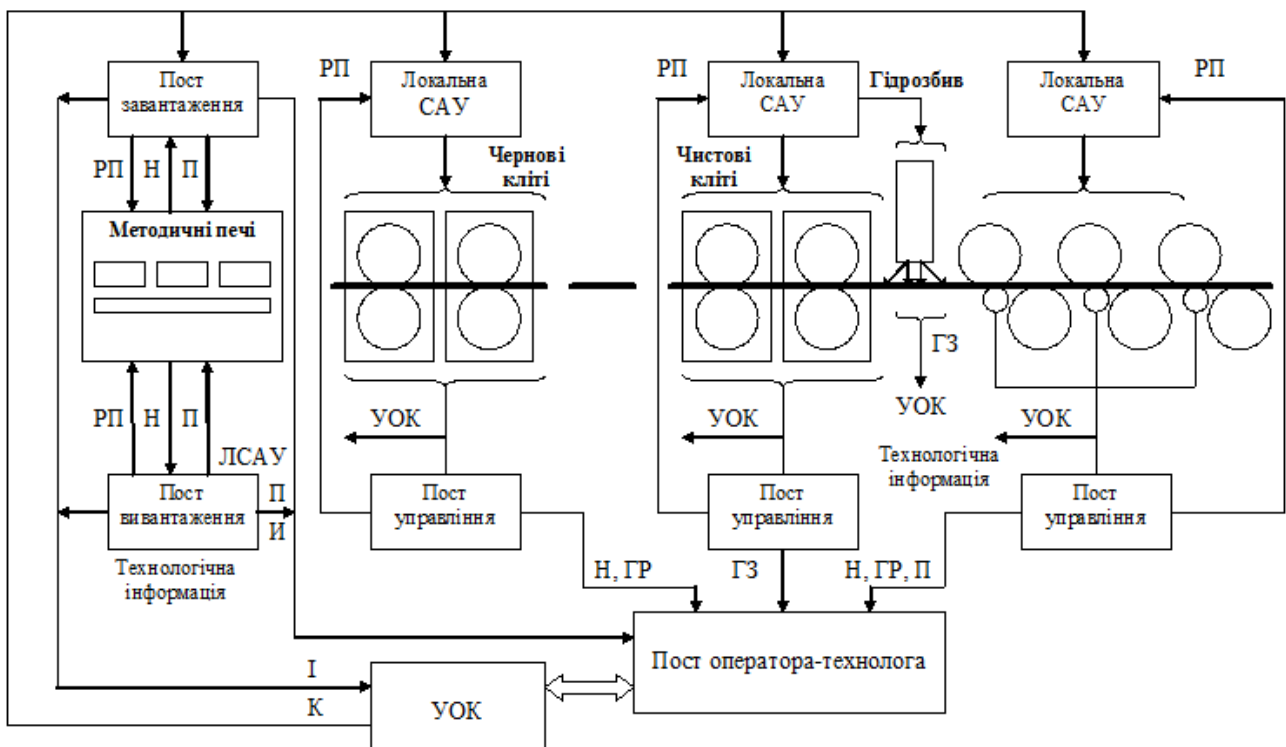
3.2 Аналіз способів та засобів формування первинної виробничої інформації в інформаційно-вимірювальних системах контролю технологічних параметрів прокатних станів

У технологічній схемі прокатного виробництва оброблюваний метал неодноразово піддається процесу нагрівання, внаслідок чого різко погіршуються умови роботи засобів, що формують первинну виробничу інформацію. Разом з тим, подальше вдосконалення технологічних процесів пов'язаних з нагріванням металу, розширення сортаменту прокатної продукції та підвищення вимог до її якості зумовлює необхідність поліпшення якості управління на основі швидкого та достовірного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи необхідною виробничою інформацією, що формується первинними перетворювачами в екстремальних умовах.

Аналіз функціональної схеми комплексної автоматизації прокатного стану (рис. 3.2) показує, що обсяг необхідної виробничої інформації визначається технічними завданнями контролю об'єктів (наявності – Н, положення – П, якості гідрозбиву (наявності окалини) – ГЗ та вимірювання їх розмірів – ГР). Реалізація зазначених завдань в даний час здійснюється за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків наявності, положення, вимірювання довжини та товщини), що

ґрунтуються на різних фізичних принципах роботи. Наприклад, на радіоізотопному випромінюванні – при контролі положення слябів у методичних печах та вимірюванні товщини прокату, на обкатному методі – при вимірюванні довжини прокату, на оптичному випромінюванні – при виявленні та вимірюванні розмірів.

Значну частину технологічного та метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальної, а так само, як і всієї системи управління сучасного прокатного стану становлять контрольно-вимірювальні пристрої. Так при автоматизації широкосмугових станів (ШСС) гарячої прокатки використовується до тисячі одиниць таких пристроїв, причому понад 20% їх – фотоелектричного типу [16].



Н – наявність, П – положення, ГР – геометричні розміри, ГЗ – якість гідрозбиву, І – інформація, К – команди, ЛСАУ – локальні САУ, РП – регулюючі пристрої, УОК – управляючий обчислювальний комплекс

Рисунок 3.2 – Функціональна схема системи комплексної автоматизації стану гарячої прокатки

Істотний внесок у розробку та створення ряду спеціалізованих пристроїв контролю параметрів прокатних станів внесли такі зарубіжні фірми: Sick, AEU Telefunken, Exatest, Leuce Elctronic (Німеччина), Nerton Electronica Industriale (Італія), Orbis (Англія), Delta (Франція), Omron Tateisi Electron, Ходенсейміцу К, Мацусіта Міцубісі (Японія), Kelk (Канада), ряд фірм США [15, 16].

Роботи, що розглядають питання передачі, прийому та виділення радіосигналів на тлі інтенсивних виробничих перешкод, є теоретичною основою для аналогічних процесів при розробці інформаційних систем. У цій галузі відомі основоположні роботи академіка Котельникова Ю.Ф., Харкевича А.А., Зінов'єва А.А., Лучука О.М., в яких розглянуті питання потенційної перешкоди при виявленні бінарних сигналів на тлі перешкод, спектри перешкод і сигналів, аналіз та синтез приймальних пристроїв [16, 17].

3.3 Система автоматичного стеження за слябами у пічному районі

Автоматичне управління технологічними процесами на технологічних лініях прокатних станів, зокрема на ділянках нагрівальних та термічних печей прокатного виробництва, передбачає обов'язкове використання інформації про метал. Наявність великої кількості заготовок на об'єктах контролю, необхідність їх ідентифікації, підвищені вимоги до достовірності інформації та складність її відновлення при перекручуваннях – становлять специфіку завдання інформаційного супроводу металу. Характерною особливістю тут не лише необхідність ідентифікації стану об'єкта, а й факт переходу його з одного стану в інший. Це визначає важливість завдання розробки методів і засобів підвищення ефективності забезпечення інформаційно-вимірювальних систем прокатних станів інформацією про просторове розташування металу, що нагрівається. Також виникає необхідність обліку роботи локальних систем

управління з ініціативними джерелами інформації, для яких неприпустима затримка або втрата інформації, оскільки це призводить до відмов у роботі системи управління станом, що веде до значних матеріальних втрат через аварійні ситуації.

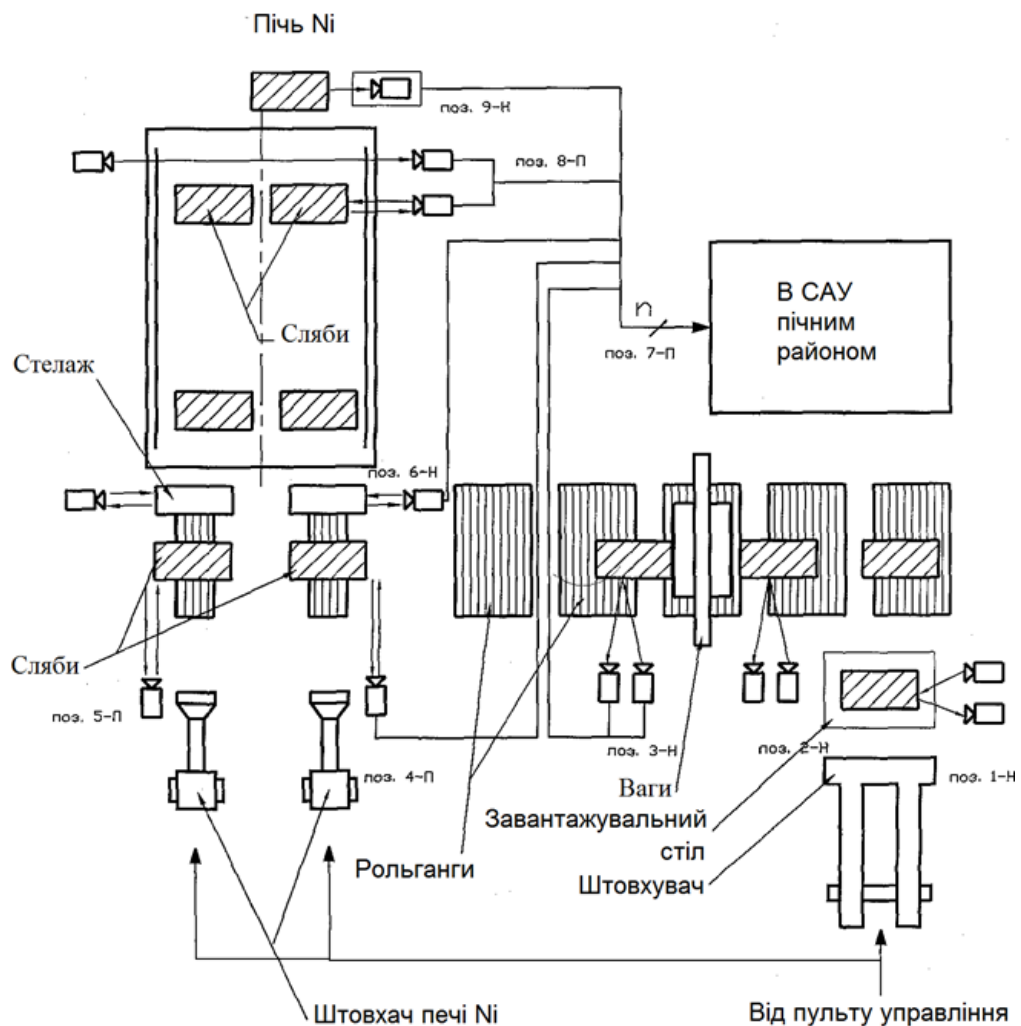
Значимість безконтактних високонадійних вимірювальних перетворювачів особливо видно на ділянці нагрівальних печей. Основними функціями засобів збору інформації тут є стеження за розташуванням та просуванням слябів у печах, за порядком розсаджування заготовок по печах та управління видачою нагрітих слябів. При цьому потрібно більше десяти позицій контролю наявності та положення слябів, особливо в місцях з дуже важкими (екстремальними) умовами збору інформації через високу температуру та наявність оптичних та електромагнітних перешкод – на посадці слябів перед методичною піччю, при контролі кромки слябів на глісажних трубах у зварювальній зоні. Таким чином, фотоелектричні датчики положення є важливою невід'ємною частиною системи інформаційного супроводу металу на технологічній лінії прокатного стану.

Застосування засобів первинного контролю технологічних параметрів прокатного стану зумовлює підвищення ефективності цих систем [14, 16].

Розглянемо особливості побудови таких систем автоматизації процесів прокатки [15, 18, 19].

З аналізу відомо, що слабка організація виробництва у пічному районі призводить до зниження продуктивності всього стану. Вирішення цієї задачі є можливим шляхом створення локальної автоматизованої інформаційної системи стеження за слябами в пічному районі. Застосування системи контролю заготівель в умовах інтенсивних оптичних перешкод пічного району дозволяє підвищити продуктивність та енергоефективність роботи стану в цілому.

Функціональна схема системи автоматичного стеження за слябами в пічному районі з урахуванням оптичних локаторів показано на рис. 3.3.



САУ – система автоматичного управління; Н – індикатор наявності;
 П – індикатор положення; ПОЗ – номер позиції контролю

Рисунок 3.3 – Система автоматичного стеження за слябами в пічному районі

У міру необхідності сляби зі штабелів за допомогою кранів передаються на приймальні стелажі стану (позиція 1), звідки транспортуються завантажувальними рольгангами на ваги (контрольні позиції 2 і 3), після чого вони передаються до завантажувальних вікон методичних нагрівальних печей (позиція 6). Завантаження слябів у піч та їх проштовхування через піч здійснюється штовхачем (позиція 4 та 5).

Коли черговий сляб упирається у ряд посаджених слябів (позиція 7), штовхач проштовхує цей ряд через піч. Крайній сляб, з боку вікна видачі печі, просуваючись до короба печі (позиція 8), скочується похилою плитою на пічний рольганг стану (позиція 9), що зв'язує піч з першою батоном стану. На позиціях контролю встановлюються фотоелектричні датчики, причому позиції 8 використовується не оптичний локатор, а перетворювач сигналу.

При нормальній роботі стану нагрівальні печі повинні видавати сляби через рівні інтервали часу з мінімально можливими коливаннями температури окремих слябів, що з вимогою сталості геометричних розмірів готових смуг.

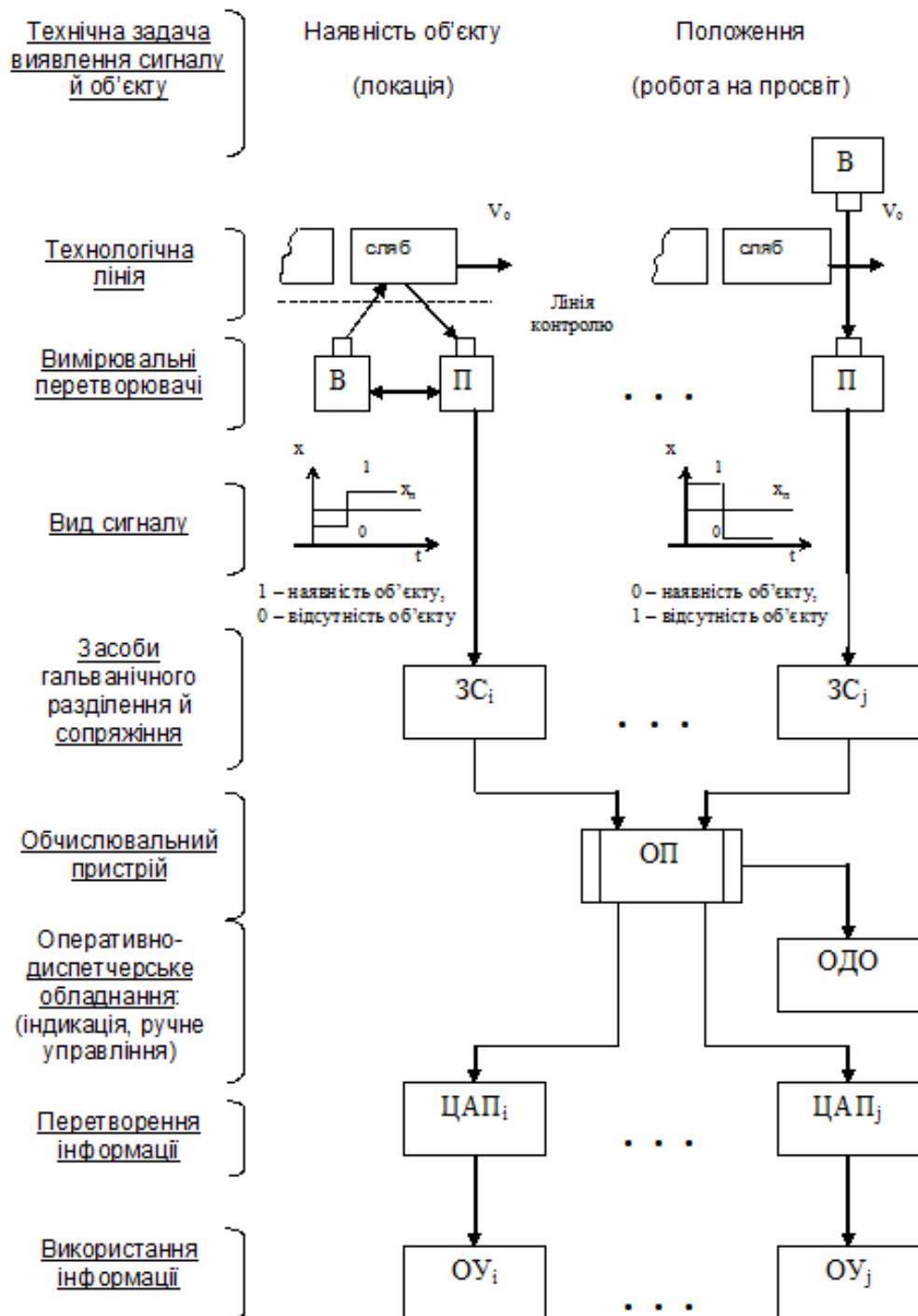
Таким чином, одним із завдань системи управління посадкою і видачею слябів є автоматичне завдання моментів початку роботи штовхачів відповідно до темпу прокатки, що задається.

ІВС стеження за слябами в пічному районі на базі оптичного локатора наведено на рис. 3.4.

Ядром системи є обчислювальний пристрій (мікропроцесорний блок), де зберігається інформація про час нагрівання та звільнення печей, про марки сталі кожної плавки, замовлення, на підставі яких зливки цієї плавки повинні бути прокатані, і про кінцеві розміри металу після прокатки. Інформація про становище злитків у печах передається диспетчеру та механізми управління подачею злитків.

Поряд з інформацією про зливки, що надходять у печі, у кожний даний момент система має інформацію про фактичний стан печей, їх готовність, кількість залишених ще не виданих, але нагрітих злитків, положення виданого зливка до моменту передачі його на приймальний рольганг першої кліті, становище всіх штовхачів та злитків до печі.

Інформаційна частина системи забезпечує передачу з кожним новим зливком у систему управління станом всієї вихідної інформації, необхідної визначення подальшої обробки зливка на лінії прокатного стану.



В – випромінювач; П – приймач; ЗС – засоби сполучення; ОП - обчислювальний пристрій; ОДО – оперативно-диспетчерське обладнання; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ОУ – об'єкт управління

Рисунок 3.4 – ІС стеження за слябами в пічному районі

Аналіз досліджуваного питання дозволив сформулювати висновки.

1. Системи контролю технологічних параметрів прокатних станів вимагають значного асортименту первинних вимірювальних перетворювачів різного функціонального призначення до роботи на екстремальних умовах теплотехнічних цехів. Ці умови негативно впливають на якість контролю, знижуючи точність і достовірність одержуваних результатів, що зумовлює значні матеріальні втрати та виникнення аварійних ситуацій під час роботи стану. Це своє чергу знижує ефективність роботи стану загалом.

2. Створення сучасних комплексів із засобами контролю з високою завадостійкістю та швидкодією для систем управління складними теплотехнічними процесами є актуальним завданням з економічної та науково-технічної точок зору. Це зумовлено неприпустимістю затримки чи втрати інформації на стадіях контролю, передачі та зберігання виробничої інформації для організації ефективного та безаварійного технологічного процесу прокатки.

Проведений аналіз дозволив сформулювати завдання цього дослідження - аналіз існуючих та визначення нових способів отримання первинної інформації про стан процесу прокатки для підвищення ефективності роботи обладнання та стану в цілому.

4 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ, АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМ ВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В АСУ ТП

4.1 Існуючі технічні засоби, алгоритмічне та програмне забезпечення

Один із найважливіших пріоритетів розвитку виробництва полягає в переході до його цифровізації. Широке використання цифрових технологій може сприяти економічному зростанню та створити синергетичний ефект, що охоплює економічні, соціальні, технологічні, інтелектуальні та інфраструктурні аспекти розвитку.

У статті [20] представлені основні напрями цифровізації, які революціонізують виробництво:

1. Віртуальний інжиніринг як сучасний підхід до проектування, налагодження та експлуатації процесів. Створення високотехнологічних виробів та виробництв є комплексною задачею, що включає наукові, проектно-конструкторські, технологічні та виробничі аспекти. Віртуальний інжиніринг процесів включає як проектування виробничого та додаткового обладнання, очисного устаткування, так і засобів та систем автоматизації технологічних процесів і екологічного моніторингу на всіх етапах виробництва.

2. Використання цифрових двійників у виробництві, що визначається тими характеристиками, які слід оптимізувати щодо самого виробу або технології його виробництва, з використанням симуляційних моделей у формі цифрових даних.

Технічне та програмне забезпечення автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП), без яких неможливі обидва напрями, включає декілька підсистем, але базовою є інформаційна підсистема. Технологічні прориви у сфері моніторингу процесів,

управління та промислової автоматизації суттєво сприяли підвищенню продуктивності промисловості і виробництва. Ключовим вимогам відповідає точний і ефективний механізм збору даних, що здійснюється за допомогою різноманітних датчиків, зокрема для збору, аналізу та сортування об'єктів і елементів.

Такі функції як опитування технологічної інформації, її обробка та передача на верхній рівень, реалізація управляючих дій зазвичай реалізовані в програмованих логічних контролерах (PLC), інші функції (отримання інформації з PLC, занесення в базу даних поточної інформації, обслуговування робочих місць оператора-технолога та оперативного персоналу АСУТП і т.д.) реалізовані на комп'ютерах верхнього рівня.

Структура і алгоритми функціонування цієї підсистеми істотно залежать від кількості вхідних сигналів, їх типів, подальшого використання в інших підсистемах.

На сьогоднішній час є декілька невирішених питань, пов'язаних з роботою інформаційних систем:

1. Під час проектування інформаційної підсистеми необхідно вибрати та реалізувати:

- способи опитування датчиків, інтервали опитування для кожного сигналу чи групи сигналів;

- алгоритми обробки інформації, в тому числі фільтрації.

Зазвичай вимоги щодо реалізації способів опитування та алгоритмів обробки інформації замовниками АСУТП не сформульовані, а конкретні рекомендації виходять з досвіду експлуатації систем та не завжди обґрунтовані.

2. В процесі роботи АСУТП трапляються ситуації виходу з ладу датчиків основних технологічних параметрів чи іншого обладнання для передачі сигналу до контролера чи комп'ютера. В цьому випадку управління агрегатом переводять на ручний режим.

У роботі [21] автори описують методи обробки великих масивів даних, такі як спектральний аналіз, кореляційний аналіз і метод фільтрації сигналів. Ці методи застосовуються з використанням адаптивного алгоритму дискретизації, який вибирає лише екстремуми аналогового сигналу і фіксує час їхнього виникнення та амплітудні значення.

У статті [22] розглядаються моделі для обробки аналогових сигналів, які базуються на тригонометричних сплайнах. Обговорюється проблема перетворення аналогових сигналів в цифрову форму та їх наступну обробку. Особлива увага приділяється гладкості аналогових інформаційних сигналів, яка визначає їхнє поведінку в області навколо будь-якої точки заданої сигнальної області. Виділяється клас сигналів з відомими диференціальними властивостями. Розглядається моделювання інформаційних сигналів за допомогою тригонометричних сплайнів, а також аналізуються переваги та недоліки цих сплайнів. Проводиться інтерполяція за допомогою відомих функцій тригонометричних сплайнів, в результаті чого виявляється ефект Гіббса як на краях, так і в середині інтерполяційного відрізка. Окремо розглядається вплив порядку тригонометричного сплайна на похибку інтерполяції.

У роботі [23] розглядається створення функціонального і універсального логічного аналізатора, який може одночасно захоплювати і аналізувати 24 цифрових і 8 аналогових сигналів. Для забезпечення мобільності та універсальності пристрою, а також реалізації як локального, так і дистанційного доступу, передбачено декілька інтерфейсів. В роботі також реалізовано захист цифрової і аналогової частин від перепадів напруги та імпульсного збільшення струму.

У статті [24] досліджено вплив параметрів фільтра низьких частот на основну похибку перетворення при обробці аналогових сигналів аналого-цифровим перетворювачем. Досліджено, що якісний прийом аналогового сигналу має значний вплив на точність перетворення в цифровий код, і

використання фільтра низьких частот є доцільним для забезпечення цього прийому. Зазначено, що використання цифрового фільтра сприяє підвищенню точності і швидкості перетворення аналогової інформації в цифровий код. Встановлено, що процедура нормалізації сигналів передбачає повне або часткове усунення впливу перешкод під час одночасної обробки інформаційної частини сигналу.

Нова схема цифрової компенсації, що представлена в [25], призначена для вимірювання, оцінки та корекції лінійних, слабо змінюваних в часі аналогових помилок в аналого-цифрових перетворювачах з чергуванням частот (FI-АЦП). Цей метод включає три значні покращення порівняно з існуючими підходами: використання розподілу Вігнера-Вілля для кращої оцінки спектру нестационарної частотної характеристики аналогового каналу (ACFR), передбачуваний спектр ACFR апроксимується раціональною поліноміальною моделлю, а задача мінімізації l_1 -норми вирішується за допомогою методу подвійної глобальної оптимізації з простим розслабленням. Крім того, схема цифрової компенсації розроблена з використанням передбачуваного алгоритму стабілізації біспряженого градієнта, що забезпечує ефективне обчислювальне рішення. Проведені чисельні експерименти підтвердили ефективність і досяжність запропонованого методу.

Останнім часом зафіксоване зростання інтересу до концепції цифрового двійника (ЦД) в промисловості та наукових колах, проте використовуються різні визначення цього терміну. Так, робота [26] спрямована на консолідацію досліджень, оцінок та розвитку цієї теми з метою забезпечення наукової обґрунтованості майбутніх досліджень. За допомогою систематичного огляду літератури та тематичного аналізу біля ста публікацій про ЦД за останні роки автори надають характеристику цього концепту, виявляють прогалини у знаннях та потребуючі подальших досліджень. Вони вивчають різні підходи, ключову термінологію та пов'язані з нею концепції, визначають 13 основних характеристик, а також

структуру та процес роботи цифрового двійника. У роботі визначені ключові напрямки майбутніх досліджень, включаючи переваги, етапи створення та розвитку ЦД, приклади застосування, технічні реалізації та інше.

Стаття [27] аналізує понад 50 попередніх публікацій, патентів та результатів досліджень, проведених провідними світовими компаніями, з метою узагальнення поточного стану досліджень та застосувань цифрових двійників. В ній розглядаються основні технології для моделювання ЦД, симуляції, верифікації, валідації та атрибуції (VV&A), об'єднання даних, взаємодії та співпраці, а також обслуговування. Також узагальнюються поточні дослідження щодо впровадження цифрових двійників, зокрема їх застосування у різних галузях. Автори зазначають, що найбільша популярність ЦД спостерігається у PHM (прогнозування, діагностика та управління станом), де моделювання є основою цифрових двійників, а основною проблемою є кіберфізичний синтез. Також ідентифіковано дві перспективні сфери застосування: оптимізація диспетчеризації та оперативне управління. Автори вважають, що підвищення життєздатності цифрових двійників необхідно вирішити шляхом розробки єдиного методу моделювання ЦД.

В роботі [28] описано систему оптимального управління процесом безперервного розливання сталі на основі моделі цифрового двійника. Система призначена для скоординованої оптимізації та динамічного керування вторинним охолодженням та остаточним електромагнітним перемішуванням (FEMS) та складається з трьох взаємопов'язаних частин. По-перше, створюється тривимірна модель теплопередачі в реальному часі як цифровий двійник процесу теплопередачі при безперервному розливанні; для високої точності він калібрується в автономному режимі (можливо калібрування онлайн) з використанням вимірювань температури поверхні та товщини оболонки (тільки в автономному режимі). По-друге, відповідно до металургійних правил охолодження та

перемішування оптимізуються узгоджено на основі встановленої моделі цифрового двійника та алгоритму оптимізації рою частинок хаосу. Потре, охолодження та перемішування додатково динамічно контролюються для забезпечення стабільності якості. Після введення системи зменшилися помилки діючої математичної моделі та помилки управління, що вплинуло на якість зливків.

При використанні штучного інтелекту для розв'язання складних проблем в промисловості підходи варіюються залежно від доступності досліджень і літератури, що накопичені в процесі вирішення аналогічних завдань. У статті [29] спочатку обговорюється пошук і вибір корисних досліджень і літератури. Якщо існують добре відомі дослідження у галузі штучного інтелекту, наступним кроком стає вибір відповідної платформи ШІ. У протилежному випадку виникає основна перешкода — як інтегрувати знання в галузі виробництва та технології штучного інтелекту. В статті також наводиться рішення для цієї проблеми, яке дозволяє інженерам підприємств використовувати штучний інтелект на повний обсяг, адаптуючи його для своїх потреб, а не покладаючись на фахівців з обробки даних. Також розглядається управління на основі штучного інтелекту, що є одним з перспективних застосувань.

В огляді [30] представлено своєчасне дослідження кількох нових архітектур нейронних мереж (НС) та методів навчання після короткого огляду основ нейронних мереж та деяких важливих пов'язаних з ними проблем. Використання нейронних мереж, включаючи моделі глибокого навчання, в наукових дослідженнях дає безліч переваг, а також розуміння нових методів, які краще підходять для певних додатків. Нарешті, кілька розвинених і альтернативних парадигм навчання, що з'являються, розглядаються на предмет їх потенційної користі для майбутніх досліджень. Оглядова література і обговорення, що супроводжує її, мають загальну цінність, що виходить далеко за рамки металургії сталі, і можна багато чого отримати від оцінки методів, що використовуються в інших

галузях матеріалознавства і за її межами, щоб застосувати їх до чорної металургії.

Разом з цим, на думку авторів, є можливість розробити алгоритми управління об'єктом в замкнутому режимі протягом часу, достатнього для оперативної заміни вказаних вище технічних засобів.

Для вирішення вище вказаних задач планується технічна реалізація імітатора об'єкта управління, розробка його цифрового двійника, і оцінювання на його базі якості алгоритмів обробки та можливості видавати розрахований сигнал у випадку збою фізичного датчика.

Розглядається питання організації збору та обробки технологічної інформації в АСУТП в рамках функціонування інформаційної підсистеми АСУТП. Висвітлено основні проблеми, що виникають при розробці програмного забезпечення. Поставлені основні задачі дослідження, описані методи вирішення проблеми.

4.2 Розробка структурної схеми макету технологічного об'єкту

При розробці макету технологічного об'єкту автори керувалися наступними принципами:

- наявність декількох взаємозв'язаних технологічних параметрів (не менше 6-8), щоб можна було набрати достатню базу даних для побудови моделі;
- відносна простота реалізації макету без необхідності пошуку дефіцитних матеріалів або вироблення складних деталей;
- відносна дешевизна електронних компонентів та датчиків.

Результуюча структурна схема макету технологічного об'єкту представлена на рис. 4.1.

Макет уявляє собою дві з'єднані ємності 1 та 2. Більша ємність представляє собою власне основний агрегат, де відбувається технологічний процес, а менша – димовий тракт, через який відводиться

гаряче повітря. У крайній верхній частині агрегату 1 закріплений нагрівач повітря з вентилятором 3, який вдуває гаряче повітря всередину. Потужність як нагрівача, так і вентилятора контролюються та регулюються за допомогою мікроконтролера.

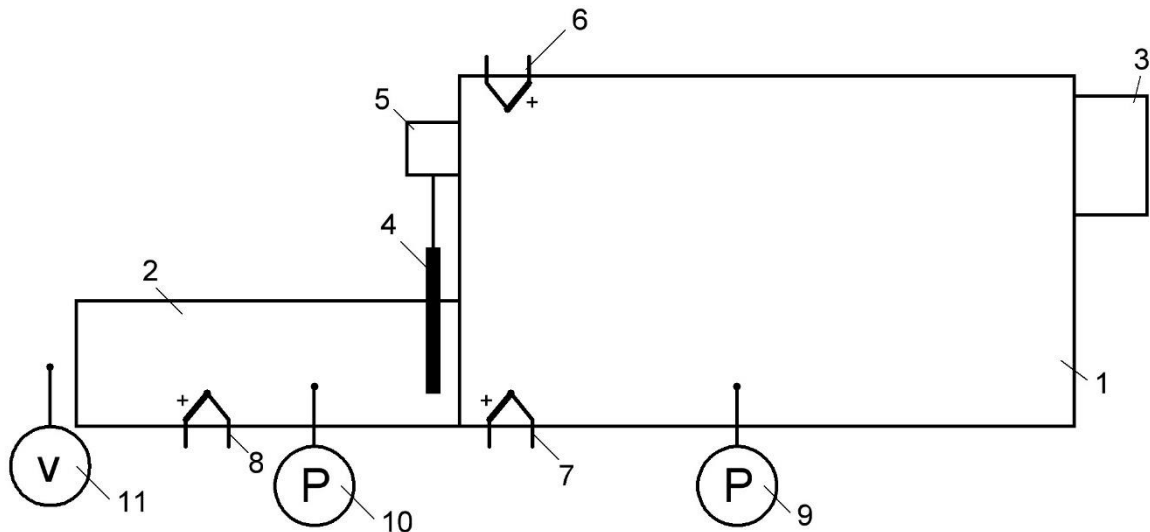


Рисунок 4.1 – Структурна схема макету технологічного об'єкту

Між агрегатом 1 та димовим трактом 2 розташований шиберний затвор 4, який дозволяє змінювати витрати повітря, що виходять з агрегату у димовий тракт. Положення шиберного затвору регулюється за допомогою сервоприводу 5.

У макеті вимірюються наступні технологічні параметри:

- температура в двох точках робочого простору агрегату за допомогою ХА-термопар (6 та 7);
- температура в димовому тракті за допомогою такої ж ХА-термопари (8);
- надлишковий тиск у агрегаті за допомогою датчику тиску 9;
- надлишковий тиск у димовому тракті за допомогою датчику тиску 10;
- швидкість повітря на виході з димового тракту за допомогою датчику 11;

- струм та напруга нагрівача повітря (на схемі не показані);
- струм та напруга вентилятора (на схемі не показані).

Всі сигнали від усіх датчиків заводяться у мікроконтролер серії RA2A1 компанії Renesas. Вибір саме такого контролера обумовлений його розвиненою аналоговою периферією. Він має п'ятиканальний 24-бітний сігма-дельта АЦП а також 20-канальний 16-бітний АЦП послідовного наближення з п'ятьма диференційними каналами. Крім того, мікроконтролер має сучасне потужне 32-бітне ядро Cortex M-23 і безліч цифрових інтерфейсів, що робить його ідеальним вибором для поставленої задачі і дозволяє відмовитися від зовнішніх модулів вводу-виводу.

Оскільки напруга, що генерується термопарами, має порядок декількох десятків мВ, для її вимірювання доцільно використовувати 24-бітний перетворювач, який при опорній напрузі в 1 В має роздільну здатність у 6 нВ.

Для інших датчиків, включаючи струм і напругу, достатньо 16-бітної точності.

Керування технологічним процесом та контроль параметрів відбувається за допомогою персонального комп'ютера, що підключається до мікроконтролеру за допомогою інтерфейсу Segger RTT.

Оскільки потужність нагрівального елемента становить 100 Вт, для керування ним використовується твердотільне реле типу SSR-40 DD, яке має максимальний струм 40 А, що дає великий запас по допустимій потужності.

4.3 Тестування макету технологічного агрегату

При першому тестуванні виявилася низка проблем, частина з яких виглядає вирішуваною, а частина – ні.

По-перше, виявилось, що тиск, що розвиває вентилятор, є дуже малим (оцінно, десятки Па), і для наявних датчиків з діапазоном 0-10 кПа цей тиск знаходиться в межах похибки, тому від його вимірювання прийшлося відмовитися, що зменшило кількість контрольованих параметрів на 2.

По-друге, виявилось, що сигнали термопар дуже чутливі до електромагнітних наводок, і керування нагрівачем за допомогою ШІМ вносить великі завади у показання термометрів, що призводить до необхідності використання програмних фільтрів для покращення показань.

По-третє, виявився взаємозв'язок показань термопар через те, що їх металеве обплетення з'єднано з мінусовим виводом, що призводить до додаткових завад при торканні.

Першу проблему було частково вирішено додаванням датчику швидкості повітря 11 (рис. 4.1), який спочатку не входив у проект. Другу задачу планується вирішити шляхом електричної ізоляції силової та вимірювальної частин схеми а також фізичним їх рознесенням, а також розробкою програмного фільтру для усунення коливань показань.

Третя проблема була вирішена шляхом обмотування термопар ізоляційною стрічкою, що унеможливило випадковий електричний контакт між ними.

Було проведено декілька експериментів, щоб виявити взаємозв'язок параметрів між собою.

В першому експерименті спочатку шибєрний затвор було закрито, а вентилятор і нагрівач працювали на повну потужність, через деякий час шибєр було відкрито, а ще через деякий час нагрівач було вимкнено.

Результати експерименту представлені на рис. 4.2 – 4.6.

Як можна побачити з рис. 4.2 – 4.6, між багатьма параметрами є взаємозв'язок.

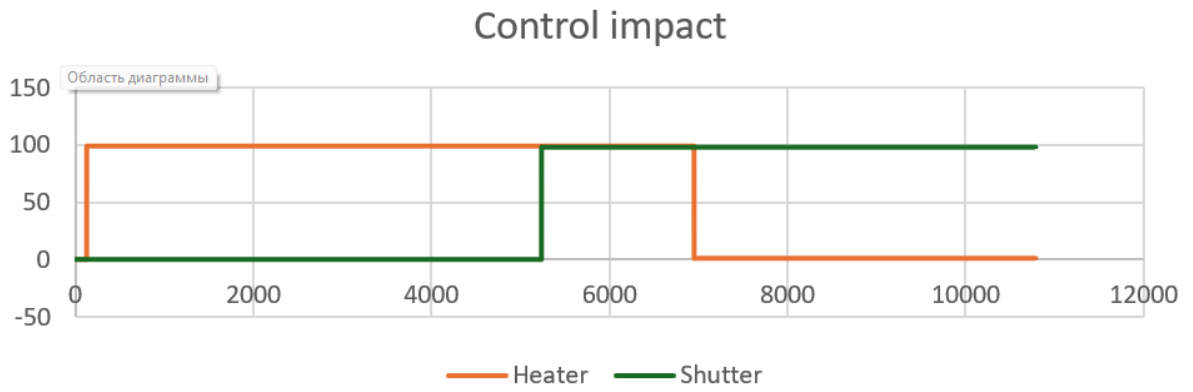


Рисунок 4.2 – Положення шибру та відносна потужність нагрівача

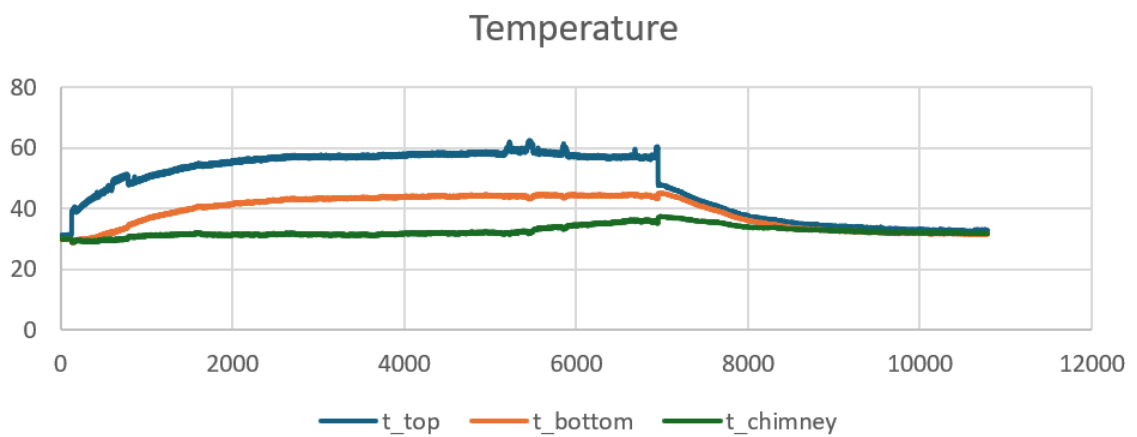


Рисунок 4.3 – Температури в верхній та нижній частині агрегату та у димовому тракті

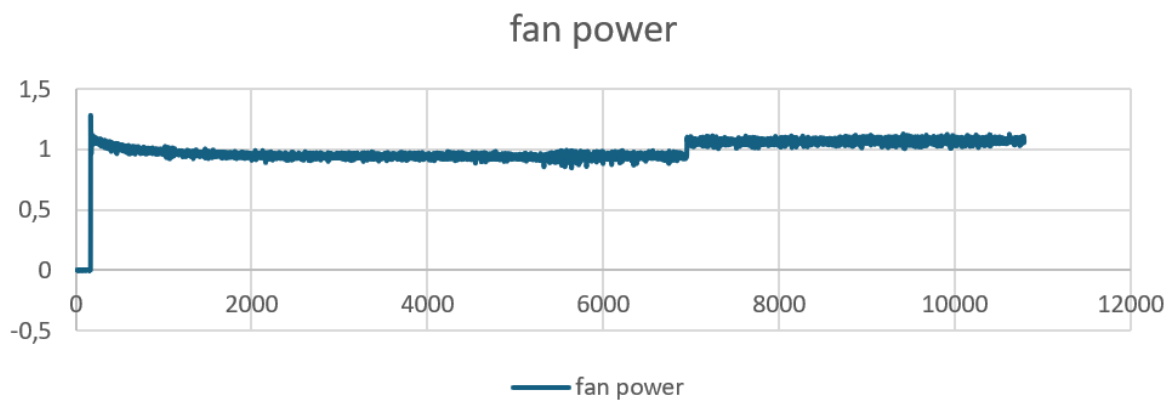


Рисунок 4.4 – Потужність вентилятора

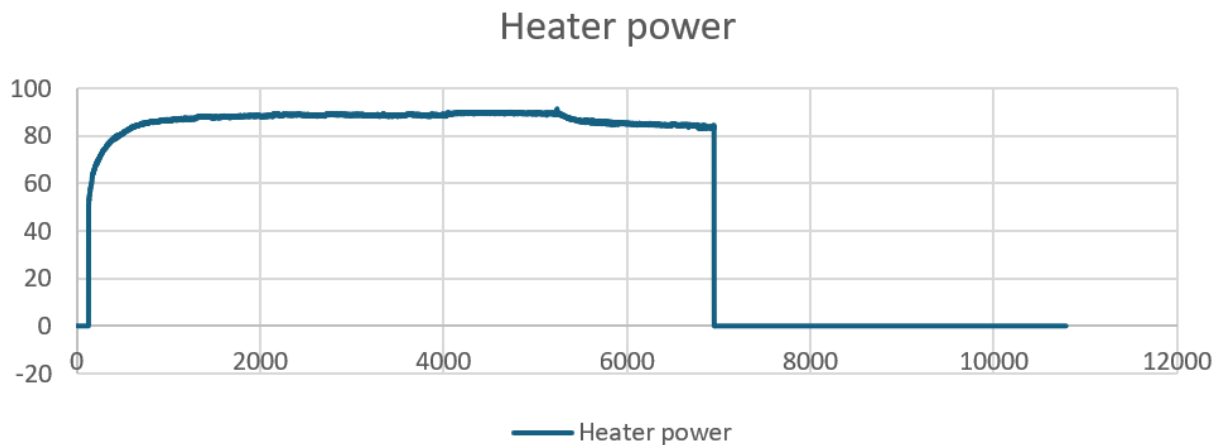


Рисунок 4.5 – Потужність нагрівача

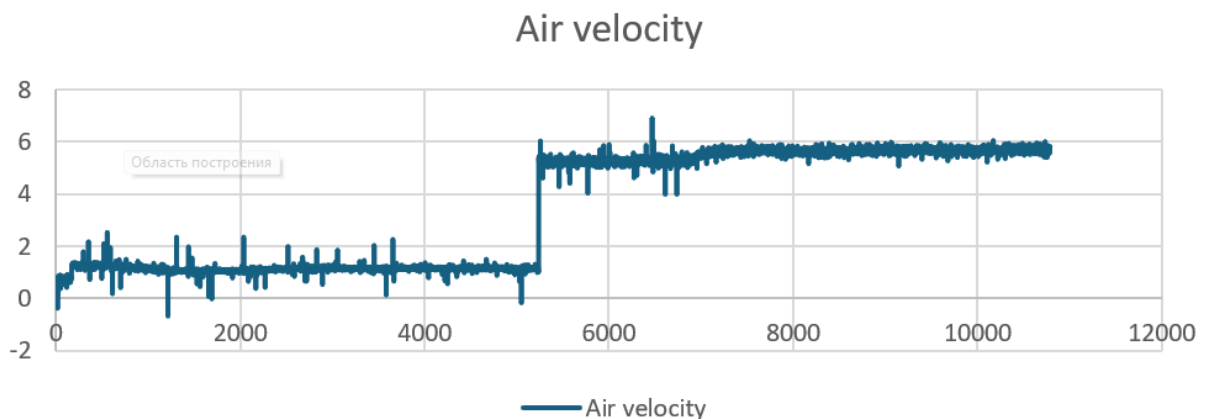


Рисунок 4.6 – Швидкість повітря на виході з димового тракту

Чітко прослідковується вплив положення шиберного затвору на температуру в агрегаті та димовому тракті (рис. 4.2 та 4.3). Поки шибер зачинено, температура в агрегаті наростає швидко, причому у верхній частині вона значно більша, ніж у нижній. Це пов'язано з тим, що вентилятор-нагрівач також знаходиться у верхній частині, і дме безпосередньо на термопару, а також з конвекційними процесами.

В димовому ж тракті температура майже не змінюється. Також видно, що швидкість повітря на виході з тракту (рис. 4.6) дуже мала і обумовлена негерметичністю затвору.

При відкритті затвору температура в агрегаті незначно падає, а в димовому тракті починає зростати. Також зростає і швидкість повітря на виході. Можна помітити, що в цей момент також починає знижуватися потужність нагрівача (рис. 4.5).

Загалом, графік потужності нагрівача викликає певні питання. Матеріал, з якого виготовлений нагрівач, має позитивний температурний коефіцієнт опору, то ж з розігрівом нагрівача його опір повинен зростати, а при сталій напрузі на його затискачах потужність повинна зменшуватися, проте відбувається прямо протилежне. На початковій частині графіку (рис. 4.5) добре видно, що потужність, що споживається нагрівачем зростає по мірі його нагріву і зростання температури.

При вимкненні нагрівача також відбуваються і передбачувані, і неочікувані події. По-перше, температура у верхній частині агрегату стрибком знизилася на 10 градусів (рис. 4.2). Це може бути пов'язане з електричними наводками, оскільки в цей момент відбувається стрибкоподібне зменшення навантаження, що також викликає незначне зростання потужності вентилятора (рис. 4.5) і відповідне зростання швидкості повітря (рис. 4.6).

У другому експерименті була отримана залежність швидкості повітря від потужності вентилятора і положення шибєрного затвору (рис. 4.7 – 4.9).

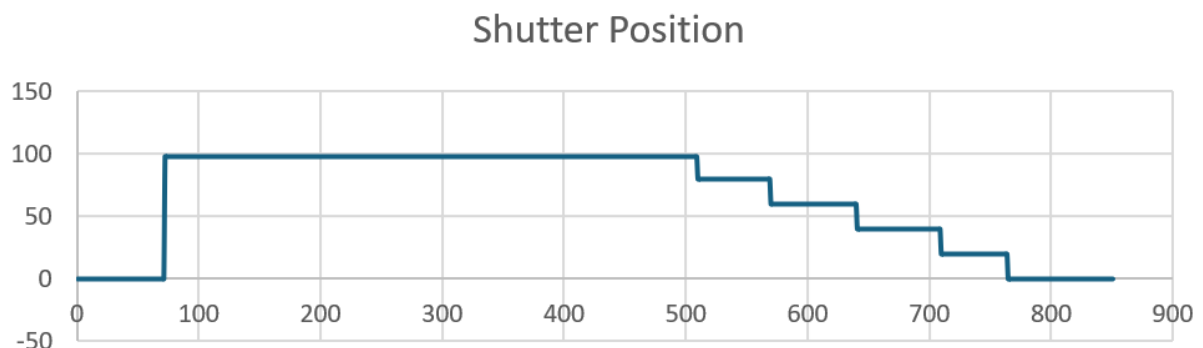


Рисунок 4.7 – Положення шибєрного затвору

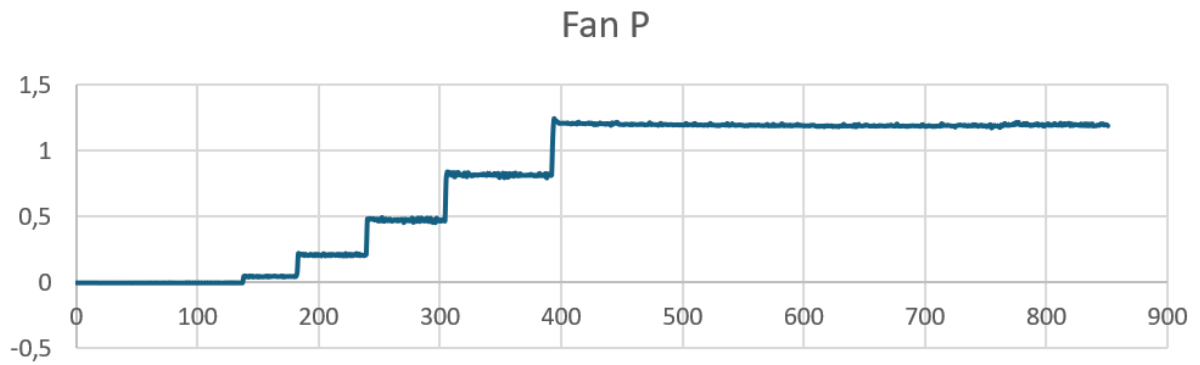


Рисунок 4.8 – Потужність вентилятора

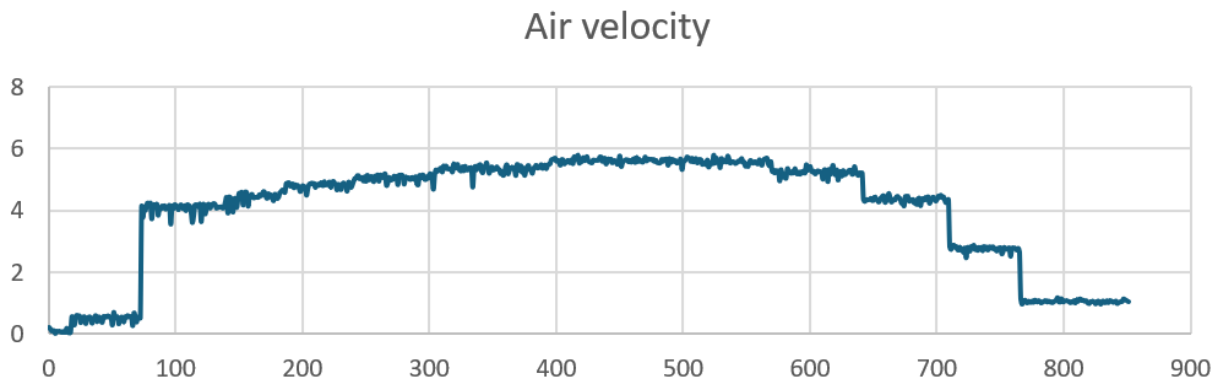


Рисунок 4.9 – Швидкість повітря на виході з димового тракту

Швидкість повітря на виході з димового тракту значно залежить від положення шиберного затвору і слабо залежить від потужності вентилятора.

Якщо перша залежність зрозуміла і логічна, то друга знов викликає питання. Справа у тому, що вентилятор при подачі на нього 0 В все одно крутиться з якоюсь мінімальною швидкістю через струм витоку, причину якого автори ще не знайшли, але виправлять у майбутньому.

4.4 Подальші плани з роботи з макетом технологічного об'єкту

Розуміючи, що макет ще знаходиться у «сирому» стані, автори планують наступне:

1. Виправити всі недоліки, що були виявлені на етапі тестування, та можуть бути виправлені.
2. Розробити алгоритми цифрової фільтрації, щоб знизити шуми у вимірювальних каналах температури, швидкості повітря, струму та напруги.
3. Розробити алгоритми керування технологічним процесом у макеті об'єкту та протестувати їх на стійкість та точність регулювання.
4. Зібрати базу даних всіх параметрів з метою отримання залежностей між ними та побудови математичної моделі об'єкту на базі штучної нейронної мережі.
5. Розробити «цифрового двійника» технологічного об'єкту, який міг би з високою точністю передбачувати хід процесу та видавати рекомендації щодо керування ним.

5 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА ШЛЯХОМ РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНАСТУВАННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ТА МЕХАНІЗМІВ

5.1 Існуючі методики технічного діагностування

У гірничій промисловості широкого використання набули кар'єрні екскаватори - виймально-навантажувальні машини, що застосовуються для виконання відкритих гірничих робіт [31]. Дані машини характеризуються порівняно високою надійністю, але слід враховувати важкі умови роботи, які є фактором її зниження.

Одним із напрямків підвищення надійності є оптимізація системи технічного обслуговування й ремонту, що у свою чергу, передбачає організацію моніторингу поточного стану вузлів та агрегатів машини із використанням сучасних методів. Це дозволить вчасно виявити відхилення показників технічного стану й не доводити їх до граничного стану та підвищити ефективність виробничих процесів.

Відмови, що носять аварійний характер, знижують коефіцієнт готовності кар'єрного екскаватора, особливо взимку, за рахунок збільшення кількості ремонтів. Зі збільшенням терміну експлуатації кар'єрних екскаваторів тривалість ремонтів щорічно збільшується.

Тривалі простої машин у ремонтах пояснюються недосконалою організацією системи планово – попереджувальних ремонтів, слабкою ремонтною базою, нестабільним постачанням матеріально – технічних ресурсів, низькою експлуатаційною та ремонтною технологічністю. На величину часу простоїв кар'єрних екскаваторів під час проведення ремонтних робіт також впливає порушення термінів виведення обладнання в ремонт, порушення режимів і строків змащення окремих вузлів, а також рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Організація системи технічного обслуговування та ремонту техніки є предметом дослідження багатьох вчених [32-34]. Тривалість і надійність експлуатації кар'єрних екскаваторів буде забезпечена лише за умови систематичного запровадження заходів щодо технічного обслуговування та ремонту механізмів.

Під технічним обслуговуванням розуміють комплекс робіт для підтримки роботоздатного стану в періоди виконання робіт, а також при зберіганні та транспортуванні.

Ремонт – комплекс робіт для підтримки та відновлення справності або працездатності машин. На даний час розповсюдженою є планово-попереджувальна система проведення ремонтних робіт і технічного обслуговування. Дана система базується на розроблених державних і галузевих нормативах; характеризується плановими впливами, які проводять з нормованою періодичністю.

Планово-попереджувальна система є розповсюдженою, але не враховує умов експлуатації, рівень концентрації технічних засобів на конкретному виробництві, інтенсивність використання техніки в різні пори року, тощо [35].

З метою підвищення ефективності використання кар'єрних екскаваторів відмічені особливості мають бути враховані під час обґрунтування строків проведення технічного обслуговування та ремонтних робіт.

Питання підвищення ефективності роботи гірничої техніки, зокрема екскаваторів розглянуті в роботах [36-41].

KG Pugin [36] вивчав питання підвищення надійності гідравлічних систем технологічних машин та прийшов до висновку, що одним із напрямків підвищення надійності гідравлічних систем є використання лише якісних елементів в її складі, зокрема силових циліндрів, гідромоторів, гідроклапанів тощо. Наряду з цим автор акцентує на

необхідності розробки та запроваджені сучасних методів технічного обслуговування.

F. Ng, J. A. Harding, J. Glass [37] відмічають, що для швидкого та ефективного планування потреб у технічному обслуговуванні машин виробникам оригінального обладнання потрібна точна інформація про використання та знос їхніх продуктів. Значні обсяги даних про використання в режимі реального часу від моніторингу продукту зазвичай генеруються та передаються назад виробникам комплектного обладнання, де буде проведено діагностичний і прогностичний аналіз. як засіб задоволення вимог клієнтів.

Автори пропонують з метою підвищення надійності установити поточний моніторинг для прогнозування забрудненості робочої рідини гідравлічних систем та зосереджують свої дослідження на сучасних методах збору динамічних даних для мобільних гідравлічних систем, у цьому випадку використання мобільного вбудованого датчика забруднення частинками. Авторами на підставі досліджень запропоновано надійний спосіб вимірювання зносу гідравлічних компонентів у реальному часі.

Lei Ge [38] і інші науковці пропонують для приводів екскаваторів нову систему узгодження потужності і енергоефективності гідравлічних пристроїв.

M.Sc. Daniela Marasova та ін. [39] також доводять, що діагностика забезпечує надійний моніторинг стану в реальному часі обладнання і таким чином забезпечує його безпеку. Авторі наголошують на важливості діагностування металевих конструкцій, які використовуються у важкій техніці для видобутку бурого вугілля та вимагають великих закупівельних інвестицій. Вихід з ладу металевих конструкцій веде до значних втрат обсягів видобутку, а отже, і фінансові втрати.

Дослідники наголошують на необхідності розробляння правил, які слід застосовувати з метою уникнення несправностей і таким чином

зменшити втрати до мінімуму. У роботі також зазначено, що важливо ідентифікувати критичні місця у металоконструкціях важких машин на основі спостережень і систематизувати їх за наступними факторами: небезпека для людини, термін служби, тривалість ремонту та втрати, спричинені простоем машини.

Викладені у статті результати досліджень вказують на важливість базових знань, необхідних для діагностики сталевих рам у важких машинах, зокрема, щодо величин напружень, зміну напружень в часі, базові механічні властивості матеріалів, визначення інтервалів для періодичних перевірок, а також критичної довжини тріщин.

Махмудов Ш. А. [40] зазначає, що відсутня єдина методика оцінювання функціональності кар'єрних екскаваторів, яка б враховувала: фізико-механічні властивості порід, що постійно змінюються, технологічні параметри вибою, конструктивно-силові параметри екскаватора, ймовірність безвідмовної роботи, випадковий характер подачі транспорту, кваліфікацію машиніста екскаватора, кліматичні умови.

У роботі [41] авторами запропоновано методику діагностики стану контактної поверхні виконавчого обладнання гірничих машин з метою їх своєчасного обслуговування та ремонту. У даній роботі проведено неруйнівну діагностику твердості та дефектності контактної поверхні зубів для прогнозування терміну служби та визначення вимог до його заміни.

У результаті розроблено методику оцінки залишкового ресурсу, а в якості діагностичних критеріїв обрано показники твердості та вихрострумів дефектоскопів контактної поверхні кришок зубів, а також зміну показань дефектоскопа.

З аналізу чинних досліджень випливає, що найбільш прогресивним та економічно доцільним методом технічного обслуговування є система технічного обслуговування за фактичним технічним станом обладнання, що базується на його розпізнаванні (діагностиці).

В останні роки стало можливим побудувати базу оцінки технічного стану конструкцій на основі достовірного дефектоскопічного контролю, надійного визначення напружено деформованого стану та, нарешті, об'єктивної діагностики стану матеріалів – ось «три кити», що забезпечують надійну та достовірну оцінку технічного стану конструкції.

Забезпечити створення ефективної системи технічного обслуговування і прогнозувати оптимальні строки проведення ремонтних робіт можливо базуючись на результатах контролю текучого стану об'єкту із використанням діагностування. Застосування діагностування дасть можливість значним чином зменшити час простоїв екскаватора; зменшити витрати на ремонт; зменшити витрати часу й людських ресурсів на збирально-розбиральні роботи, а також витрат на створення запасів запасних частин і матеріалів. Для проведення діагностування використовують різноманітні методи: ультразвуковий, магнітний, візуально-вимірювальний, капілярний контроль.

Діагностичний контроль (тепловий, вібродіагностичний, акустико-емісійний) Зокрема візуально-інструментальний контроль дає можливість виявити небажані зміни стану поверхонь, наприклад, тріщини на початковому етапі; деформаційні зміни поверхонь, корозійні пошкодження, тощо). Даний метод також дає можливість встановити послаблення з'єднань. Тобто використання візуально-інструментального контролю забезпечує крім своєчасного виявлення небажаних змін конструкцій ще й безпеку використання кар'єрних екскаваторів.

Особливої уваги заслуговує також діагностика з використанням методу ультразвукового контролю, що базується на здатності ультразвукових коливань поширюватися в твердих речовинах на більшу глибину без помітного ослаблення і відображатися від границі розділу двох речовин.

Для контролю електрообладнання доцільним є тепловий контроль, призначений для оцінки його теплового стану залежно від умов його

використання. Виявлення дефектів підшипникових вузлів потребує зупинки екскаватора й розбирання вузлів, що потребує значних витрат часу. Встановити пошкодження підшипників, а також дефекти передач можливо шляхом вимірювання віброакустичних характеристик.

Для організації ефективного використання, обслуговування й ремонту кар'єрних екскаваторів, доцільно запроваджувати сучасні методи поточного діагностування й контролю. Це дозволить скоротити витрати на технічне обслуговування та ремонт кар'єрних екскаваторів, оптимізувати кількість ремонтних бригад при якій машини не будуть простоювати. Крім того, запровадження поточного постійного контролю із застосуванням сучасних методів дозволить розробити адаптовані методики проведення поточного контролю окремих вузлів і агрегатів кар'єрного екскаватора без їхнього розбирання.

Засоби технічної діагностики, контролю та моніторингу являють собою інформаційно-вимірвальний комплекс системи моніторингу, оцінки та прогнозу технічного стану машин та механізмів. При цьому в залежності від характеру сигналу, що вимірюється, розрізняють функціональну та тестову діагностику. В першому випадку датчики реєструють сигнали, що генеруються самою машиною, а в другому – реєструється відгук машини на тестовий вплив.

Застосувати такі системи діагностики можливо за умови високого рівня інформаційного забезпечення підприємства, який дасть можливість ефективно і з високою точністю оцінити поточний стан основних функціональних вузлів роторного екскаватора. Такі точні показники дадуть можливість скоригувати експлуатаційну та ремонтну документацію. Крім того аналіз отриманих значень дасть можливість розробити уточнену методику розрахунку критеріїв за якими можна оцінювати граничні стани окремих агрегатів і екскаватора в цілому.

5.2 Технічне обслуговування та ремонт редукторів роторних екскаваторів

Редуктори роторних екскаваторів характеризуються значною потужністю.

З метою аналізу формування показника надійність редукторів під час експлуатації потрібно, в першу чергу, визначити фактори, які зумовлюють, специфіку експлуатації редукторів.

Віднесемо до них:

- **Погодно – кліматичні умови** (рівень вологості, сонячної радіації тощо);

- **Характер навантаження.** Важливість врахування даного фактора зумовлена тим, що редуктора працюють за умов змінних навантажень (часті пуски та зупинки);

- **Вібрації** (найбільш ймовірними причинами виникнення коливань є невірноваженість роторів, не співвісність окремих агрегатів);

- **Не налагоджений контроль за роботою редукторів з боку обслуговуючого персоналу** (як показує практика напрацювання елементів редукторів фіксується приблизно й, крім того методика організації таких робіт не передбачає врахування специфіки умов роботи. Це є причиною не вірного встановлення проміжків часу між проведенням етапів ТО);

- **Модернізація конструкцій редукторів сучасних роторних екскаваторів** (введення планетарних передач, вимоги до обслуговування яких відрізняються від вимог до традиційних циліндричних.

- **Використання на підприємствах не адаптованих до сучасних конструкцій редукторів інструкцій з ТО** (аналіз інструкцій виявив, що використовуються застарілі методи контролю стану елементів редукторів, які передбачають органоліптичне оцінювання роботоздатності

або повне розбирання редуктора, що часто призводить до порушення цілісності окремих конструктивних елементів).

З метою формування показника надійності редукторів під час експлуатації було виконано аналіз видів відмов. Основні причини відмов редукторів роторних екскаваторів наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Основні причини відмов у процесі експлуатації редукторів роторних екскаваторів

№ з/п	Причина відмови
1	порушення жорсткості системи
2	розцентрування валів механізмів
3	дисбаланси обертових деталей
4	дефекти підшипників кочення (перекоси та порушення посадок, зношування бігових доріжок, тіл кочення та сепараторів, порушення режиму мащення)
5	спрацьовування і, як наслідок, зміна геометрії зубчастих коліс (абразивне спрацьовування, сколи, піттинг корозія, тріщини та заїдання зубів)
6	дефекти елементів з'єднувальних муфт

Наведені дані показують, що розробка засобів безрозбірного контролю виявлення дефектів є актуальним завданням вирішення якого дозволить запобігти спрацьовуванню основних вузлів редукторів роторного екскаватора. Тому, одним з важливих шляхів у підвищенні ефективності технічної експлуатації є вдосконалення методів та форм технічного обслуговування та ремонту на основі використання методів та засобів технічного діагностування.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ АСУ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМИ ПЕЧАМИ

6.1 Автоматизована система управління тепловим режимом плавки технологічного комплексу «ПІЧ-КІВШ»

Проведений аналіз існуючих систем автоматизації ДСП та технологічними комплексами «ПІЧ-КІВШ» дозволяє зробити висновок про можливість інтеграції в них автоматизованої системи керування тепловим режимом плавки (АСУ ТРП). Таке технічне рішення дозволить зменшити витрати коштів та скоротити простий технологічного обладнання при технічній реалізації АСУ ТРП. З метою реалізації цієї ідеї необхідно виконати такі вимоги [42, 43]:

- інтегрована система не повинна викликати конструктивних та апаратних змін існуючих систем управління;
- взаємодії існуючої та інтегрованої системи управління мають бути синхронізовані;
- АСУ ТРП, що розробляється, повинна забезпечувати регулювання температури і швидкості нагріву з урахуванням змінних параметрів плавки (маси рідкого металу, теплових втрат).

Для інтеграції АСУ ТРП до існуючих систем управління необхідно:

- побудова структури та алгоритму функціонування автоматизованої системи управління тепловим режимом плавки при її інтеграції до розподілених систем дугових сталеплавильних печей, із застосуванням сучасних мережевих технологій та бази даних;
- провести аналіз можливих колізій у роботі двох систем, які можуть бути викликані операціями одночасного доступу до інформації з бази даних та вимірювальних перетворювачів ваги та температури металу, напруги та струму на короткій мережі.

– створення інформаційного забезпечення та випробування системи автоматизації теплового режиму плавки металу.

Як базова (існуюча) система автоматизації прийнята АСУ технологічним комплексом «ПЕЧ–КОВШ». Структура аналізованої автоматизованої системи управління комплексом «ПІЧ-КІВШ» розроблена на основі технології Profibus, Industrial Ethernet та визначається принципами роботи ПТК, технологічними особливостями вимірювальної апаратури та виконавчих механізмів, а також алгоритмом роботи системи управління. ПТК має розподілену структуру, є складним багатозв'язковим об'єктом і умовно поділено на сім технологічних ділянок. Кожна ділянка оснащена вимірювальними перетворювачами та виконавчими органами. У зв'язку з цим впровадження АСУ ТРП, що розробляється, в базову схему АСУ доцільно здійснювати на основі застосування промислової шини Profibus.

Впровадження АСУ ТРП не повинно спричинити зміни в апаратній частині існуючої системи управління, а має розширити її можливості шляхом автоматизованого забезпечення якості сталі за хімічним складом підтримкою заданого теплового режиму плавки. Структурна схема базової АСУ технологічним комплексом «ПІЧ-КІВШ» з інтегрованою АСУ ТРП представлена на рис. 6.1.

Інтеграція АСУ ТРП в єдину розподілену систему управління здійснюється за допомогою польової шини Profibus [44] на нижньому рівні та за допомогою шини Industrial Ethernet – на верхньому рівні. З верхнього рівня мережею Industrial Ethernet АСУ ТРП організована підтримка сталевара за допомогою бази даних

- базової АСУ з плавок, марок сталей та легуючих матеріалів;
- АСУ ТРП по досягнутих швидкостях нагріву та теплових втрат.

За запитом сталевара на робочу станцію викликаються дані про сталі, що виплавляється, хімічного складу легуючих і шлакообразуючих матеріалів в бункерах тракту «сипучих».

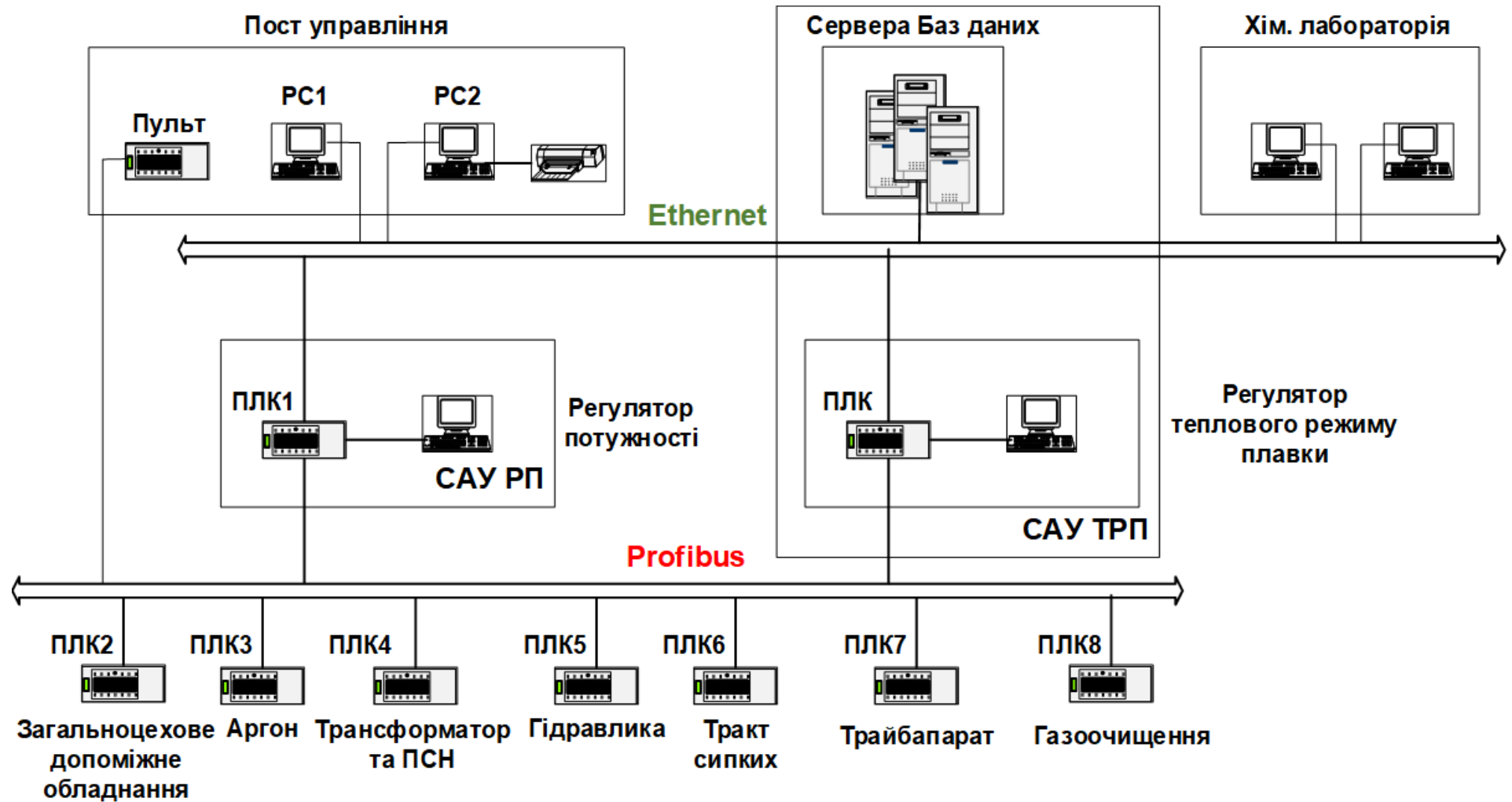


Рисунок 6.1 - Структурна схема базової АСУ технологічним комплексом «ПІЧ-КІВШ» з інтегрованою АСУ ТРП

Управління основним технологічним процесом здійснюється з використанням математичної моделі електротермічного процесу плавки з візуалізацією наступних результатів моделювання:

- номери ступеня пічного трансформатора;
- швидкості нагрівання та температури розплаву;
- часу плавки;
- потужності на електричній дуги та теплових втрат.

Вихідними даними функціонування АСУ ТРП є параметри, що описують директивний графік процесу плавки, що вводяться сталеваром з поста управління, а також параметри поточних значень мас легуючих добавок і металу в ківші, значення напруги та сили струму на короткій мережі, фактичної температури металу, одержувані з вимірювальних перетворювачів базової АСУ. Як вимірювальні перетворювачі ваги в базовій АСУ використовуються зважувальні пристрої на сталевозі і бункерах-дозаторах шлакоутворюючих та легуючих сумішейку. Функції зважування та дозування реалізуються за допомогою інтелектуальних модулів Siwarex U та Siwarex M, вбудованих у пристрій RIO. За вихідними даними процесу плавки математична модель АСУ ТРП забезпечує розрахунок величини швидкості нагрівання та температури рідкого металу в періоди неспостереження, вибір оптимальних значень робочих точок пічного трансформатора та ефективна підтримка температурного графіка плавки з точністю $\pm 7\text{C}^\circ$.

Організація зв'язку ПЛК логічної системи управління тепловим режимом плавки (ТРП) з провідними DP-пристроями (датчиками та виконавчими пристроями, ПЛК технологічних ділянок) здійснюється через ПЛК регулятора потужності (РП) по промисловій шині Profibus. Схематичне представлення структурної схеми системи керування тепловим режимом плавки зображено на рис. 6.2.

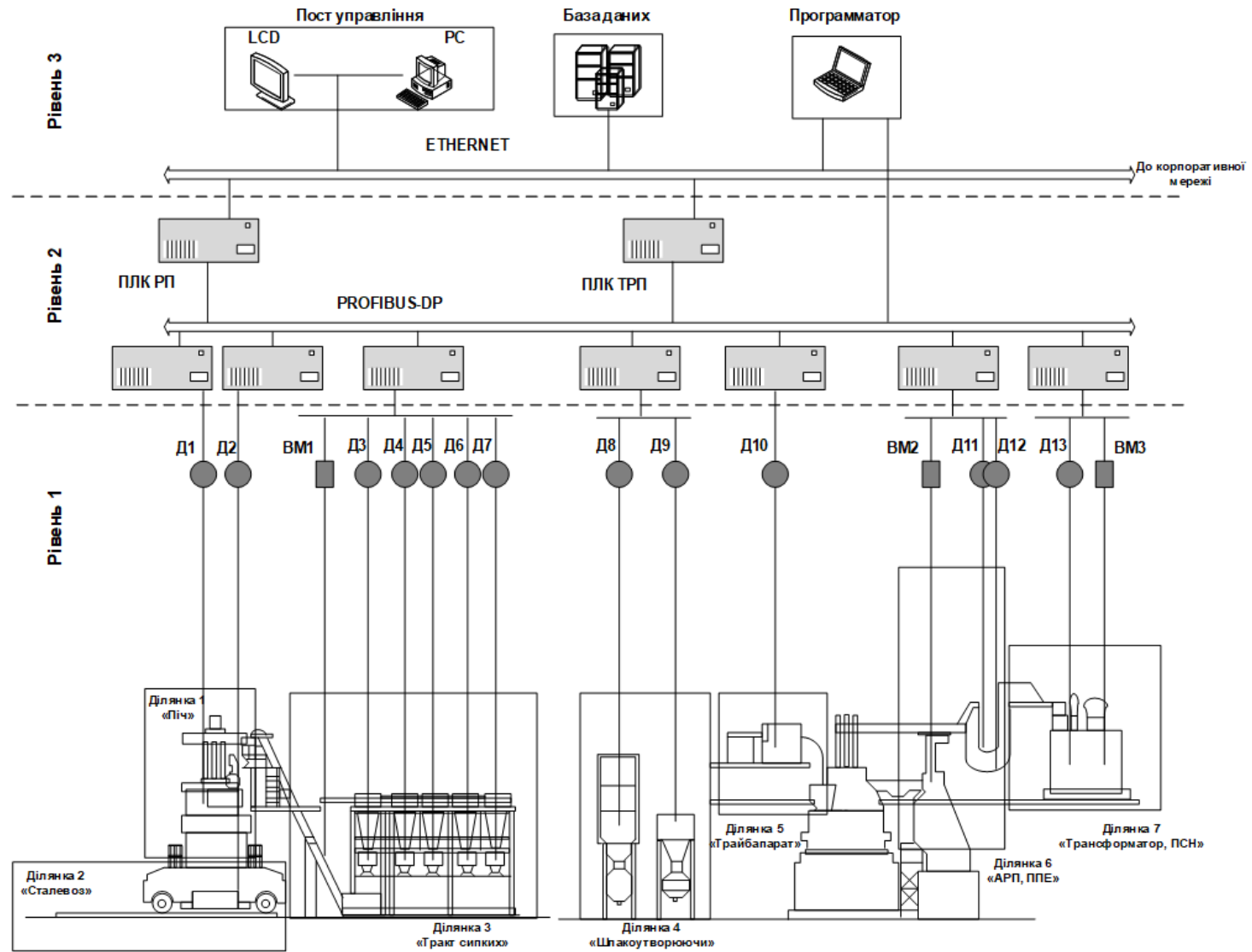


Рисунок 6.2 - Структурна схема розподіленою АСУ ТРП

На рисунку 6.2 прийнято такі позначення:

ВМ – виконавчі механізми: 1 –подачі легуючих у піч, 2-переміщення електродів; 3 – перемикання ступенів напруги пічного трансформатора.

Д – датчики: 1 – ваги рідкого металу, 2 – температури металу, 3-7 – ваги легуючих добавок у бункерах; 8,9 - ваги шлакоутворюючих добавок (повістки, CaSi), 10 -подачі вуглецевого дроту, 11 - трансформатор напруги на короткій мережі; 12 - трансформатор струму на короткій мережі; 13 – номери ступеня пічного трансформатора.

Технічну реалізацію структури представленої на рис. 6.3 на основі протоколу Profibus можна провести різними методами. Це викликано тим, що протокол Profibus може бути реалізований на будь-якій мікропроцесорній системі із внутрішнім або зовнішнім асинхронним послідовним інтерфейсом зі швидкістю передачі не менше 1,5 Мбіт/с [45, 46].

Найбільш схожою з погляду складності об'єкта і розподіленої структури базової АСУ є реалізація з апаратною підтримкою рівня 1 і рівня 2. У цьому способі реалізації протоколу Profibus частина функцій або всі функції рівня 1/2 виконуються спеціальною прикладною мікросхемою (ASIC), а інші частини реалізуються програмно мікроконтролером.

Розглянемо фізичний рівень протоколу Profibus. Profibus (Process Field Bus) складається з деякого асортименту сумісних продуктів, що базуються на специфікації інтерфейсу RS-485 та європейській електричній специфікації EN50170. Інтерфейси реалізовані як спеціалізованих мікросхем (ASIC).

Залежно від програми існує три основні варіанти Profibus:

- Profibus DP – для високошвидкісної передачі даних за схемою “головний/підлеглий”;
- Profibus FMS – для спеціальних профілів, наприклад, верстати з ЧПУ, роботи, контролери PLC (кілька головних або однорангових пристроїв);

– Profibus PA – внутрішньо безпечна шина для роботи в небезпечних ділянках виробництва, наприклад, у газопереробці.

Останнім розширенням специфікації Profibus є варіант Profibus DP V2, який включає такі нові можливості:

– функція синхронізації, що дозволяє кільком пристроям та осям переміщення залежати від одного і того ж генератора синхроімпульсів;

– обмін повідомленнями за принципом "видавець/передплатник", що дозволяє створювати зв'язки між пристроями типу "один до одного" або "один до багатьох". Тим самим забезпечується узгоджена робота синхронізованих осей переміщення.

Стандарт протоколу описує рівні 1, 2 та 7 OSI-моделі (фізичний рівень, рівень передачі даних та прикладний рівень). У Profibus використовується гібридний метод доступу у структурі MASTER/SLAVE та децентралізована процедура передачі маркера. Мережа може складатися зі 122 вузлів, з яких 32 можуть бути MASTER-вузлами.

Загальна схема Profibus-мережі представлена на рис. 6.3.

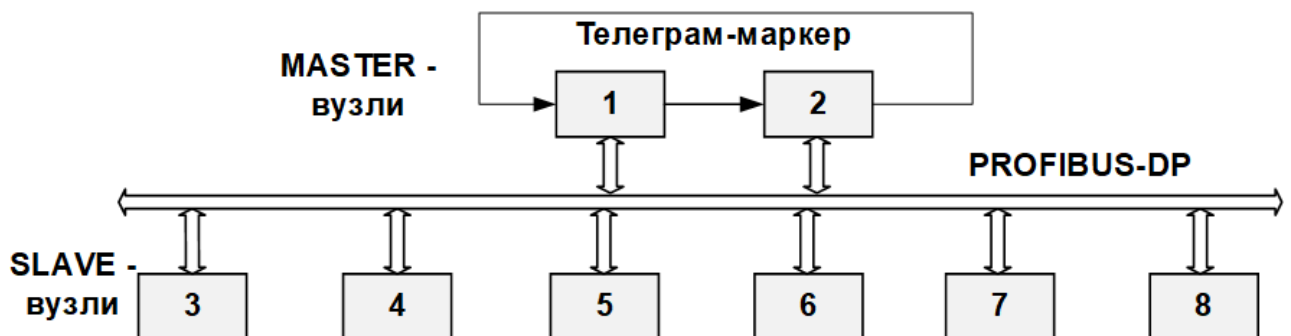


Рисунок 6.3 - Принцип роботи польової шини Profibus [8]

При технічній реалізації АСУ ТРП за розподіленим принципом необхідно враховувати особливості шини Profibus, зокрема тимчасові характеристики. Дослідження тимчасових характеристик шини дозволить

визначити тривалість затримок, що вносяться реальною системою в канали управління та вимірювань з метою оцінки їх впливу на весь алгоритм управління ПТК. При цьому необхідно з'ясувати:

1. Достатність тривалості опитування вимірювальних перетворювачів для виконання обміну інформацією та необхідних обчислень.
2. Вплив тимчасових затримок, що вносяться апаратною частиною базової АСУ на характеристики АСУ ТРП.

6.2 Реалізація алгоритму функціонування автоматизованої системи керування

Технічна реалізація АСУ ТРП технологічного комплексу «ПІЧ-КІВШ» базується на використанні розподіленого алгоритму керування. У його основу покладено поділ всього технологічного процесу на підпроцеси, і навіть виділення локальних алгоритмів, виконуваних кількома ПЛК базової системи управління.

Розглянемо алгоритм управління технологічним комплексом «ПІЧ-КІВШ» у розподіленій системі управління. Операції читання інформації з датчиків у проектованій системі автоматизації можуть здійснюватися одночасно з операціями провідної (базової) системи управління: читання інформації з вимірювальних перетворювачів ваги та температури металу, напруги і сил струму фаз короткої мережі. Поєднання операцій управління двох систем створює деякі труднощі при моделюванні, так як пересилання інформації або матеріалів від однієї компоненти до іншої потребує їхньої синхронізації. Для моделювання систем, що вимагають синхронізації взаємодії паралельних процесів, застосовують теорію мереж Петрі [47, 48.] Метою побудови мережі Петрі є отримання висновку про можливість апаратної реалізації та взаємодії базової системи з проектованою.

Блок-схема алгоритму роботи АСУ ТРП комплексу «ПІЧ-КІВШ» має вигляд, представлений на рис. 6.4.

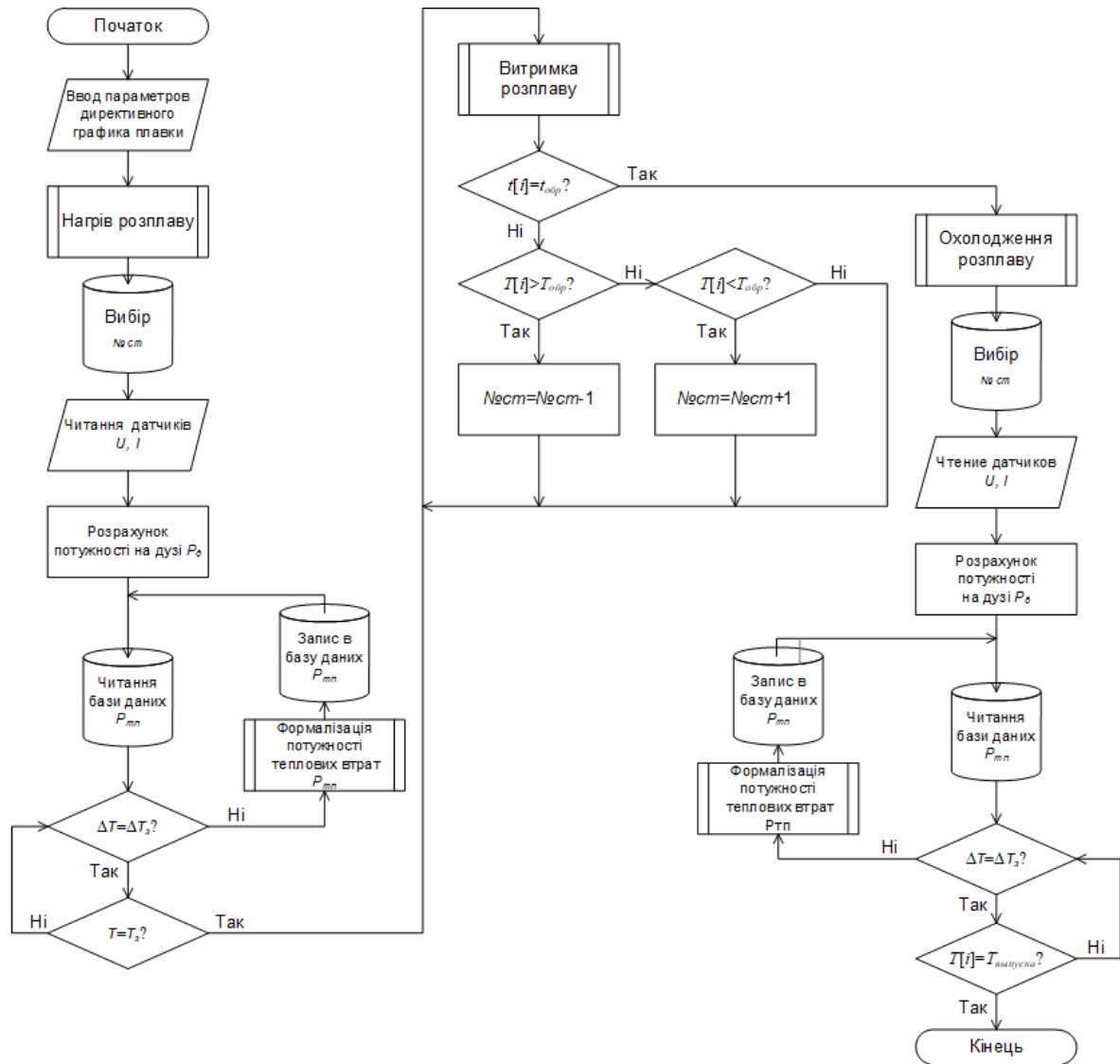


Рисунок 6.4. Блок-схема алгоритму роботи АСУ ТРП

Послідовність виконання операцій полягає в наступному:

1. Після отримання вхідних даних включається ступінь пічного трансформатора, який забезпечує максимальну швидкість нагрівання до заданої температури витримки.

2. Під час витримки металу задана температура підтримується з точністю $\pm 10^{\circ}\text{C}$: необхідне регулювання здійснюється перемиканням ступенів напруги пічного трансформатора.

3. Після закінчення часу витримки проводиться охолодження металу до температури випуску проводиться на ступені пічного трансформатора, яка забезпечує задану швидкість охолодження, з урахуванням того, що під час охолодження проводиться продувка аргоном.

4. Після досягнення температури випуску обробка металу на установці «ПІЧ-КІВШ» завершується.

Мережа Петри S визначається четвіркою множин $S=(P, T, I, O)$, де $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – кінцева множина позицій, $n \geq 0$, $T=\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – кінцева множина переходів, $m \geq 0$, а I и O – функції комунікативності. Причому множина позицій та переходів не перетинаються ($P \cap T = \emptyset$).

$I: P \rightarrow P^{\infty}$ є вхідною функцією – відображенням із переходів у комплекти позицій. $O: P \rightarrow P^{\infty}$ є вихідна функція – відображення переходів у комплекти позицій.

Потужність множини P є число $n=19$, а потужність множини T є число $m=22$. Довільний елемент P позначається символом p_i , $i=1, \dots, n$, а повільний елемент T – символом t_j , $j=1, \dots, m$.

Позиція p_i є вхідною позицією переходу t_j в тому випадку якщо $p_i \in I(t_j)$; p_i є вихідною позицією у тому випадку, якщо $p_i \in O(t_j)$. Входи та виходи переходів є комплектами позицій. Комплект є узагальненням множини, в яке включені багаторазово повторювані елементи - тиражовані елементи. Використання комплектів, а не множин для входів та виходів переходу дозволяє позиції бути кратним входом або кратним виходом переходу. Кратність вхідної позиції p_i для переходу t_j є кількість появи позиції у вхідному комплекті переходу, $\#(p, I(t_j))$. Аналогічно кратність вихідної позиції p_i для переходу t_j є кількість появи позиції у вихідному комплекті

переходу, $\#(p, O(t_j))$. Якщо вхідна та вихідна функції є множинами (а не комплектами), то кратність кожної позиції є або 0 або 1.

Вхідні та вихідні функції використовуються для відображення позицій у комплекти переходів, а також їх можна використовувати для відображення переходів у комплекти позицій. Визначимо, що перехід t_j є входом позиції p_i , якщо p_i є вихід t_j . Перехід t_j є вихід позиції p_i , якщо p_i є вхід t_j .

Визначимо розширену вхідну та вихідну функції $I: P \rightarrow T^\infty$, $O: P \rightarrow T^\infty$ таким чином, що $\#(t_j, I(p_i)) = \#(p_i, O(t_j))$, $\#(t_j, O(p_i)) = \#(p_i, I(t_j))$.

Значною мірою теоретична робота по мережах Петрі ґрунтується на формальному визначенні, викладеному вище. Проте для ілюстрації понять набагато зручніше графічне уявлення мережі Петрі. Теоретико-графовим поданням мережі Петрі є орієнтований дводольний мультиграф.

Структура мережі Петрі є сукупність позицій і переходів. Відповідно до цього граф мережі Петрі має два типи вузлів: \circ – позиція та $|$ – перехід.

Орієнтовані дуги з'єднують позиції та переходи, причому деякі дуги спрямовані від позицій до переходів, інші – від переходів до позицій. Дуга, спрямована від позиції p_i переходу t_j , визначає позицію, яка є входом переходу. Кратні входи в перехід вказуються кратними дугами із вхідних позицій у перехід. Вихідна позиція вказується дугою від початку позиції. Кратні виходи також є дугами. Мережа Петрі є мультиграфом, оскільки він допускає існування кратних дуг від однієї вершини графа до іншої. Слід додати, що, оскільки дуги є спрямованими, це орієнтований мультиграф. Ми знаємо, що вершини графа можна розділити на дві множини (позиції та переходи) таким чином, що кожна дуга буде спрямована від елемента однієї множини (позицій або переходів) до елемента іншої множини (переходів або позицій); отже, такий мультиграф є дводольним орієнтованим мультиграфом.

Граф G сети Петри є дводольний орієнтований мультиграф, $G=(V,A)$, де $V=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ – множина вершин, а $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – комплект спрямованих дуг, $a_i=(v_j, v_k)$, где $v_j, v_k \in V$. Множина V може бути розбита на два непересічні підмножини P та T , таких, що $V=P \cup T$, $P \cap T = \emptyset$, й для будь якої спрямованої дуги $a_i \in A$, якщо $a_i=(v_j, v_k)$, тоді либо $v_j \in P$ и $v_k \in T$, либо $v_j \in T$ и $v_k \in P$.

Визначим $V=P \cup T$. Визначимо A як комплект спрямованих дуг, такий, що для всіх $p_i \in P$ и $t_j \in T$.

$$\#((p_i, t_j), A) = \#(p_i, I(t_j)), \quad \#((t_j, p_i), A) = \#(p_i, O(t_j)). \quad (6.1)$$

$G=(V,A)$ є граф мережі Петрі, еквівалентний структурі мережі Петрі $C=(P, T, I, O)$.

Мережа Петрі для моделювання паралельної роботи АСУ ТРП та базової АСУ в аналітичному поданні має наступний вид представлений у табл. 6.1.

Графічне уявлення мережі Петрі показано на рис 6.5. Подальший аналіз процесів управління АСУ ТРП «ПЕЧ-КОВШ» з допомогою побудованої мережі Петрі проводиться у термінах маркування, виконання, простору станів, і навіть дерева досяжності мережі Петри (див. рис. 6.6). Аналізуючи отримане дерево, можна сказати, що розроблена мережа Петрі обмежена на підставі таких висновків. Позиція $p_i \in P$ мережі Петри $C=(P, T, I, O)$ з початковим маркуванням $\mu \in k$ -обмеженою, якщо $\mu'(p_i) \leq k$ для всіх $\mu' \leq R(C, \mu)$. При цьому кількість фішок у ній не може перевищувати ціле число k . Мережа Петрі обмежена, якщо її позиції обмежені. Обмежену мережу Петрі можна реалізувати апаратно, тоді як мережу Петрі з необмеженими позиціями у випадку реалізувати апаратно не можна.

Таблиця 6.1 – Функції комунікативності

Вхідна функція	Вихідна функція
$I(p_1) = \{ \};$	$O(p_1) = \{t_1\};$
$I(p_2) = \{t_1\};$	$O(p_2) = \{t_2\};$
$I(p_3) = \{t_2\};$	$O(p_3) = \{t_3\};$
$I(p_4) = \{t_3, t_{23}\};$	$O(p_4) = \{t_4\};$
$I(p_5) = \{t_4\};$	$O(p_5) = \{t_5, t_{23}\};$
$I(p_6) = \{t_5, t_{16}, t_{17}, t_{18}\};$	$O(p_6) = \{t_6\};$
$I(p_7) = \{t_6\};$	$O(p_7) = \{t_7, t_{12}\};$
$I(p_8) = \{t_7\};$	$O(p_8) = \{t_8\};$
$I(p_9) = \{t_8, t_{10}\};$	$O(p_9) = \{t_9\};$
$I(p_{10}) = \{t_9\};$	$O(p_{10}) = \{t_{10}, t_{11}\};$
$I(p_{11}) = \{t_{11}\};$	$O(p_{11}) = \{ \};$
$I(p_{12}) = \{t_{12}\};$	$O(p_{12}) = \{t_{13}, t_{15}\};$
$I(p_{13}) = \{t_{13}\};$	$O(p_{13}) = \{t_{14}, t_{17}\};$
$I(p_{14}) = \{t_{14}\};$	$O(p_{14}) = \{t_{18}\};$
$I(p_{15}) = \{t_{15}\};$	$O(p_{15}) = \{t_{16}\};$
$I(p_{16}) = \{t_{20}\}$	$O(p_{16}) = \{t_{19}\};$
$I(p_{17}) = \{t_{19}\};$	$O(p_{17}) = \{t_{20}\};$
$I(p_{18}) = \{t_{22}\};$	$O(p_{18}) = \{t_{21}\};$
$I(p_{19}) = \{t_{21}\}.$	$O(p_{19}) = \{t_{22}\}.$

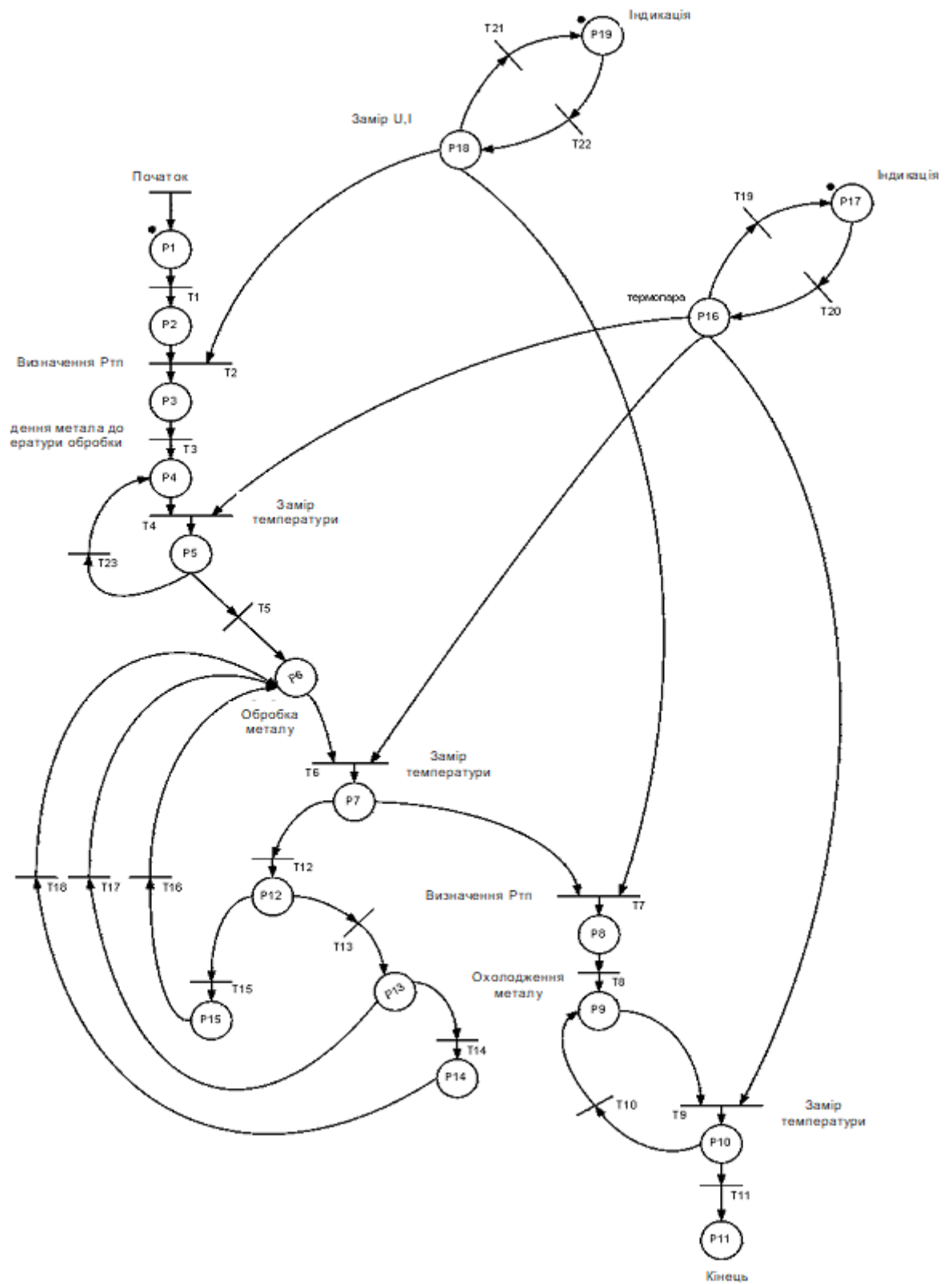


Рисунок 6.5 - Мережа Петрі для моделювання взаємодії АСУ ТРП та базової АСУ

Тупикова позиція у цій мережі лише одна – позиція після переходу T11. Однак, ця позиція – 0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1 – є закінченням роботи алгоритму. Решта всіх переходів є активними, тобто можуть бути дозволені. Перехід t_j сети Петри C є потенційно запуслим у маркуванні μ , так як існує маркування $\mu' \in R(C, \mu)$, в якій t_j дозволено. Таким чином, запропонований алгоритм є реалізованим і не містить помилок, які можуть призвести до відмови системи.

Розглянемо реалізацію алгоритму управління технологічного комплексу «ПІЧ-КІВШ» у розподіленій дворівневій АСУ ТРП (см. рис. 6.7).

Отримана мережа Петрі є такою, що не зберігає з таких міркувань: мережа Петрі $C=(P, T, I, O)$ з початковим маркуванням μ є суворо зберігає, якщо для всіх $\mu' \in R(C, \mu)$ виконується рівність [49].

$$\sum_{p_i \in P} \mu'(p_i) = \sum_{p_i \in P} \mu(p_i) \quad (6.2)$$

З цієї умови випливає, що число входів у кожен перехід має дорівнювати кількості виходів з нього $(|I(t_j)| = |O(t_j)|)$, що не спостерігається, отже, мережа не зберігається, але це не є недоліком, так як дана мережа не працює з ресурсами, збереження яких було б необхідним.

Локальні системи управління (ЛСУ) побудовані на ПЛК базової АСУ, запрограмовані на виконання алгоритму управління технологічними ділянками. Завдання управління ПТК вирішується в АСУ другого рівня. Функції алгоритму другого рівня розділені в такий спосіб:

- між двома ПЛК, що виконують алгоритми регулювання потужності (горіння дуги) та теплового режиму плавки, відповідно;
- автоматизованого робочого місця оператора, що здійснює функції завдання технологічних параметрів плавки, візуалізації та контролю.

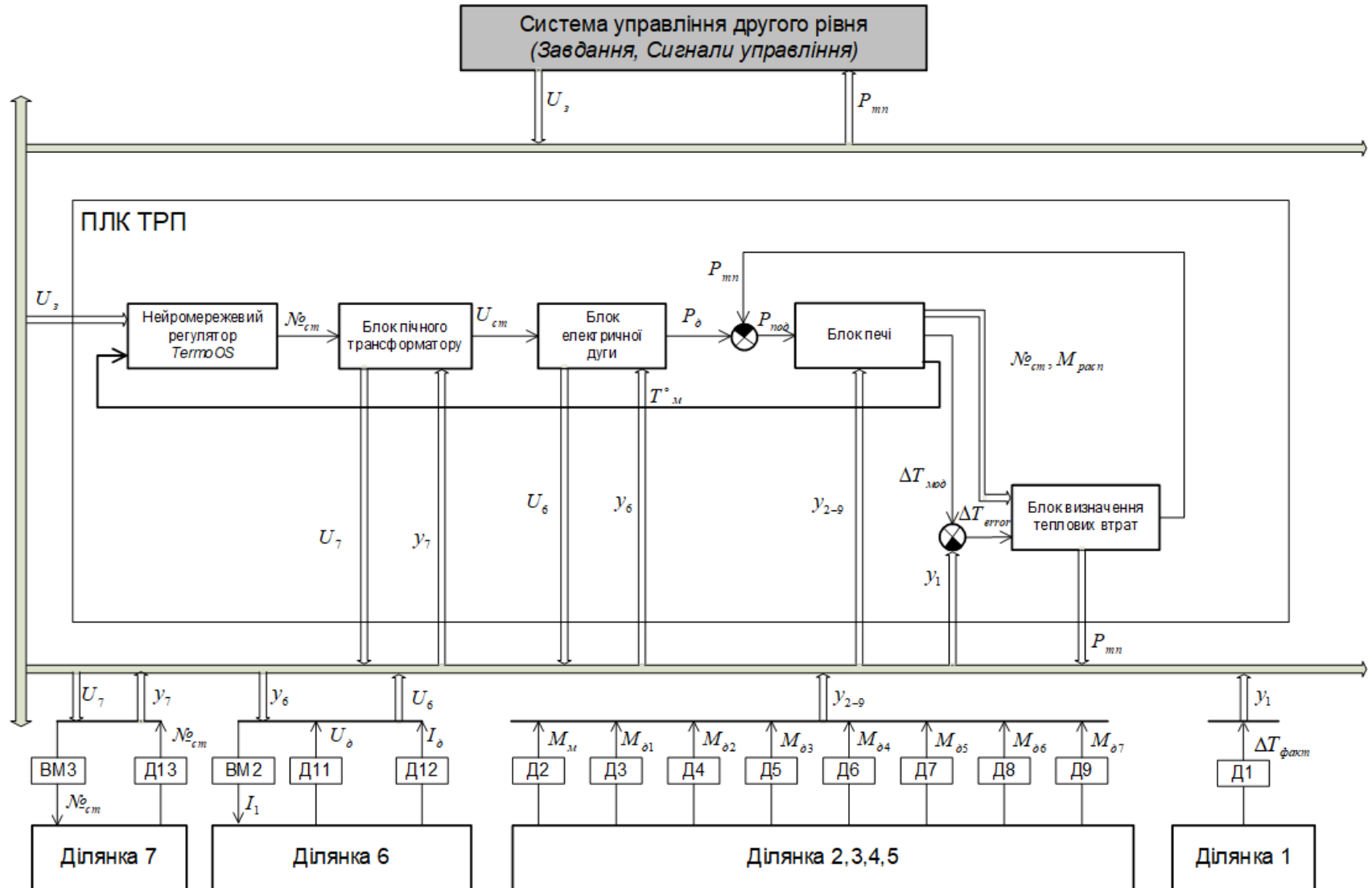


Рисунок 6.7 - Дворівнева АСУ ТП технологічного комплексу «ПІЧ-КІВШ» на базі технології Profibus

7 ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ШАХТ

7.1 Електроспоживання вугільних шахт за технологічними процесами

Вугільні шахти у більшості випадків – потужні споживачі двох видів енергії – електричної та теплової. При цьому практично завжди електропостачання здійснюється централізовано (від енергосистеми), а теплопостачання – від власних котелень. Такий варіант енергозабезпечення вугільних шахт склався ще за часів радянської централізованої економіки і сьогодні повністю вичерпав себе, оскільки його ефективність дуже низька і не забезпечує необхідного рівня енергетичної безпеки функціонування вуглевидобувних підприємств.

Технологічні аспекти безпеки роботи вугільних шахт пов'язані з їх специфікою. Ці підприємства є енергоємними споживачами (максимальне навантаження досягає 15 МВт і вище) з наявністю електроприймачів I категорії за надійністю електропостачання і обов'язковим покриттям навантажень аварійної броні. Остання обставина обумовлена специфікою вугільного підприємства, що визначається умовами підземного видобутку корисної копалини і гірничо-геологічними особливостями.

На шахті виробничий цикл з видобутку вугілля складається з багатьох різних технологічних процесів, в яких задіяні різноманітні гірничі машини, транспортні системи та установки. При цьому частка від загального споживання електроенергії однотипних технологічних ланок на різних шахтах не є якоюсь постійною величиною (табл. 7.1).

Підвищення енергоефективності є одним з основних джерел зниження собівартості видобутку вугілля на найближчу перспективу. Хоча цій проблемі приділялась і раніше значна увага, з наукової точки зору невирішеними для шахт залишаються такі питання, як визначення

фактичного потенціалу енергозбереження, виявлення взаємозв'язків між технологічними і енергетичними параметрами гірничої техніки, розробка засобів енергоконтролю. Важливими є також заходи та проекти щодо підвищення енергоефективності окремих потужних установок та електроенергетичного комплексу шахт в цілому.

Таблиця 7.1 – Усереднені рівні електроспоживання технологічних процесів та установок вугільних шахт

Технологічний процес (установка)	Рівень електроспоживання, %
Видобувні та підготовчі роботи	5 – 20
Конвеєрний транспорт	2 – 10
Підйомні установки	10 – 30
Водовідлив	5 – 40
Вентиляція	20 – 30
Компресорні установки	5 – 40
Освітлення	2 – 5
Власні потреби	10 – 20

Слід відмітити, що на шахтах з пологим заляганням вугільних пластів частка використання електроенергії компресорами незначна і навпаки, при крутому заляганні, вона значно зростає.

7.2 Аналіз режимів електроспоживання шахтних технологічних установок на прикладі вентилятору головного провітрювання

Шахтні вентиляторні установки належать до установок безперервної дії, які працюють у тривалому режимі з малою кількістю пусків і зупинок. Особливістю влаштування вентиляторів головного провітрювання (ВГП) є необхідність забезпечення повного технологічного резерву, тобто на

шахті мають бути встановлені дві ідентичні вентиляторні установки, які працюють по черзі. Тривалість роботи залежить від умов конкретної шахти і становить, як правило, один місяць.

Фактичний режим роботи ВГП визначається його робочою точкою, яка характеризується основними технічними параметрами вентилятора: продуктивністю, тиском (депресією за всмоктувальної схеми вентиляції) і коефіцієнтом корисної дії (ККД). Будь-яка суттєва зміна схеми вентиляції, перерізу і довжини провітрюваних виробок, використання вентиляційних дверей і навіть рух скіпа в головному стовбурі назустріч або попутно повітряному потоку призводить до зміщення робочої точки та зміни режиму роботи ВГП і, як наслідок, до нових значень усіх технічних та енергетичних параметрів. Однак протягом доби такі зміни несуттєві, і вентиляторні установки, обладнані застарілим неефективним електроприводом, практично не реагують на них. Водночас за умови використання сучасних систем регульованого електроприводу на базі напівпровідникових перетворювачів (НП) режим роботи ВГП може змінюватися істотно. Така сама ситуація характерна і в разі суттєвих змін у схемі вентиляції (наприклад, відкриття нового робочого горизонту), кількості очисних вибоїв, які розробляють, коливань метанообільності та інших чинників.

Аналізу режимів електроспоживання та їх ефективності загалом для вугільних шахт та її окремих технологічних процесів присвячені певні цикли наукових робіт. Так, у роботі [50] розглядається багатофакторне прогнозування електроспоживання вугільної шахти за допомогою нейронної мережі в розрізі річного інтервалу часу. Роботи [51, 52] присвячені обґрунтуванню та розробці багаторівневої інтелектуальної системи керування електроспоживанням стаціонарних установок гірничо-збагачувальних комбінатів та рудних шахт.

Питання електромагнітної сумісності та якості електроенергії в електричних мережах гірничовидобувних підприємств розглядаються у

роботах [53, 54]. Можливі заходи щодо підвищення ефективності електроспоживання головної водовідливної установки вугільної шахти запропоновані у роботах [55, 56]. Безпосередньо фактичні режими електроспоживання головних та допоміжних підйомних установок шахти всебічно аналізуються у роботах [57, 58]. Однак, як бачимо, енергетичним параметрам роботи вентилятора головного провітрювання як одного з найпотужніших споживачів вугільної шахти у наукових публікаціях не приділено достатньої уваги.

Профілі електроспоживання технологічних установок вугільної шахти відповідають, в основному, змінному або добовому часовому інтервалу. На рис. 7.1 наведені фактичні добові графіки електричних навантажень (ГЕН) двох різних ВГП вугільних шахт з системами регульованого електропривода на базі перетворювача частоти синхронного високовольтного (ПЧСВ) із синхронними двигунами (СД) номінальною потужністю 3200 і 1250 кВт. Як бачимо, перший вентилятор працює із завантаженням $\approx 80-85\%$, а другий – $\approx 50\%$, що свідчить про "глибоке" регулювання його технологічних параметрів.

На рис. 7.2 наведений фактичний добовий профіль електроспоживання ВГП з системою регульованого електропривода на базі асинхронно-тиристорного каскаду (АТК) із асинхронним двигуном (АД) номінальною потужністю 3800 кВт. Особливістю такої системи є необхідність підключення до мережі 6 кВ окремо ротора та статора двигуна, а також можливість генерації енергії в мережу через роторне коло під час рухомого та гальмівного режимів роботи. Тому на рис. 7.2 представлені діаграми активної та реактивної потужностей окремо для статора і ротора двигуна.

Варто відзначити досить велике значення генерованої через роторне коло і трансформатор АТК активної потужності, яка становить близько 350-380 кВт за номінальної потужності двигуна 3800 кВт. Ця величина визначається в основному його відносно малим завантаженням

(0,55-0,6 від номінального) і, відповідно, "глибоким" поточним регулюванням технологічних параметрів вентиляторної установки, спричиненими вибором ВГП "із запасом" на подальше підвищення продуктивності шахти й відповідний розвиток гірничих робіт, тобто збільшення протяжності підземних виробок.

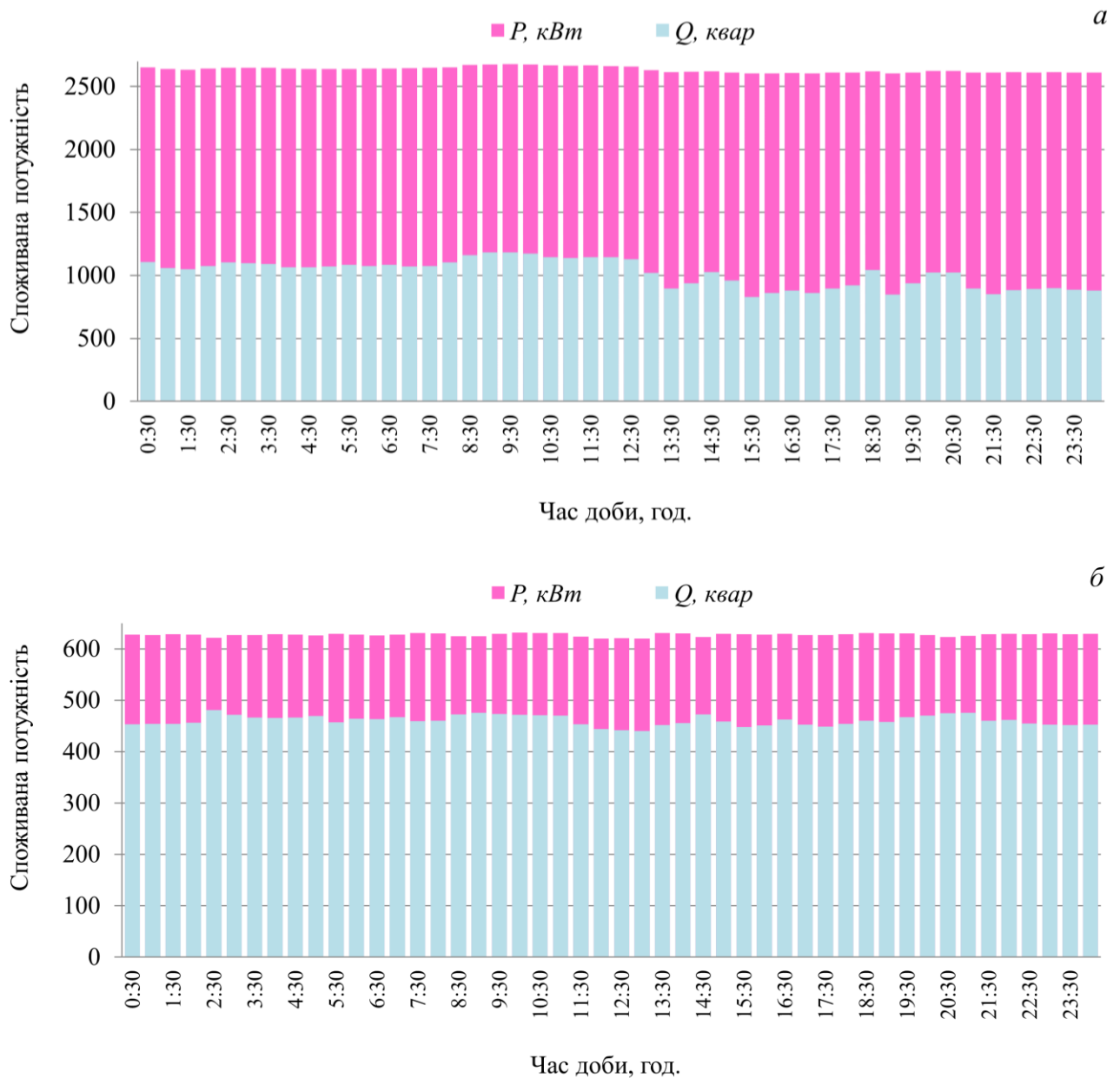


Рисунок 7.1 – Фактичні добові профілі електроспоживання ВГП з системою ПЧСВ та синхронними двигунами потужністю 3200 кВт (а) і 1250 кВт (б)

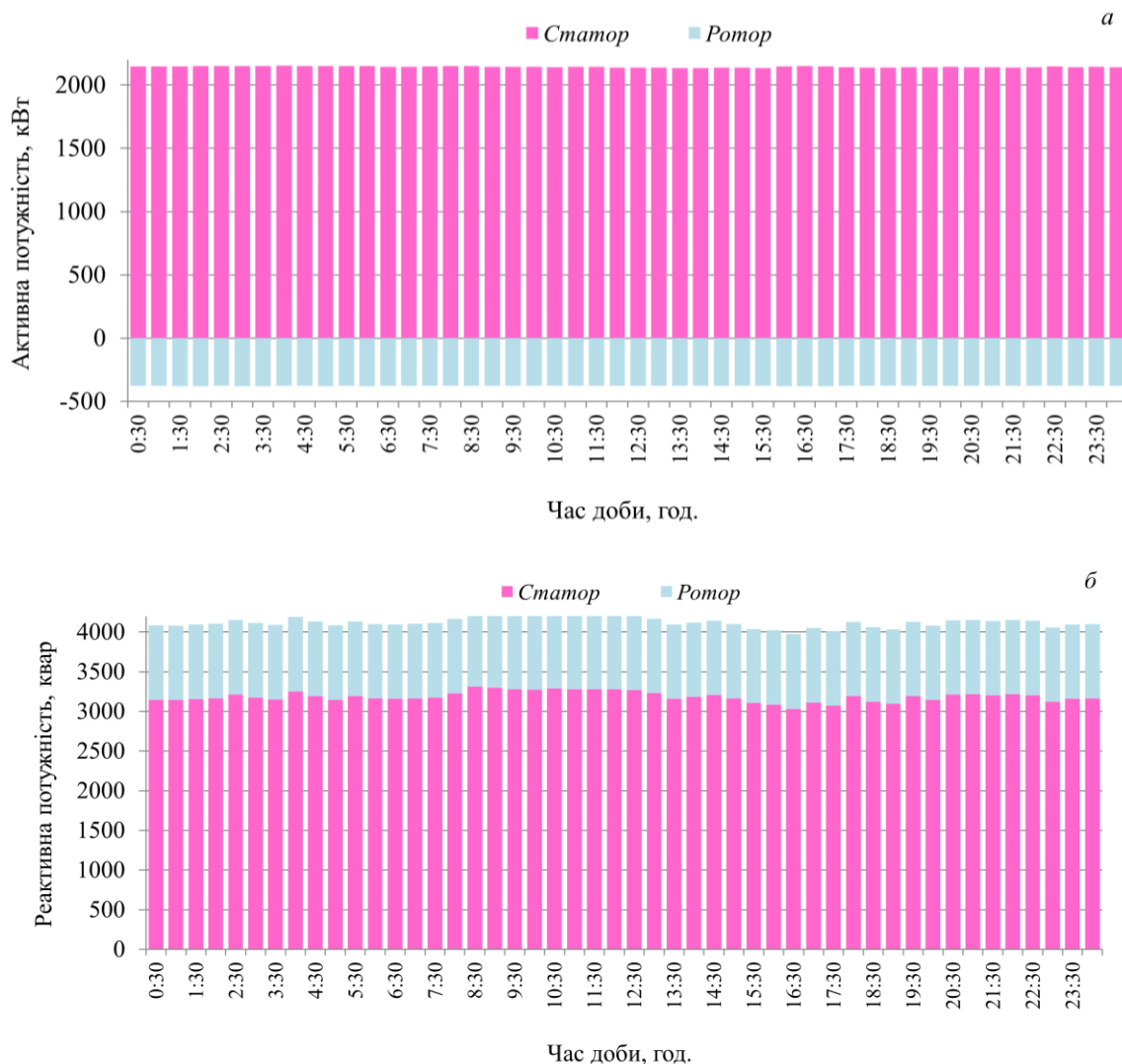


Рисунок 7.2 – Фактичні добові профілі електроспоживання ВГП з системою АТК та АД потужністю 3800 кВт для активної (а) і реактивної (б) потужностей

У табл. 7.2 наведені усереднені параметри профілів електроспоживання вентиляторних установок, що визначені для вибірок з кількістю реалізацій: ВГП з ПЧСВ та двигуном 3200 кВт – 7 реалізацій, ВГП з ПЧСВ 1250 кВт – 24, ВГП з АТК 3800 кВт – 21 реалізація.

Дані рис. 7.1 і 7.2, а також табл. 7.2, свідчать про значну рівномірність профілів електроспоживання ВГП незалежно від системи електроприводу, особливо за активною потужністю (коефіцієнт форми k_f лише в четвертому або п'ятому знаку після коми перевищує одиницю).

Таблиця 7.2 – Усереднені значення параметрів фактичних добових профілів електроспоживання ВГП

Параметр	Позначення	Величина параметру для		
		ВГП з ПЧСВ 3200 кВт	ВГП з ПЧСВ 1250 кВт	ВГП з АТК 3800 кВт
Витрата електроенергії: активної, кВт·год реактивної, квар·год	W_P W_Q	63100 24400	15020 11050	42420 98980
Математичне сподівання потужності: активної, кВт реактивної, квар	P_c^* Q_c	2630 (82,2) 1020	627 (50,2) 461	1770 (46,6) 4120
Середньоквадратична потужність: активна, кВт реактивна, квар	$P_{ск}$ $Q_{ск}$	2631 1024	628 465	1771 4125
Дисперсія потужності: активної, кВт ² реактивної, квар ²	DP DQ	525 11850	9 95	17 3970
Середньоквадратичне відхилення: активної, кВт (%) реактивної, квар	σP^* σQ	23 (0,7) 109	3 (0,2) 10	4(0,1) 63
Коефіцієнт форми	k_{ϕ}	1,0004	1,00001	1,0006
Коефіцієнт потужності	$\cos\phi$	0,93	0,81	0,4

* У дужках вказані значення у відсотках від номінальної потужності двигуна

Такий стабільний режим електроспоживання визначається практично рівномірним за завантаженням протягом доби режимом роботи вентиляторної установки (відносно значення середньоквадратичного відхилення не перевищує 1%). Важливою особливістю режиму електроспоживання ВГП із системою ПЧСВ є відносно високе значення коефіцієнта потужності на рівні 0,8-0,95, що пояснюється технічними особливостями і принципом роботи СД. При чому більше значення характерне для вентиляторної установки з меншою глибиною регулювання технологічних параметрів, менше – для "глибокого" регулювання.

Однак абсолютні величини споживання реактивної потужності достатньо великі та складають 460 і 1000 квар для двигунів номінальною потужністю 1250 і 3200 кВт відповідно. Для системи АТК ситуація із реактивним навантаженням значно гірша: середнє значення $\cos\phi = 0,4$ (у середньому 0,4), а споживання реактивної потужності перевищує 4 Мвар. Це пояснюється "природою" АД та великим поточним діапазоном регулювання технологічних параметрів ВГП, який забезпечує система АТК.

7.3 Регулювання електроспоживання вугільної шахти для зниження пікових навантажень в енергосистемі

Одним із основних викликів для енергетичної системи України є проблема покриття нерівномірності графіків електричного навантаження (ГЕН), яка останнім часом тільки ускладнилася через військові дії та масовані атаки ворога на енергетичну інфраструктуру нашої країни. Добові графіки виробництва та споживання електричної енергії в ОЕС України для різних періодів року характеризуються значною нерівномірністю (в основному – за рахунок приросту побутового й комунального електроспоживання) [59].

Аналіз фактичних режимів генерації та споживання електричної енергії в ОЕС України, приклади яких наведено на рис. 7.3, дозволяє стверджувати, що твердопаливними енергоблоками теплових електростанцій (ТЕС) потужністю 150-300 МВт, що мають досить обмежений «маневрений» потенціал, покривалось (на період довоєнного стану в країні) загалом споживання величиною до 3 ГВт. При цьому, залежно від пори року потужності ТЕС регулюється протягом доби [59-61]. Станом на лютий 2022 р. (режим роботи ОЕС до початку повномасштабної російської агресії), глибина регулювання з використанням ТЕС знизилася в кілька разів внаслідок спаду промислового виробництва, дефіциту вугілля, зростання обсягів ВДЕ і переважне балансування навантажень з використанням ГЕС (рис. 7.3).

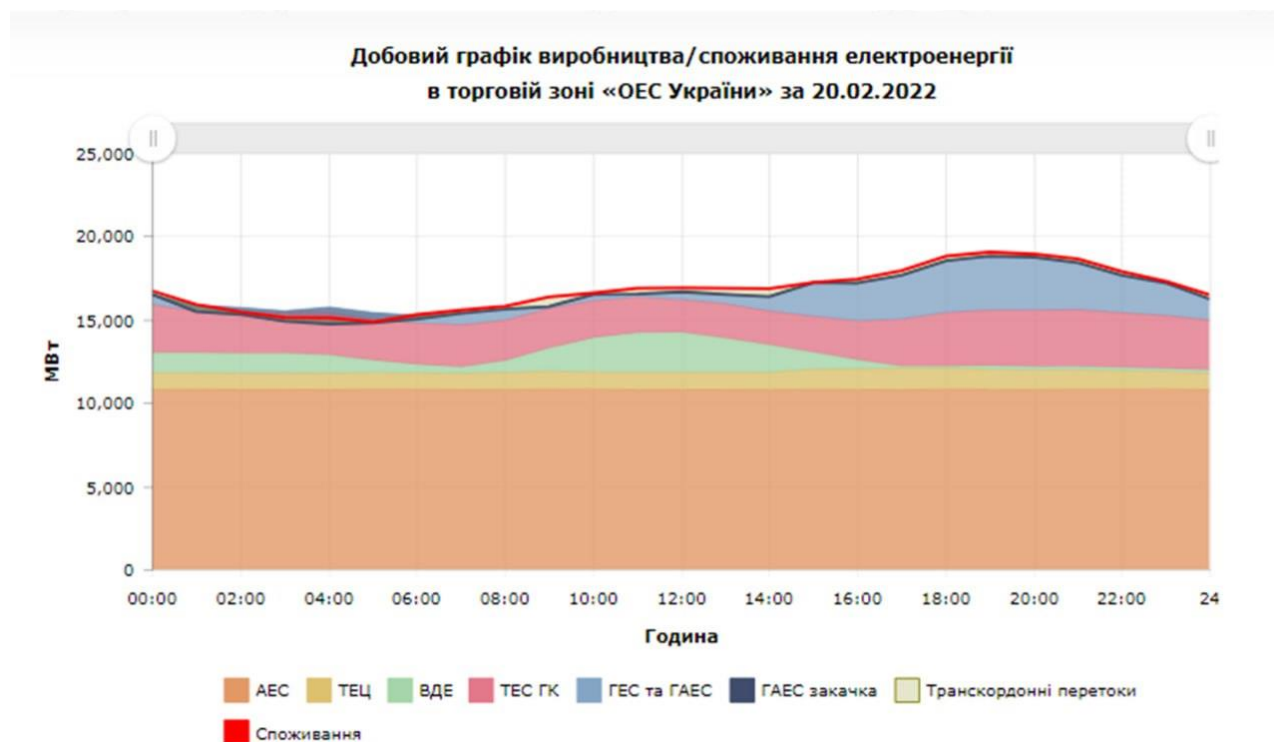


Рисунок 7.3 – Приклад фактичного добового ГЕН енергосистеми України станом на 20.02.2022 р.

Руйнування енергетичної інфраструктури за період військового вторгнення в Україну призвело до зниження генерації на понад 40% порівняно із 2021 р. (рис. 7.4). Найбільші втрати генеруючих потужностей зазнали саме теплові електростанції, робота яких, разом з гідроенергетикою, забезпечує покриття пікових навантажень в енергосистемі.

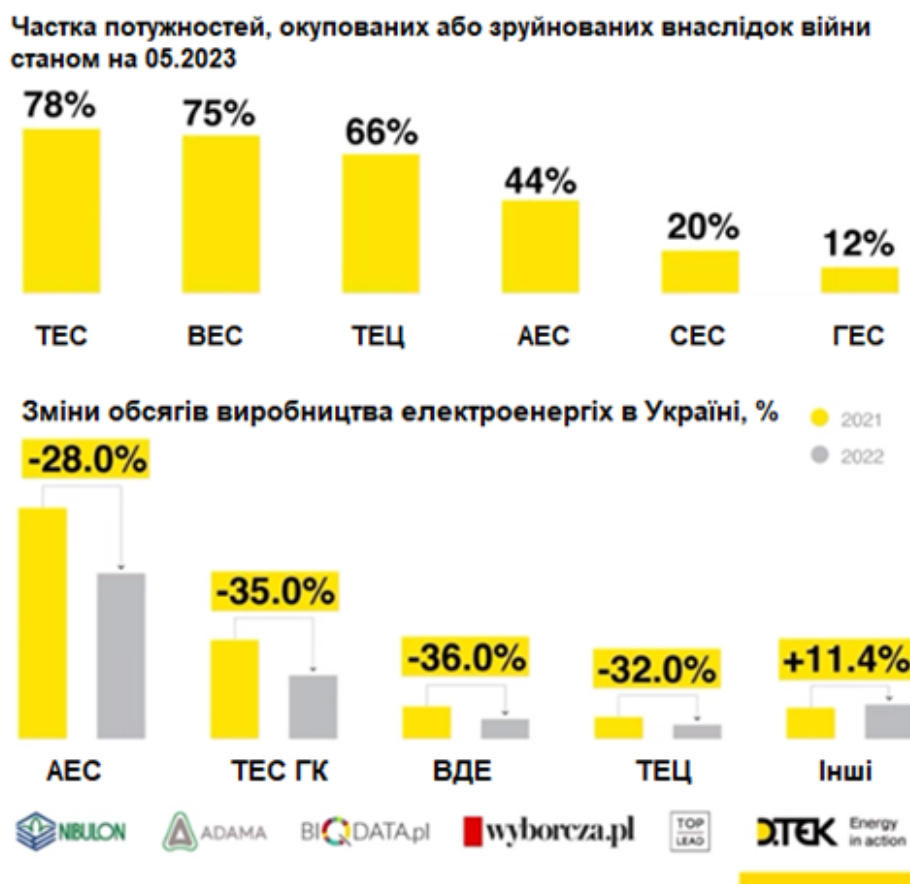


Рисунок 7.4 – Рівень пошкодження (окупації) систем виробництва електроенергії та зміни обсягів генерації внаслідок російської агресії

Низька якість вугілля та технічні обмеження (у першу чергу у зв'язку з фізичним зносом) зумовлюють зниження фактичного регульовального діапазону енергоблоків ТЕС до рівня 20% при проектному – 30-40%. Внаслідок низької частки високоманевреної складової системи генерації (ГЕС, ПГУ, ГТУ, СЕН) та обмеження регульовального діапазону ТЕС, в

енергосистемі практикуються щодобові зупинки 7-10 блоків на період нічного зниження навантаження з наступними їх пусками до ранкового/вечірнього максимуму навантаження. Такі режими приводять до зменшення ресурсу устаткування, підвищеної аварійності та перевитрат палива [55].

З позицій вирішення проблеми забезпечення максимальних навантажень в енергосистемі важливими факторами є їх рівень та часові інтервали виникнення в розрізі доби. Аналіз фактичних добових ГЕН енергосистеми (див. рис. 7.3) свідчить, що взимку пікові навантаження спостерігаються з 17:00 по 22:00 год. Це корелюється з ціновими індикаторами ринку електроенергії, де періоди дефіциту генеруючих потужностей супроводжуються суттєвим зростанням цін на електроенергію (див. рис. 7.5).

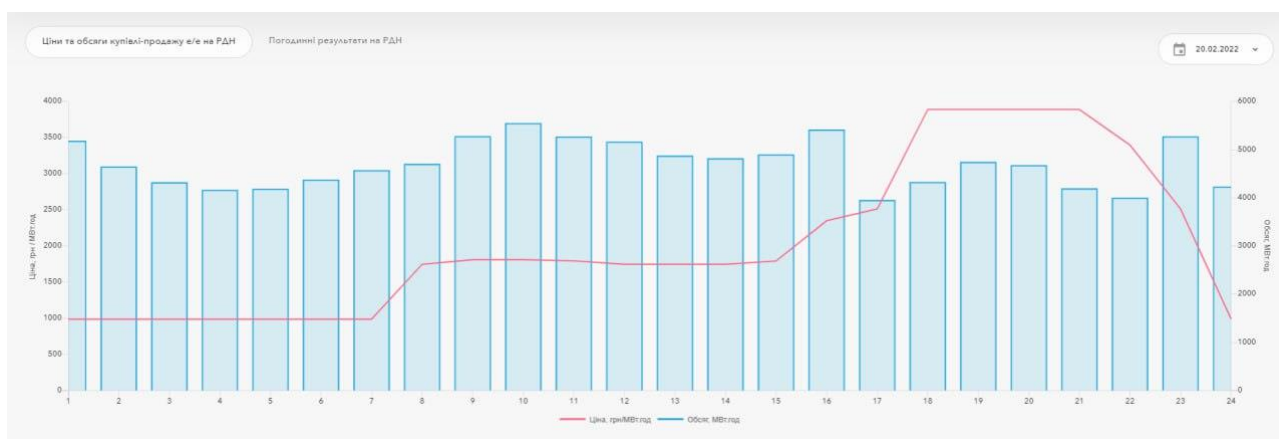
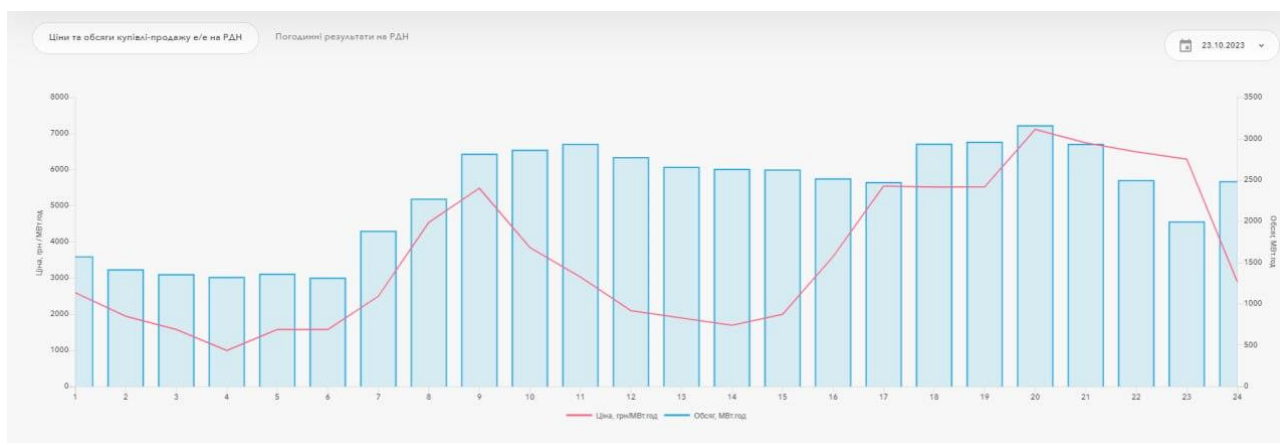


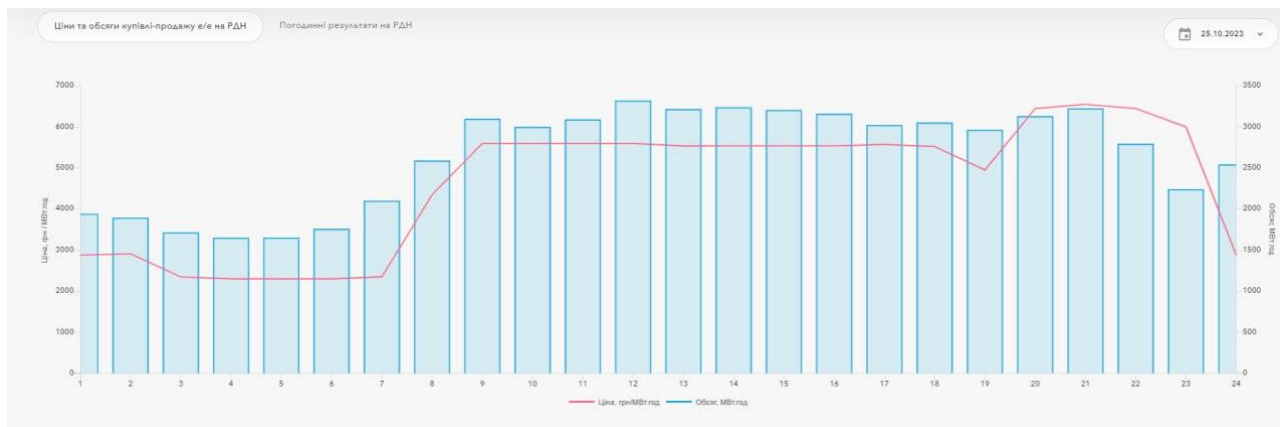
Рисунок 7.5 – Ціни та обсяги купівлі-продажу електроенергії на ринку на добу наперед (РДН) за 20.02.2022 р.

На рис. 7.6 наведено ціни та обсяги купівлі-продажу електроенергії на РДН, за якими простежується прогнозована генерація ВДЕ, зумовлена очікуваними режимами роботи фотоелектричних станцій (ФЕС). За умови суттєвої генерації ФЕС (сприятливі метеоумови), цінові пропозиції в ці періоди знижуються, формуючи денний напівок вартості електричної

енергії, який знаходиться між ранковим та вечірнім піками (рис. 7.6, а). За умови зниженої інсоляції спостерігатимуться переважно два періоди цінових пропозицій – нічний провал і денний режим навантаження (рис. 7.6, б). Виходячи з наведеного можемо спостерігати три або дві зони формування вартості електричної енергії, що залежать не тільки від попиту на неї, а ще й від особливостей генерації ВДЕ.



а



б

Рисунок 7.6 – Ціни та обсяги купівлі-продажу електроенергії на РНД: двозонний (а) та тризонний (б) залежно від рівня генерації ВДЕ

Визначальний вплив на форму графіка навантаження ОЕС має населення та комунально-побутові споживачі, частка електроспоживання яких з урахуванням спаду промислового виробництва (металургія) в

сукупному енергобалансі перевищує 50%. Слід зазначити, що регульовальний потенціал відповідних споживачів частково забезпечується наявністю зонних тарифів зі зниженою ставкою протягом нічного провалу навантаження енергосистеми. Проте, потужні промислові підприємства, що працюють цілодобово, також мають резерви щодо регулювання власних ГЕН за умови зміни режиму роботи та наявності технологічних операцій, які можуть бути зміщені у часі з урахуванням добової динаміки зміни вартості електричної енергії.

Підприємства мають впроваджувати заходи з регулювання режимів електроспоживання, використовуючи з цією метою споживачі-регулятори (СР), які здатні до обмеження або перенесення частини свого електричного навантаження з одних годин доби на інші (при добовому регулюванні) або з робочих днів на вихідні (при тижневому регулюванні). При чому зміна режиму роботи СР має відбуватися без завдання шкоди протіканню технологічного процесу, у якому вони задіяні.

Однак у деяких випадках споживачем-регулятором може виступати не окрема технологічна установка, а саме підприємство. На рис. 7.7 наведені фактичні добові ГЕН двох різних вугільних шахт Західного Донбасу. Форма графіків свідчить про значне зниження електроспоживання приблизно з 8:30 до 13:30 год. Варто зазначити, що схожий профіль навантаження характерний майже для всіх вугільних шахт, відрізняються тільки абсолютні значення потужності залежно від продуктивності та технічної озброєності підприємства. Це пояснюється режимом роботи шахт: три 6-ти годинні вуглевидобувні зміни та одна 6-ти годинна зміна з ремонту обладнання, під час якої видобуток вугілля не виконується, тобто не працюють потужні підземні технологічні комплекси (видобувне та прохідницьке обладнання, конвеєрний транспорт, вугільний підйом тощо). Аналіз наведених ГЕН (рис. 7.7) свідчить, що ремонтна зміна триває з 8:00 до 14:00.

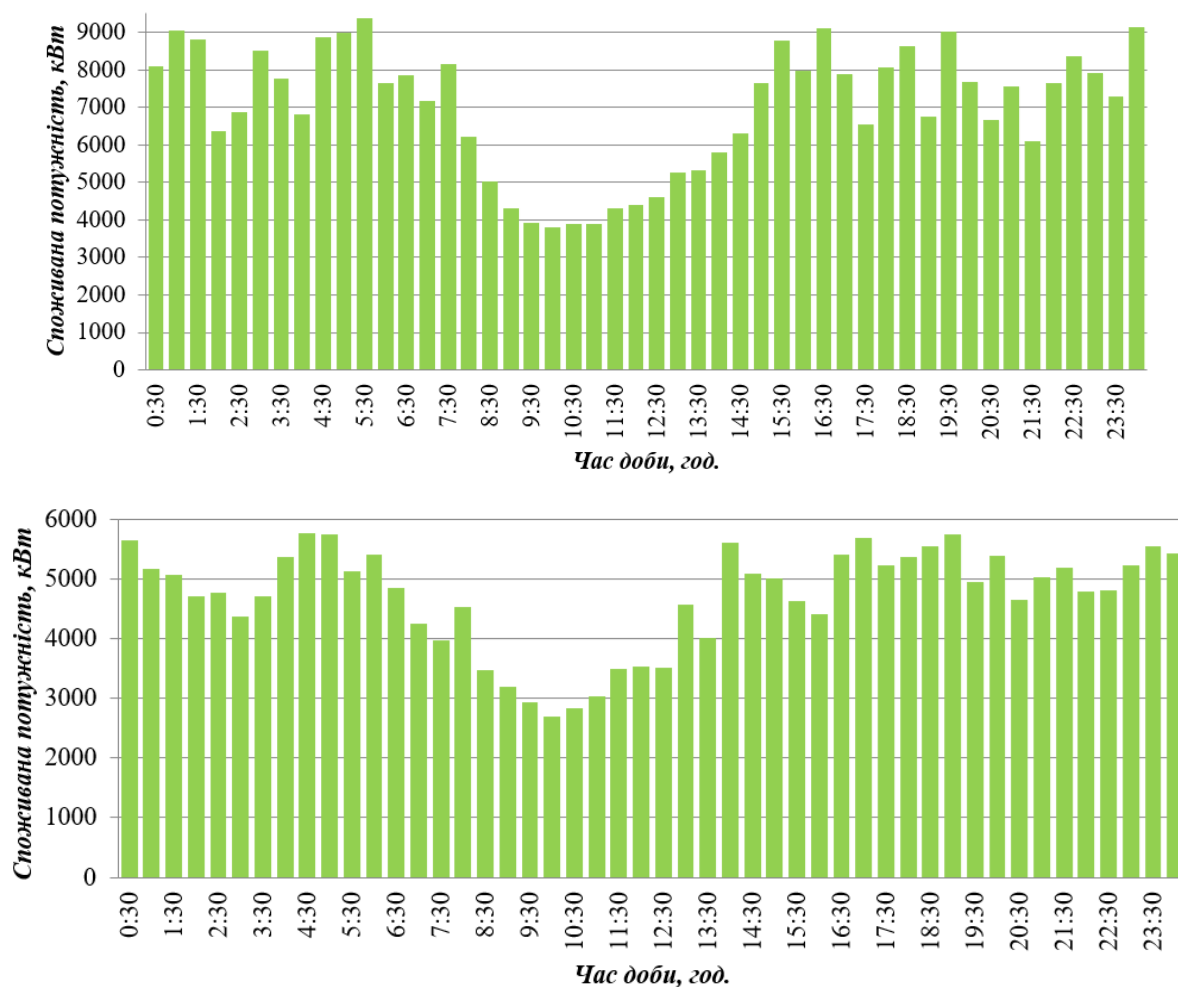


Рисунок 7.7 – Фактичні добові ГЕН двох різних вугільних шахт Західного Донбасу

З урахуванням наведених вище обґрунтувань, найбільш ефективно шахта буде виконувати регулювання власних режимів електроспоживання у випадку, максимального зниження потужності споживання протягом періоду вечірніх пікових навантажень (рис. 7.7). Це досягається шляхом зміни режиму роботи підприємства, а саме – перенесення ремонтної зміни на часовий діапазон з 18:00 до 24:00 год з відповідним зміщенням видобувних змін. Впровадження такого організаційного заходу практично не вимагатиме додаткових економічних витрат. Основна складність – технологічна адаптація поточного режиму роботи вугільних шахт, упорядкування логістики тощо. Зниження

потужності споживання у вечірні пікові години у середньому можна оцінити на рівні 2 - 3 МВт для одного такого підприємства, що є співрозмірним зі споживанням міського мікрорайону.

З урахуванням відміни зонних тарифів для побутових споживачів та особливостей роботи нового ринку електричної енергії, економічні стимули регулювання режимів електроспоживання видозмінилися, проте не втратили своєї сутності та актуальності. Адаптація режиму роботи споживача до умов ринку аналогічно стимулює знижувати обсяги споживання у періоди високої вартості електричної енергії та максимально переносити енергоємні операції на періоди зниженої вартості. Аналіз ринку електричної енергії дозволив встановити, що рівень цін відповідає певним зонам доби і змінюється для них. Тобто, для підприємств фактично існує «прихований» двозонний тариф на електроенергію, а також тризонний, за відповідних умов роботи системи ВДЕ (див. рис. 7.6).

Для підвищення ефективності регулювання режимів електроспоживання слід враховувати потужні технологічні установки вугільних шахт, насамперед головну водовідливну установку, підземний конвеєрний транспорт, вугільний підйом. При забезпеченні певних технічних передумов (наприклад, достатня ємність водозбірників, наявність підземних бункерів на основному транспортному потоці) такі установки можуть бути достатньо ефективними СР [62, 63, 64].

Крім того, навіть закриті вугільні шахти можна використовувати як СР, якщо вони законсервовані «сухим» способом. Суха консервація передбачає, що обладнання для відкачування шахтних вод (головний водовідлив) знаходиться всередині шахти й виконує свою функцію задля запобігання повного затоплення, не зважаючи на закриття цієї шахти. Однак за певних умов, що залежать від існуючого режиму роботи насосів водовідливу, їх також можна долучати до регулювання режимів електроспоживання [56].

ВИСНОВКИ

У дослідженні було проаналізовано декілька різних підходів до ідентифікації об'єкта керування: визначення точки з максимальною швидкістю зміни регульованого параметру та побудови дотичної в цій точці, різні методи визначення реакції об'єкта в одній або двох точках, апроксимація експериментальної кривої розгону відповідними рівнянням аперіодичних ланок першого та другого порядку.

Для результатів дослідження значення коефіцієнта детермінації моделей в залежності від обраного методу визначення параметрів варіюється від 0,85 до 0,99. Це свідчить про відсутність єдиного універсального методу, використовуючи який можна отримати адекватні параметри ОК для кожної кривої розгону з досліджуваної вибірки. В деяких методах визначений час запізнення перевищує час запізнення вхідної кривої розгону, коефіцієнт детермінації та відносна статична похибка мають низькі значення.

Слід зважати на той факт, що у виробничих умовах немає можливості використовувати в системах керування програмні застосунки на кшталт Scilab, це пов'язано з браком швидкодії ПЛК, але є можливість запрограмувати чисельний метод для вирішення поставлених задач.

Для формування цілісної картини в подальшому буде визначено вплив ступеня та типу згладжування вхідних даних на зменшення квадрату похибки моделювання та статичної похибки; розроблено алгоритм для визначення точки перегину КР; визначено комплексний критерій оцінки якості результатів моделювання; розроблено алгоритм визначення параметрів об'єкту на працюючому агрегаті / технологічному процесі; досліджено вплив отриманих параметрів ОК на налаштування регулятора та якість перехідних процесів.

Системи контролю технологічних параметрів прокатних станів вимагають значного асортименту первинних вимірювальних

перетворювачів різного функціонального призначення до роботи на екстремальних умовах теплотехнічних цехів. Ці умови негативно впливають на якість контролю, знижуючи точність і достовірність одержуваних результатів, що зумовлює значні матеріальні втрати та виникнення аварійних ситуацій під час роботи стану. Це своє чергу знижує ефективність роботи стану загалом.

Створення сучасних комплексів із засобами контролю з високою заводостійкістю та швидкодією для систем управління складними теплотехнічними процесами є актуальним завданням з економічної та науково-технічної точок зору. Це зумовлено неприпустимістю затримки чи втрати інформації на стадіях контролю, передачі та зберігання виробничої інформації для організації ефективного та безаварійного технологічного процесу прокатки.

Фактичні режими електроспоживання ВГП із системами регульованого електроприводу на базі синхронних і асинхронних двигунів характеризуються значною рівномірністю ($k_{\phi} \approx 1,0$). Така майже постійна величина споживаної активної потужності на графіках електричних навантажень визначається практично рівномірним за завантаженням режимом роботи вентилятора протягом доби (відносно значення середньоквадратичного відхилення потужності від номінальної не перевищує 1%).

Фактичні середні значення коефіцієнта потужності для добових профілів електроспоживання ВГП складають 0,75-0,95 для систем електроприводу на базі СД і тільки 0,4-0,5 – для АД. Основною причиною такого значного реактивного навантаження є використання різного роду напівпровідникових перетворювачів для регулювання технологічних параметрів вентиляторів. Безумовно, для підвищення енергоефективності системи електропостачання шахти споживана двигуном реактивна потужність (враховуючи її значну абсолютну величину) має бути скомпенсована за допомогою відповідних

фільтрокомпенсувальних пристроїв. Фільтруючий компонент таких систем покращить проблеми із якістю електроенергії, які також мають місце при застосування високовольтних напівпровідникових перетворювачів.

Проблема забезпечення пікових навантажень в енергосистемі України існує та немає передумов її ефективного (або цілковитого) вирішення у найближчому майбутньому. З метою зниження рівня навантаження енергосистеми протягом пікових годин її роботи необхідно раціонально залучати наявні потенційні резерви всіх споживачів шляхом регулювання режимів використання електричної енергії протягом доби. У роботі на прикладі вугільних шахт (навіть законсервованих «сухим» способом) показано, що вони мають значний потенціал до регулювання режиму електроспоживання, який може бути вилучений за умови забезпечення визначених організаційних та технологічних передумов.

Результати роботи опубліковані [1, 2, 12, 19, 33, 42, 43, 64-101].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Койфман О.О., Мірошніченко В.І., Сімкін О.І. Analytical study of methods of identification of control object. *MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education* : монографія. Riga, 2023. P. 113–147. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-7>
2. Comparison of the Methods for Determining the Parameters of Controlled Process / О.О. Койфман et al. *International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education”* : conference proceedings, Riga, 29–30 November 2023. Riga, Vol.2, 2023. P. 31–34. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-90>
3. Шпарук Б. О., Поліщук І. А. Адаптивне керування інерційними квазістаціонарними об'єктами. *Молодий вчений*. 2017. № 4. С. 577–582. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2017/4/135.pdf>
4. Lipták B. G. Instrument engineers' handbook. 4th ed. CRC Press, 2018. Vol. 2 : Process control and optimization. 2464 p.
5. Rengaswamy R., Srinivasan B., Bhatt N. P. Process Control Fundamentals. CRC Press, 2020. URL: <https://doi.org/10.1201/9780367433437>.
6. Identification of a damped PT2 system | Hackaday.io. *Hackaday.io | The world's largest collaborative hardware development community*. URL: <https://hackaday.io/page/4829-identification-of-a-damped-pt2-system> (date of access: 24.03.2024).
7. Autoren der Wikimedia-Projekte. Lineares zeitinvariantes System – Wikipedia. *Wikipedia – Die freie Enzyklopädie*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Lineares_zeitinvariantes_System (date of access: 04.02.2024).

8. Fitting step responses – Dynamics and Control with Jupyter Notebooks 0.0.1 documentation. *Dynamics and control – Dynamics and Control with Jupyter Notebooks 0.0.1 documentation*. URL: https://dynamics-and-control.readthedocs.io/en/latest/1_Dynamics/7_System_identification/Dynamics%20model%20parameter%20estimation.html (date of access: 15.01.2024).

9. GitHub - alchemyst/Dynamics-and-Control: Jupyter notebooks for Dynamics and Control. *GitHub*. URL: <https://github.com/alchemyst/Dynamics-and-Control> (date of access: 24.02.2024).

10. System App | Scilab. *Scilab* / *Scilab*. URL: <https://www.scilab.org/system-app>

11. Datafit - Non linear (constrained) parametric fit of measured (weighted) data. *Scilab* *Online* *Help*. URL: https://help.scilab.org/docs/2023.1.0/en_US/datafit.html

12. Койфман О.О., Мірошніченко В.І., Стебелько І. Є. Автоматичне визначення точки перегину при ідентифікації об'єкту керування. *Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології: тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції*. Дніпро, 12 березня 2024 р. Дніпро: ПДТУ, 2024. С. 19-23.

13. Oleg Subotin, Oleg Markov, Oleksii Razzhivin (2022). Study of the Dynamics of Solidification of a Continuously Cast Ingot on the Improved Mathematical Model of the Process of Soft Compression // 4th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine 20 – 22 October, 2022. – pp. 481-486. IEEE Catalog Number: CFP22K83-ART. (DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005665).

14. Oleksii Razzhivin, Oleg Markov, Oleg Subotin (2022). Automated Melt Temperature Control System In Induction Furnace // 4th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine 20 – 22

October, 2022. – pp. 535-538. IEEE Catalog Number: CFP22K83-ART. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005650.

15. George Kelk Corporation. KELK Sensors for Rolling Mills. // Description and Specifications. Ontario, Canada, 1998.

16. Таланчук П.М. Засоби вимірювання в автоматичних та керуючих системах.: Підручн. для студентів вузів, які навчаються із спец. «Автоматизація технологічних процесів і виробництв» / П.М. Таланчук, Ю.О. Скрипник, В.О. Дубровний. – К.: Райдуга, 1994. – 672с.

17. Лучук А.М. Устройство передачи дискретной информации. – Киев: Техника, 1978 г. – 260 с.

18. Верлань А.Ф. Электронные функциональные преобразователи систем автоматики. – К.: Вища шк., 1981.

19. Subotin O.V. Information security of rental management systems // International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 2. Pp. 68 - 71. (DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-102>).

20. Дорошенко В. С. Топологічна оптимізація конструкцій виливків при адитивному виробництві з застосуванням цифрового двійника // Процеси лиття. – 2020 – № 4 (142), С.53-62.

21. Гриценко В., Скурихін В., Цепков Г. Інформаційні технології цифрової обробки сигналів: нові підходи і перспективи впровадження // Вісник Національної академії наук України. – 2005. – №. 12. – С. 33-41.

22. Негоденко О. В. Моделі для обробки інформаційних сигналів на основі тригонометричних сплайнів // Зв'язок. – 2018. – №. 4. – С. 47-50.

23. Алдохин М.Д. Логічний аналізатор сигналів на ПЛІС //Електронна та Акустична Інженерія. – 2020. – Т. 3. – №. 4. – С. 38-43.

24. Рязанцев О. І. и др. Дослідження впливу параметра фільтра на якість аналого-цифрового перетворення сигналу // Вісник

Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2020. – №. 7 (263). – С. 29-34.

25. Jinpeng Song, Shulin Tian, Yu-Hen Hu, Peng Ye, Kuojun Yang, Lianping Guo, and Wentao Wei. Digital Estimation and Compensation of Analog Errors in Frequency-Interleaved ADCs // Journal of Circuits, Systems and Computers. – 2019 – Vol. 28. – P. 35-42.

26. David Jones, Chris Snider, Aydin Nassehi, Jason Yon, Ben Hicks. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020 – Vol. 29. – P. 36-52.

27. Fei Tao, He Zhang, Ang Liu, and A. Y. C. Nee. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS. – 2019. – Vol. 15. – P. 2405 – 2415.

28. Jian Yang, Zhenping Ji, Wenhong Liu and Zhi Xie. Digital-Twin-Based Coordinated Optimal Control for Steel Continuous Casting Process // Metals. – 2023. – Vol 13, 816. – P. 123 – 143.

29. Hiroaki Kanokogi. AI in the Process Industry // Yokogawa Technical Report English Edition. – 2021. – Vol. 64 No.1 – P. 53 – 60.

30. J. L. Smith. Advances in neural networks and potential for their application to steel metallurgy [Електроний ресурс]// Materials Science and Technology. – 2020. – Volume 36, Issue 17. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/02670836.2020.1839206>.

31. Bondarenko A.O. Mining machines for open pit mining: a textbook / A.O. Bondarenko// Ministry of Education and Science of Ukraine, National Mining University. D.: NSU. - 2017. - 123 p.- URL:<https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/152813/CD1004.pdf>

32. Haikov A.R. Intelktualni transportni systemy v Ukraini./ A.R. Haikov// Visnyk Nats. tekhn. un-tu “KhPI”, Kharkiv. - 2014. - № 9 (1052). - S. 106-112.

33. Nalobina O. Improving the efficiency of the mining excavator maintenance system./ O. Nalobina, M. Holotiuk, O. Bundza// X international scientific conference. Philadelphia.- USA.- 14-15.12.2023.- P. 149-150.

34. Malafeev S. I.; Bench tests of the quarry excavators main electric drives/ S. I. Malafeev, A. A.; Novgorodov, V. I. Konyashin// XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). IEEE. - 2020. - p. 1-5.

35. Сідашенко О.І. Ремонт машин / О.І Сідашенко., А.Я. Поліський: К.: Урожай, 1994. - 400 с.

36. Pugin, K. G. Improving the reliability of hydraulic systems of technological machines/K.G.Pugin// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. - Vol.971 :Machine Science ,Mechanization, Auotomatization and Robotics. DOI :<http://doi:10.1088/1757-899X/971/5/052042>

37. Ng, F. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring / F. Ng, J. A. Harding, J. Glass // Mech. Syst. Signal Process. – 2016. – P. 816-831. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.006i>.

38. Ge L. Power Matching and Energy Efficiency Improvement of Hydraulic Excavator Driven with Speed and Displacement Variable Power Source / L. Ge, L. Quan, X. Zhang, Z. Dong, J. Yang // Chin. J. Mech. Eng. – 2019. – No 32:100. – P. 9-12. DOI : <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0415-x>.

39. Marasova D. Diagnostics of the residual service life of steel frames of large-scale excavators./ Marasova D. Cehlar M., Kolman J.// Section Exploration and Mining. International Multidisciplinary Scientific Geo Conference : SGEM. – Sofia. - 2019 - V. 19 (1.3). DOI:[10.5593/sgem2019/1.3/S03.032](https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.3/S03.032)

40. Махмудов Ш. А. Методика розрахунку продуктивності та функціональності кар'єрних екскаваторів/ Ш. А. Махмудов // Илм-фан ва инновацион ривожланиш / Наука и инновационное развитие. 2023. №1. <https://cyberleninka.ru/article/n/methodology-for-calculating-the-performance-and-functionality-of-quarry-excavators> (дата звернення: 14.06.2024).

41. Gromyka, D.S., Gogolinskiy, K.V. Method of State and Residual Resource Assessment of Excavator/ D.S. Gromyka, K.V. Gogolinskiy.// Bucket

Tooth Caps. - 2022 - Test 58, - 381–390.

<https://doi.org/10.1134/S1061830922050035>

42. Разживін О.В., Майборода І.В. Автоматизація процесу управління теплових режимів в печі швидкісного нагріву при демонтажі великогабаритних деталей / Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – Черкаси, 2024. – С1. 16-18

43. Колюкін О.Ю., Разживін О.В. Зниження витрат електричної енергії при індукційному нагріві, шляхом дослідження та розробки автоматизованої системи управління подачею прокату в індуктор / Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – Черкаси, 2024. – С. 48-49

44. Веман К. Основи PROFIBUS: [Електронний ресурс] / К. Веман // Автоматизація та привід. – 2006. – с. 186. – Режим доступу: <http://www.siemens.ua>

45. Міюшкович Є. Г. Телекомунікаційні інтерфейси кіберфізичних систем: концепція застосування / Є. Г. Міюшкович, Я. С. Парамуд // Кіберфізичні системи: досягнення та виклики: матеріали Першого наукового семінару (25–26 червня 2015 р., м. Львів). – 2015. – С. 28–37. 3. Гук М. Интерфейсы ПК: справочник. – СПб.: Питер, 1999. – 416 с.

46. International Standart IEC 61158 Digital data communications for measurement and control. Fieldbus for use in industrial control systems.

47. Разживин А.В., Сердюк А.А. Управление стабильностью технологического процесса с помощью сетей Петри. Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: Тезисы докладов IX-й Всеукраинской научно-технической конференции "Перспективные технологии и оборудования обработки давлением в машиностроении и

металлургии" (г. Краматорск, 23 – 25 апреля 2002 г.). – Краматорск: ДГМА, 2002. – С. 33.

48. Кузьмук В.В. Класифікація мереж Петрі та приклади їх застосування для розв'язання прикладних задач / В.В. Кузьмук, О.О. Супрунук., А.М. Парнюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 2/9(50). – С. 40–43.

49. Методи, моделі та інформаційні технології оцінювання станів складних об'єктів: монографія / Є. І. Кучеренко, В. Є. Кучеренко, І. С. Глушенкова, І. С. Творошенко; ХНАМГ, ХНУРЕ. – Х. : ХНАМГ; ХНУРЕ, 2012. – 278 с.

50. Добровольська Л.Н., Волинець В.І., Бандура І.О. Багатофакторне прогнозування споживання електротехнічних комплексів вугільних шахт для планування їхніх енергоефективних режимів. Наукові праці ВНТУ. 2014. № 2. С. 1-9.

51. Хорольський В.П., Шпанько М.І. Інтелектуальна система управління електроспоживанням стаціонарних установок шахт. Вісник Хмельницького національного університету. 2015. № 4. С. 173-179.

52. Хорольський В.П., Хорольський Д.В., Тіторенко К.Г. Багаторівнева інтелектуальна система оптимізації електроспоживання гірничо-збагачувальних підприємств. Вісник Хмельницького національного університету. 2015. № 2. С. 192-198.

53. Папаїка Ю.А. Жежеленко І.В., Лисенко О.Г., Родна К.С. Застосування індивідуальних графіків вищих гармонік в задачах електромагнітної сумісності та енергоефективності гірничих підприємств. Гірнича електромеханіка та автоматика. 2019. № 101. С. 3-7.

54. Папаїка Ю.А., Пивняк Г.Г., Жежеленко І.В., Лысенко А.Г. Интергармоники в системах электроснабжения. Науковий вісник НГУ. 2017. № 6. С. 109-114.

55. Razumnyi Yu.T., Rukhlova N.Yu., Rukhlov A.V. Energy efficient work of a coal mine dewatering plant. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho

Universytetu. 2015. № 2. р. 74-79.

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2015_2_13

56. Rukhlova N.Yu., Lutsenko I.M., Rukhlov A.V. An effective way to maintain the liquidated mines. 4th International Scientific and Technical Internet Conference “Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources”, (2021, р. 73-75). Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing.

57. Рухлов А.В., Мишанский Ю.А. Анализ фактических режимов электропотребления подъемных установок угольных шахт. Гірничя електромеханіка та автоматика. 2013. № 90. С. 22-26.

58. Разумный Ю.Т., Рухлов А.В., Крамаренко С.А. Энергетические показатели современных угольных подъемных установок шахт. Гірничя електромеханіка та автоматика. 2014. № 92. С. 48-53.

59. Khatskevych Yu.V., Lutsenko I.M., Rukhlov A.V. Perspectives of load management in energy system with the help of electric vehicles. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2017. № 5. р. 86-93.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2017_5_15.

60. Рухлов А.В. Про сучасні виклики для енергетичної системи України. XV Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації». Кременчуцький національний університет. 2017. С. 78-79.

61. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» № 605-р (2017, 18 серпня).

62. Рухлова Н.Ю., Кошеленко Є.В., Кириченко М.С. Енергоефективний спосіб функціонування ГВУ вугільних шахт. Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження та енергоефективність – 2022», (2022, с. 26-27). Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

63. Papaika Yu.A., Lysenko O.G., Rodna K.S., Shevtsova O.S. Information technologies in modeling operation modes of mining dewatering plant based on economic and mathematical analysis. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020. № 4. p. 82-87. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/082>.

64. Khilov V.S. Improving the efficiency of rock excavator electrical equipment and quarry power supply lines in the conditions of mining and ore enterprises of the Kryvyi Rih basin // International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 –The mining and metals sector: integration of business, technology and education”: conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 2. 348 pages. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-105>

65. Практикум з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» : навч. посіб. : у 2 ч. Ч. 1 / Стационарні процеси у лінійних колах постійних, гармонійних однофазних, трифазних і полігармонійних струмів; В. С. Хілов, О. О. Койфман, А. В. Рухлов. – Одеса : Олді+, 2024. – 186 с.

66. Койфман О. Аналітичне дослідження методів ідентифікації об'єкта керування [Chapter] / О. Койфман, О. Сімкін, В. Мірошніченко // «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: Collective monograph. – Riga, the Republic of Latvia: «Baltija Publishing», 2023. С. 113–147.

67. Хілов В. Визначення вібраційних коливань бурового поставу в системах автоматизованого електроприводу [Chapter] / В. Хілов // «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: Collective monograph. – Riga, the Republic of Latvia: «Baltija Publishing», 2023. С. 96–111.

68. Рухлов А.В. Регулювання електроспоживання підприємств для зниження пікових навантажень в енергосистемі / А.В. Рухлов, І.М. Луценко, Н.Ю. Рухлова, Є.В. Кошеленко, О.А. Замкова // Збірник наукових

праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2023. – № 74. – С. 204-212.

69. Цимбал Б.М. Робототехніка та штучний інтелект: заходи з безпеки та джерела загрози. Комунальне господарство міст, №3 (184), 2024. С. 250-258. <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/6317/6237>

70. Хілов В.С. Визначення способу керування приводами поставу кар'єрного бурового верстата. Збірник наукових праць НГУ, №76, 2024.

71. Tsymbal, B., Shvedun, V., Naumik-Gladka, K., Chernenko, Y., & Kriukov O. (2024). ECONOMIC DIMENSIONS AND PARADIGMATIC MECHANISMS OF PERSONAL SECURITY MANAGEMENT. Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice, 2(55), 488–501. <https://doi.org/10.55643/fcaptr.2.55.2024.4310>

72. Сімкін, О., Коротиш, В. Use of Modern Automation Technologies to Improve Personnel Safety, Reliability and Efficiency of the Coke Oven Gas Pressure Stabilization Unit. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 64–66.

73. Сімкін, О., Золотарьов, Д. Automated System for Vibration Monitoring and Diagnostics of a Coke Oven Pusher. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 60–63.

74. Вінковський, М., Койфман, О. Research of Automatic Water Level Control in a Tank. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education» conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 20–24.

75. Охріменко, С., Койфман, О. The Automation System of the Heating Unit of the Plant Management Premises and Adjacent Buildings. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 46–48.

76. Razzhyvin O.V., Prasol V.A. An overview of automated control systems $\cos \varphi$ in the 6 kV electricity network // International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education”: conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 2. P. 51-56.

77. Рухлов А., Рухлова Н. Зменшення пікових навантажень в енергосистемі шляхом регулювання режимів електроспоживання вугільних шахт. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, м. Riga, 29–30 листоп. 2023 р. Riga, 2023. С. 56–59.

78. Кравченко, С., Мірошниченко, В. Automation of Electric Heating of Industrial Premises. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 35–37.

79. Нікулін, В., Мірошниченко, В. A System for Predicting Optimal Mill Performance to Stabilize the Finished Product Quality of the Ore Dressing Factory. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 41–43.

80. Стецький, В., Мірошниченко, В. Analysis of the Conditions for Modernization of the Blast Furnace Hot Blast Stove Block Control System.

International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 67–68.

81. Уваров, М., Мірошніченко, В. Automation Of Drying Drum. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 72–74.

82. Харченко, І., Голотюк, М. Study of gripper productivity and safety bridge cranes. International scientific conference «MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education»: conference proceedings, Riga, the Republic of Latvia, November 29–30, 2023. «Baltija Publishing», Riga, Latvia, 2023. С. 74–76.

83. Заболотний Д. В., Король В.М., Койфман О.О. Порівняння сучасних систем контролю заповнення бункерів в гірничорудній промисловості. Актуальні питання розвитку інформаційних технологій: тези доповідей V Всеукраїнської конференції молодих учених (Дніпро, 22 листопада 2023 р.)/ ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ПДТУ, 2023. С. 17-19

84. Заболотний Д. В., Разживін О.В. Аналітичний огляд температурних режимів випалу окатишів. Актуальні питання розвитку інформаційних технологій: тези доповідей V Всеукраїнської конференції молодих учених (Дніпро, 22 листопада 2023 р.)/ ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ПДТУ, 2023. С. 19-20

85. Налобіна О., Голотюк М., Бундза О. Підвищення ефективності системи обслуговування кар'єрних екскаваторів. X international scientific conference. Philadelphia. USA. 14-15.12.2023. P. 149-150.

86. Голотюк М.В., Бундза О.З., Койфман О.О., Рибницький М.В. Моделювання процесу завантаження бункерів гірничою масою з використанням автостел. / VI International scientific and practical conference

«The aspects of contemporary scientific research that encompass both theoretical and practical components» (January 10-12, 2024). Venice, Italy, International Scientific Unity. 2024. P. 347-349.

87. Голотюк М.В., Налобіна О.О., Бундза О.З., Самохін О.В. Підвищення продуктивності завантаження екскаватора / VI International scientific and practical conference «The aspects of contemporary scientific research that encompass both theoretical and practical components» (January 10-12, 2024). Venice, Italy, International Scientific Unity. 2024. P. 350-353.

88. Голотюк М.В., Налобіна О.О., Койфман О.О., Харченко І.О. Обґрунтування параметрів грейферного крану з метою підвищення його продуктивності. «The aspects of contemporary scientific research that encompass both theoretical and practical components» (January 10-12, 2024). Venice, Italy, International Scientific Unity. 2024. P. 350-355.

89. Черьомушкін В.С., Бундза О.З., Голотюк М.В. Методи покращення процесу виявлення та вилучення металу та сторонніх предметів у гірничій масі на конвеєрному транспортері. Сучасний стан та пріоритети модернізації науки, освіти та технологій: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Біла Церква, 10 січня 2024 р.): у 3 ч. Біла Церква: ЦФЕНД, 2024. Ч. 3. с. 42-43. URL: <http://www.economics.in.ua/2024/01/10-3.html>

90. Nalobina O., Holotiuk M., Bundza O. – DRONES IN THE MINING INDUSTRY. Norwegian Journal of development of the International Science No 124/2024. P. 125-128.

91 Khilov V., Rukhlov A., Rukhlova N. The energy efficiency increasing of the system "Rock excavator – Power line" in conditions of the Ukrainian mining and ore enterprises. Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources": Book of Abstracts, Petroșani, Romania. 2023. P. 146–148.

92. Голотюк М. В., Бундза О. З., Кашуба Ю. В. Дослідження вузла пальника колісних пар локомотива з урахуванням параметрів наплавочної

лінії. Міжнародна науково-практична конференція «Сучасний стан та пріоритети модернізації науки, освіти та технологій» (Біла Церква, 10 січня 2024 р.): у 3 ч. Біла Церква: ЦФЕНД, 2024. Ч. 3. с. 28-29. URL: <http://www.economics.in.ua/2024/01/10-3.html>

93. Голотюк М. В., Налобіна О. О., Ковалеvecь Р. В. Дослідження процесу завантаження помольних куль у млині рудозбагачувальної фабрики. Міжнародна науково-практична конференція «Сучасний стан та пріоритети модернізації науки, освіти та технологій» (Біла Церква, 10 січня 2024 р.): у 3 ч. Біла Церква: ЦФЕНД, 2024. Ч. 3. с. 30-31. URL: <http://www.economics.in.ua/2024/01/10-3.html>

94. Койфман О.О., Стебелько І. Є.. Використання коботів у гірничо-металургійному виробництві. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – (Черкаси, 11-17 березня). – Черкаси: 2024. - С. 85-87. https://conference.ikto.net/pub/akit_2024_11-17march_1.pdf

95. Узлов Ю.В., Сімкін О.І. АСУ тракту середнього та мілкового подрібнення залізної руди. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – (Черкаси, 11-17 березня). – Черкаси: 2024. - С. 55-56. https://conference.ikto.net/pub/akit_2024_11-17march_1.pdf

96. Петренко Р.С., Сімкін О.І. модернізація автоматизованої системи управління МБЛЗ в умовах конверторного цеху. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – (Черкаси, 11-17 березня). – Черкаси: 2024. - С. 55-56. https://conference.ikto.net/pub/akit_2024_11-17march_1.pdf

97. Суботін О.В. Діагностика технічного стану роторних механізмів шахтної підйомної машини ЦР 5-3/0,6 // Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – Черкаси, 2024. – 12-14 с.

https://conference.ikto.net/pub/akit_2024_11-17march_1.pdf

98. Сімкін О.І., Сокол С.П., Узлов Ю.В.. Постановка задачі вибору алгоритмів роботи інформаційних підсистем АСУТП та оцінки їх якості. Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології: тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції. (Дніпро, 12 березня 2024 р.) / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ПДТУ, 2024. – С. 17-18

99. Мірошниченко В.І., Мачулян О.В. Дослідження САУ формуванням садки вогнетривких виробів. Університетська наука - 2024 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Дніпро, 23-24 травня 2024 р) : Т. 1. ДВНЗ «ПДТУ». Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2024. С.270-271

100. Цимбал Б.М. Шляхи зменшення суб'єктивності до сприйняття професійних ризиків. Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2024. С. 336-337.

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20174>

101. Доценко В.В. Огляд модернізації лінії приготування маси для пресу вогнетривких виробів. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – (Черкаси, 11-17 березня). – Черкаси: 2024. - С. 46-47.

https://conference.ikto.net/pub/akit_2024_11-17march_1.pdf