

УДК 681.5.004:669

№ держреєстрації 0123U104590

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



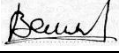
ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з науково-дослідної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Володимир КУХАР
«04» липня 2025 року

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

Етап 2. Узагальнення та оцінка одержаних результатів досліджень

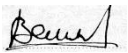











Науковий керівник, д.т.н., професор  Віктор ХІЛОВ
«01» липня 2025 року

2025

Рукопис закінчено «01» липня 2025 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,
протокол № 12 від «04» липня 2025 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, докт. техн. наук, професор		Віктор ХІЛОВ (вступ, розділ 10, висновки)
Відповідальний виконавець, канд. техн. наук, доцент		Артем РУХЛОВ (розділ 7)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Олег БУНДЗА (розділ 5)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Микола ГОЛОТЮК (розділ 5)
Виконавець, старший викладач		Андрій ІСАЄВ (розділ 2)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Олексій КОЙФМАН (розділ 1)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Вікторія МІРОШНИЧЕНКО (розділ 1)
Виконавець, докт. техн. наук, професор		Олена НАЛОБІНА (розділ 5)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Олексій РАЗЖИВІН (розділ 6)
Виконавець, канд. техн. наук, професор		Олександр СІМКІН (розділ 4)
Виконавець, старший викладач		Сергій СОКОЛ (розділ 4)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Олег СУБОТІН (розділ 3)

Виконавець, докт. техн. наук, професор		Богдан ЦИМБАЛ (розділ 8)
Виконавець, канд. техн. наук, доцент		Юрій ШРАМКО (розділ 9)
Виконавець, студент групи 141-24-1м		Віктор ДИФОРТ (розділ 10)
Виконавець, студент групи 141-24-1м		Сергій ПАВЛИШИН (розділ 10)
Виконавець, студентка групи 141-24-1м		Олена ПАВЛИШИНА (розділ 10)
Виконавець, студент групи 141-23-1п		Василь КІНШАКОВ (розділ 7)
Виконавець, студент групи 141-23-1п		Дмитро СНИГОВИЙ (розділ 7)
Виконавець, студент групи 133-22-1		Наталія КАРЯВКІНА (розділ 8)
Виконавець, студент групи 141-23-1		Михайло ВОРОНІН (розділ 7)
Виконавець, студент групи 141-23-1		Ярослав ФЕДЮК (розділ 9)
Виконавець, студент групи 131К-23-1м		Андрій КАРПЕНКО (розділ 5)
Виконавець, студент групи 174-24-1м		Анастасія РЯБЧЕНКО (розділи 6)
Виконавець, лаборант кафедри АВЕРС		Юлія СОЛОД (загальне редагування, вступ, заключення)

РЕФЕРАТ

ЗВІТ про НДР: 343 с., 23 табл., 157 рис., 168 джерел.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ.

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

Мета дослідження: визначити, обґрунтувати, 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:

а) 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.

б) для практики:

- розроблено алгоритми 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 принципові електричні схеми та друковані 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 обґрунтовано 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 можуть бути використані при розробці типових систем автоматизації та програмного забезпечення лабораторних 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, 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;

- розроблення принципової схеми та програми для видачі вимірюного 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	13
1 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ	16
1.1 Вступ.....	16
1.2 Огляд методів визначення параметрів об'єктів керування.....	19
1.2.1 Інженерні методи.....	19
1.2.2 Методи визначення реакції об'єкта в одній або двох точках .	21
1.2.3 Апроксимація кривої розгону	26
1.2.4 Бібліотеки Python для розв'язування задач керування	27
1.2.5 Визначення параметрів об'єктів керування з використанням нейронної мережі для емуляції кривої розгону.....	27
1.3 Алгоритм та результати дослідження на прикладі однієї кривої розгону.....	27
1.3.1 Алгоритм обробки кривих розгону	27
1.3.2 Приклад реалізації алгоритму для однієї кривої розгону	30
1.4 Аналіз результатів дослідження вибірки кривих розгону	40
1.4.1 Середні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону	40
1.4.2 Максимальні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону.....	41
1.4.3 Мінімальні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону.....	43
1.4.4 Зведена інформація щодо показників моделювання кривих розгону для всієї вибірки.....	46
1.4.5 Аналіз точності методів на підставі забезпечуваних при моделюванні значень відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації.....	48
1.4.6 Аналіз стабілізації параметра об'єкта керування при моделюванні.....	57

1.4.8 Вплив тривалості стабілізації параметру в кінці кривої розгону на якість ідентифікації об'єкта керування	62
1.4.9 Вплив згладжування методом модифікованого рухомого середнього на результати дослідження параметрів об'єкта керування.....	65
1.5 Висновки.....	69
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ТА НАЛАШТУВАНЬ РЕГУЛЯТОРА НА ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ НАГРІВУ МЕТАЛУ.....	70
2.1 Постановка задачі.....	72
2.2 Побудова фізико-математичної моделі нагріву металеві заготовки	73
2.3 Формування графіків зміни температури у відповідності до типових процесів регулювання.....	76
2.4 Дослідження зміни температури по перетину металеві заготовки	78
2.5 Дослідження впливу типу процесу регулювання на швидкість нагріву.....	84
2.6 Дослідження впливу типу процесу регулювання на тепловий стан та витрати палива	86
2.7 Дослідження тримірної моделі нагріву.....	89
2.8 Висновки	90
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОКАТНИМИ СТАНАМИ.....	91
3.1 Постановка задачі дослідження	91
3.2 Аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем контролю технологічних параметрів прокатних станів	93
3.3 Аналіз способів та засобів формування первинної виробничі інформації в інформаційно-вимірювальних системах контролю технологічних параметрів прокатних станів	100

3.4 Дослідження фотоелектричних вимірювальних перетворювачів	102
3.4.1 Класифікація перетворювачів фотоелектричного типу	102
3.4.2 Розрахункова модель перетворювача оптичного типу	106
3.4.3 Дослідження перетворювача оптичного типу	110
3.5 Система автоматичного стеження за слябами у пічному районі.....	114
3.6 Висновки.....	119
4 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ, АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ВВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В АСУТП.....	121
4.1 Постановка задачі та огляд літератури	123
4.2 Розробка структурної схеми макету технологічного об'єкту	130
4.3 Тестування макету технологічного агрегату	132
4.4. Вимірювання температури та її корекція	137
4.5. Вимірювання швидкості повітря та її корекція	147
4.6 Ідентифікація параметрів об'єкту керування	153
4.7 Керування об'єктом за допомогою ПІД-регулятора	155
4.8 Створення математичної моделі об'єкту керування	161
4.9 Висновки за розділом.....	165
5 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА ШЛЯХОМ РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНАСТУВАННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ТА МЕХАНІЗМІВ	169
5.1 Постановка задачі дослідження	170
5.2 Вибір параметрів діагностики редуктора ротора екскаватора... ..	173
5.3 Діагностика редуктора за концентрацією продуктів зношування в мастильному матеріалі.....	177
5.4 Результати діагностики роторного редуктора екскаватора	182

5.5	Рекомендації щодо використання методу технічного діагностування редуктора роторного екскаватора.....	183
5.6	Висновки.....	183
6	ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ АСУ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМИ ПЕЧАМИ.....	185
6.1	Автоматизована система управління тепловим режимом плавки технологічного комплексу «ПІЧ-КІВШ»	185
6.2	Реалізація алгоритму функціонування автоматизованої системи керування	192
6.3	Модель взаємодії елементів автоматизованої системи керування тепловим режимом плавлення.....	202
6.4	Оцінка часових характеристик взаємодії елементів АСУ тепловим режимом плавлення	210
6.5	Висновки	214
7	ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ШАХТ	216
7.1	Електроспоживання вугільних шахт за технологічними процесами	216
7.2	Аналіз режимів електроспоживання шахтних технологічних установок на прикладі вентилятору головного провітрювання	217
7.3	Регулювання електроспоживання вугільної шахти для зниження пікових навантажень в енергосистемі.....	223
7.4	Модель добового профілю електроспоживання вугільної шахти	230
7.5	Стаціонарні установки шахт як потужні споживачі реактивної енергії	241
7.6	Висновки	250
8	МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ПРОМИСЛОВИМИ РОБОТАМИ ТА МАНІПУЛЯТОРАМИ.....	253

8.1 Особливості модернізація ливарного виробництва промисловими роботами та маніпуляторами	253
8.2 Дослідження модернізації ливарного виробництва промисловими дронами.....	260
8.3 Математичне моделювання руху дронів у ливарному виробництві	262
8.4. Експериментальні дослідження оцінки ефективності застосування дрона	266
8.5. Аналіз ризиків та обмежень, визначення технічних та організаційних бар'єрів, оцінка безпеки експлуатації дрона.....	269
8.6 Висновки	272
9 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА З ТРЬОМА КООРДИНАТАМИ НА ОСНОВІ ARDUINO	274
9.1 Постановка задачі досліджень	275
9.2 Загальна архітектура системи.....	279
9.3 Апаратна частина.....	279
9.4 Керування та програмне забезпечення	281
9.5 Проведення експериментів	282
9.6 Аналіз обмежень	283
9.7 Висновки	284
10 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРИВОДНИХ СИСТЕМИ БУРОВИХ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ КАР'ЄРІВ КРИВБАССУ	287
10.1 Постановка задачі	289
10.2 Особливості експлуатації приводів постійного струму.....	294
10.3 Особливості експлуатації приводів змінного струму.....	298
10.4 Вплив вібрацій поставу на режимні параметри.....	304
10.5 Висновки.....	311
ВИСНОВКИ	313
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	319

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 – перспективну нішу, де можливо посісти своє місце в Європейському Союзі. Це буде поштовхом у ланцюжку доданої вартості, щоб рухатися далі до інших галузей: у трубній промисловості, виробив з металу, у виробництві 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; працюючих гірничо-металургійних підприємствах, які не тільки конкурують, але вже давно інтегровані до світового ланцюжка виробництва.

Конкурентоспроможність функціонування гірничо-металургійного комплексу напряму залежить від автоматизації та енергоефективності 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.

Сучасні виклики промислового виробництва, зокрема в умовах гірничо-металургійного комплексу, вимагають постійного вдосконалення технологічних процесів, підвищення

енергоефективності та впровадження інновацій у сфері автоматизації, мехатроніки та робототехніки. У таких умовах особливого значення набуває інтеграція систем автоматизованого управління з енергозберігаючими технологіями, що забезпечує конкурентоспроможність підприємств, зниження виробничих витрат і підвищення надійності обладнання.

У рамках сформованої мети даної науково-дослідної роботи потрапляють розробка теоретичних та прикладних рішень для автоматизації та енергозабезпечення виробничих процесів у межах підприємств групи Метінвест, з урахуванням специфіки експлуатації технічних засобів у складних умовах гірничо-металургійного виробництва.

У науково-дослідній роботі було обрано комплексний аналіз низки пріоритетних ключових напрямів:

а) дослідження методів ідентифікації об'єктів керування:

1) розглянути сучасні підходи до побудови математичних моделей об'єктів, що працюють в умовах високої нелінійності та змінних технологічних параметрів;

2) запропонувати алгоритми ідентифікації, які забезпечують підвищення точності управління технічними системами;

б) дослідження впливу типу перехідного процесу та налаштувань регулятора на витрати палива для нагріву металу: провести моделювання теплових процесів у печах з метою визначення оптимальних режимів управління, що дозволяють знизити споживання енергоносіїв без шкоди для якості продукції;

в) дослідження інформаційного забезпечення систем управління прокатними станами: оцінити актуальні вимоги до інформаційних потоків у системах автоматизації прокатного виробництва, проаналізувати можливості інтеграції з існуючими системами ERP/MES-рівня;

г) технічні засоби, алгоритмічне та програмне забезпечення підсистем ведення технологічної інформації в АСУ ТП: розробити концепцію побудови програмно-апаратної платформи для збору, обробки та візуалізації технологічних даних, що забезпечить гнучке масштабування та адаптацію до умов конкретного виробництва;

д) підвищення ефективності експлуатації роторного екскаватора шляхом розробки та впровадження методики технічного діагностування основних вузлів та механізмів: запропонувати методи контролю технічного стану критичних компонентів роторних машин, які дозволяють попередити аварійні ситуації та продовжити термін експлуатації обладнання;

е) дослідження інформаційного забезпечення розподіленої АСУ електротермічними печами: розробити архітектуру розподіленої системи управління для координації роботи електропечей, що дозволить підвищити стабільність технологічного процесу та ефективність енергоспоживання;

ж) енергоефективні режими електроспоживання технологічних процесів шахт: визначити раціональні режими електроспоживання з урахуванням змін у графіках навантаження та технологічних вимог, що сприяє зниженню пікових навантажень та економії енергоресурсів.

Результати, отримані в ході науково-дослідної роботи, можуть бути впроваджені в діючу інфраструктуру підприємств гірничо-металургійного комплексу, забезпечуючи підвищення ефективності виробництва, зниження енерговитрат та покращення технічного стану обладнання.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

1.1 Вступ

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 (ОК) та зовнішніх збурень в процесі ідентифікації, а також забезпеченням потрібних показників якості процесів регулювання [1]. Тому актуальною є задача розробки універсального методу ідентифікації, який би забезпечував високу точність моделювання та відповідав практичним обмеженням промислової реалізації.

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 [2].

З огляду на зазначене, об'єктом дослідження є процеси ідентифікації динамічних характеристик технологічних ОК з самовирівнюванням на основі аналізу їх реакції на ступінчастий вхідний вплив, зокрема системи регулювання температурного режиму в зонах нагрівальних печей, регулювання тиску та загальної витрати газу на опалення технологічних агрегатів.

Метою цього дослідження є аналіз методів ідентифікації 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 [3, 4].

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання дослідження:

- 1) систематизувати та класифікувати наявні методи ідентифікації об'єктів керування за принципами функціонування та областю застосування;

- 2) розробити алгоритм комплексного порівняльного аналізу методів ідентифікації на основі експериментальних даних промислових технологічних процесів;

3) провести експериментальні дослідження методів ідентифікації на репрезентативній вибірці кривих розгону об'єктів керування з самовирівнюванням;

4) розробити критерії оцінки ефективності методів ідентифікації, що враховують як точність моделювання, так і практичну придатність до технічної реалізації;

5) дослідити вплив параметрів експериментального процесу, зокрема тривалості стабілізації та методів обробки даних, на якість ідентифікації об'єктів керування;

6) сформулювати практичні рекомендації щодо вибору оптимальних методів ідентифікації для різних типів промислових технологічних процесів та розробці методичних вказівок з їх застосування.

Методи та методики дослідження включають експериментальне отримання кривих розгону технологічних об'єктів при ступінчастому впливі, порівняльний аналіз п'ятнадцяти різних методів ідентифікації на вибірці з п'ятдесяти п'яти емпірично отриманих кривих розгону, імітаційне моделювання для перевірки отриманих параметрів та статистичний аналіз точності методів за критеріями відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації.

Спеціальні інструменти та апаратура. Експериментальні дослідження проводилися з використанням промислових контролерів, оснащених функцією автоматичного налаштування регуляторів, та засобів збору експериментальних даних з технологічних процесів у виробничих умовах.

Програмне забезпечення. Для реалізації алгоритмів дослідження використовувалися MS Excel, середовище комп'ютерної математики Scilab з додатком Xcos для імітаційного моделювання. Додатково розглядалися можливості застосування спеціалізованих бібліотек Python для розв'язування задач керування.

1.2 Огляд методів визначення параметрів об'єктів керування

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

1.2.1 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:

$$W(p) = \frac{K}{T_{06}p+1}, \quad (1.1)$$

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

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

або

$$W(p) = \frac{K}{(T_3 p + 1) \cdot (T_4 p + 1)}, \quad T_{3,4} = \frac{T_1 \pm \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}{2} \quad (1.3)$$

де K – коефіцієнт передачі об'єкта керування;

$T_{06}, T_1, T_2, T_3, T_4$ – сталі часу об'єкта керування.

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.

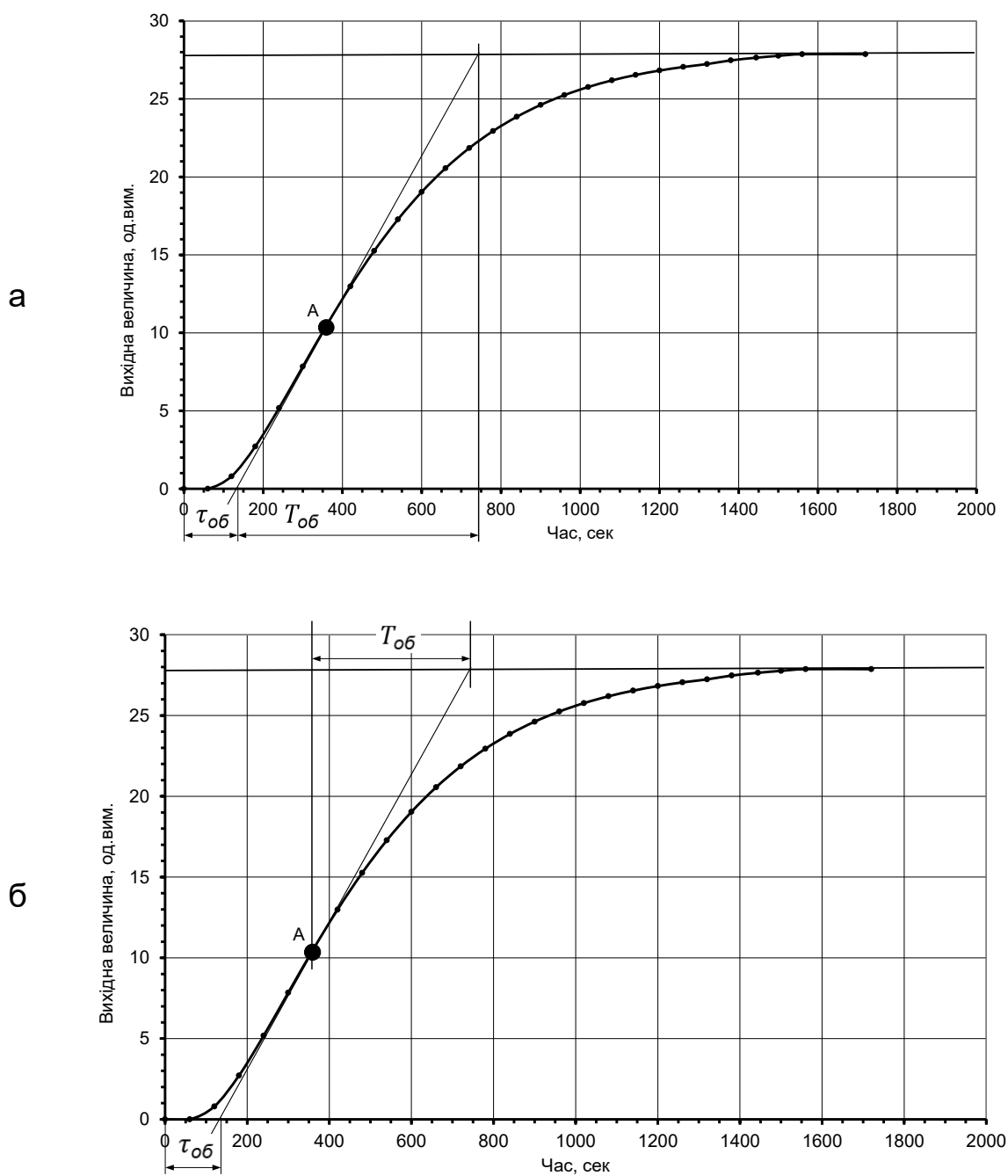


Рисунок 1.1 - Інженерні методи ідентифікації ОК:

а – методи 10 та 11; б – методи 20 та 21

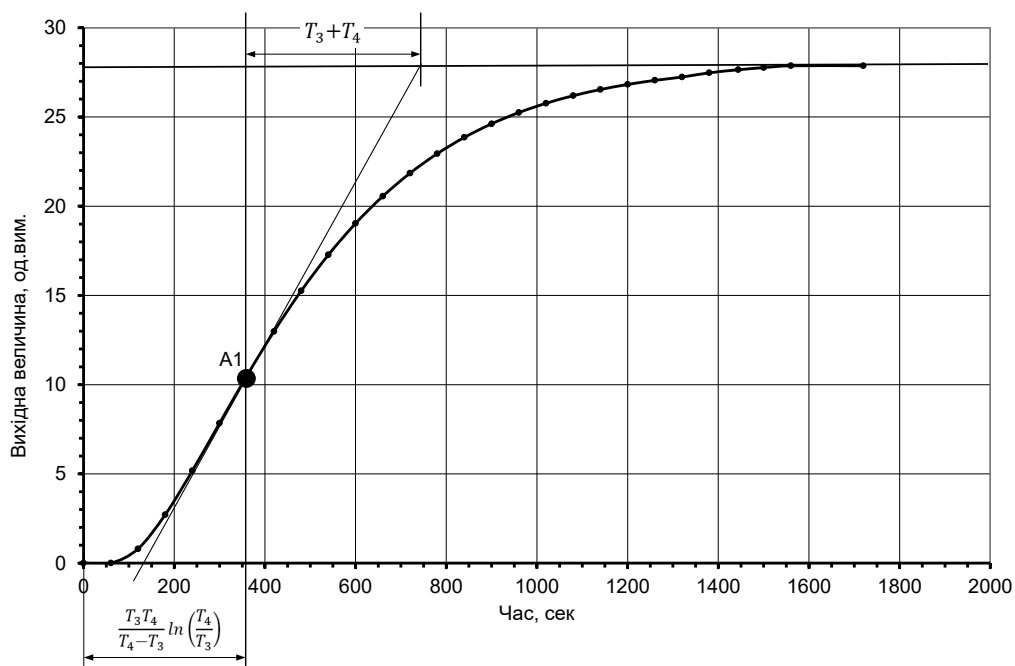


Рисунок 1.2 - Інженерні методи ідентифікації ОК: методи 30 та 31

1.2.2 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.

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.

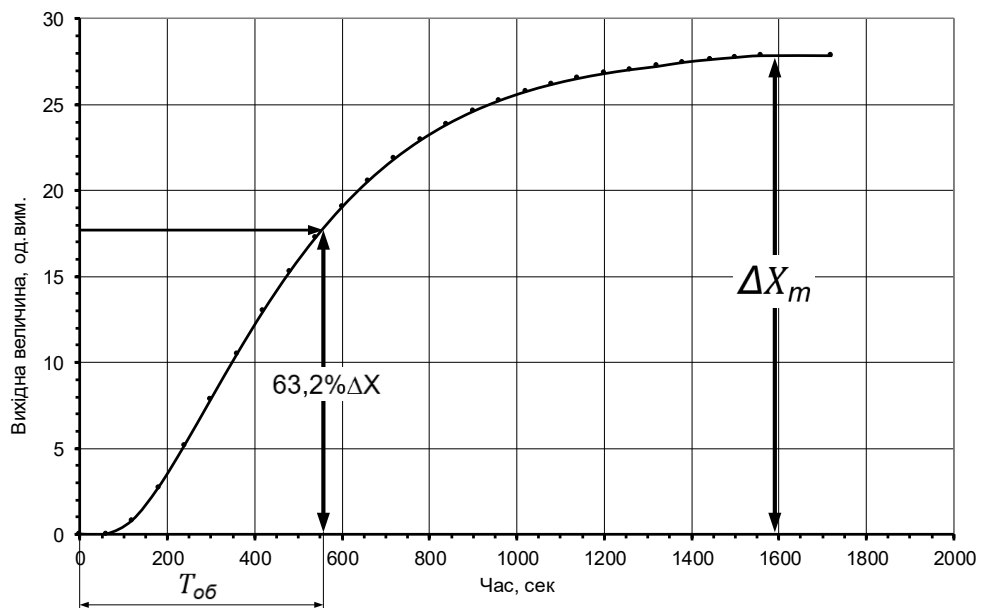


Рисунок 1.3 - Метод 60

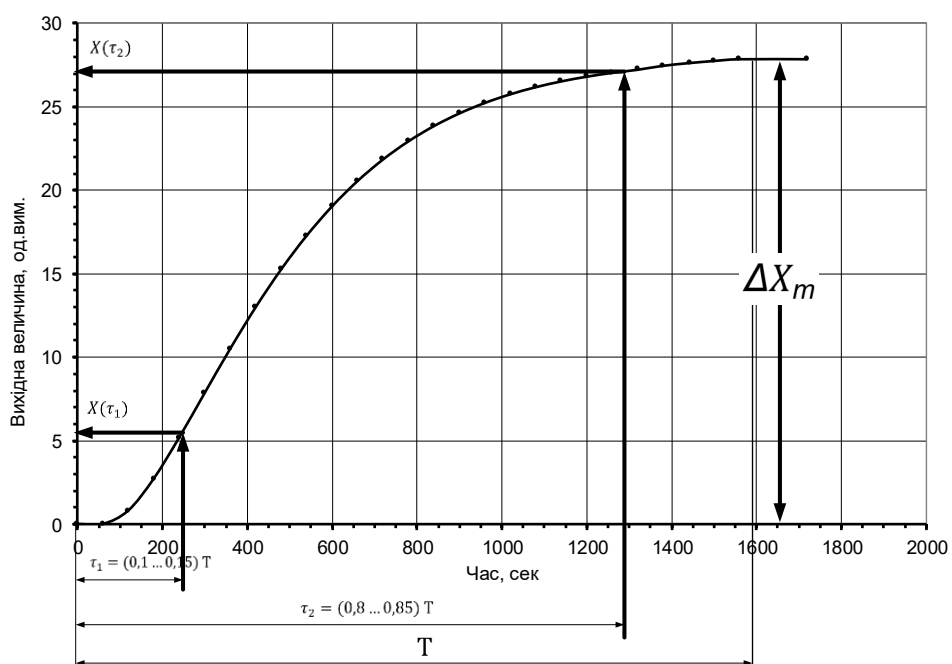


Рисунок 1.4 – Метод 40

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 стале 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

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

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 $0,283 \times \Delta X_T$ та $0,623 \times \Delta X_T$ 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:

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

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

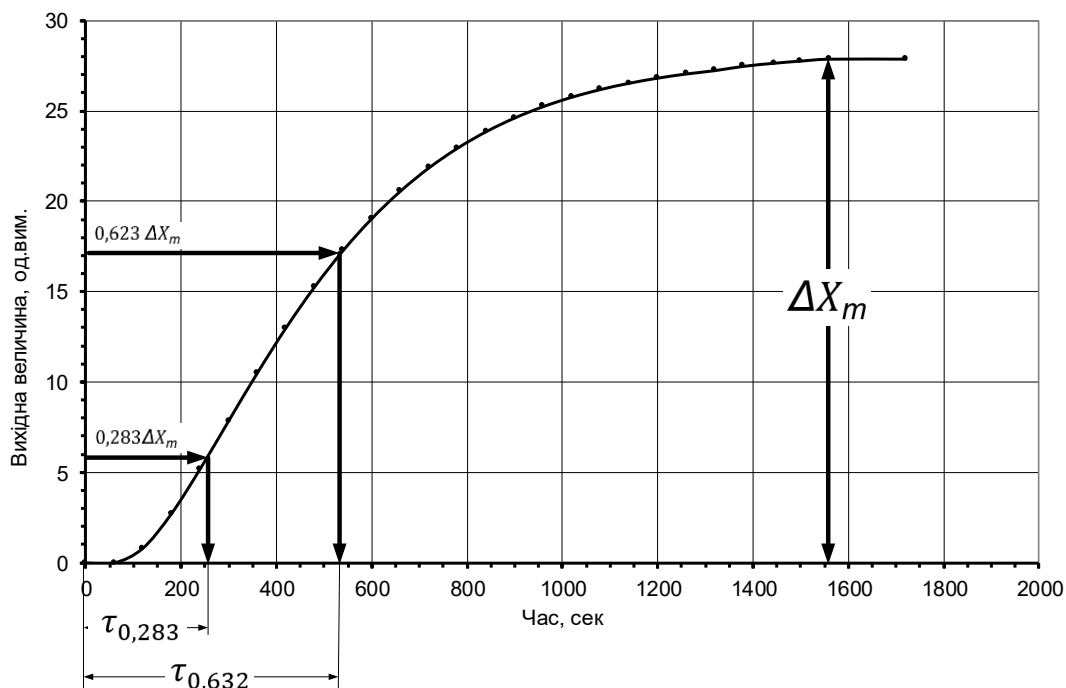


Рисунок 1.5 – Метод 61

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:

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

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

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.

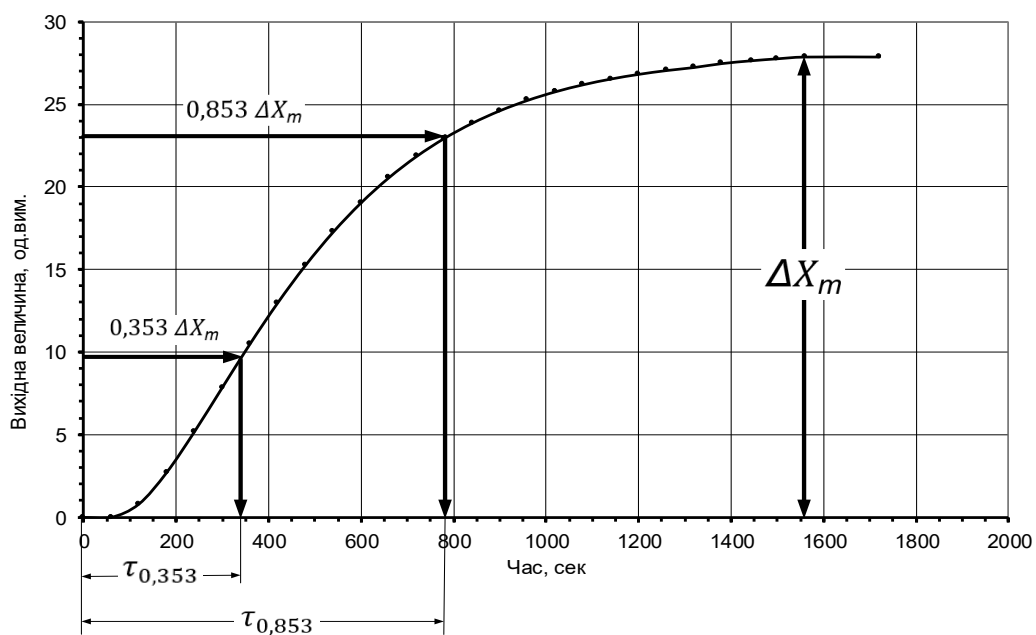


Рисунок 1.6 – Метод 62

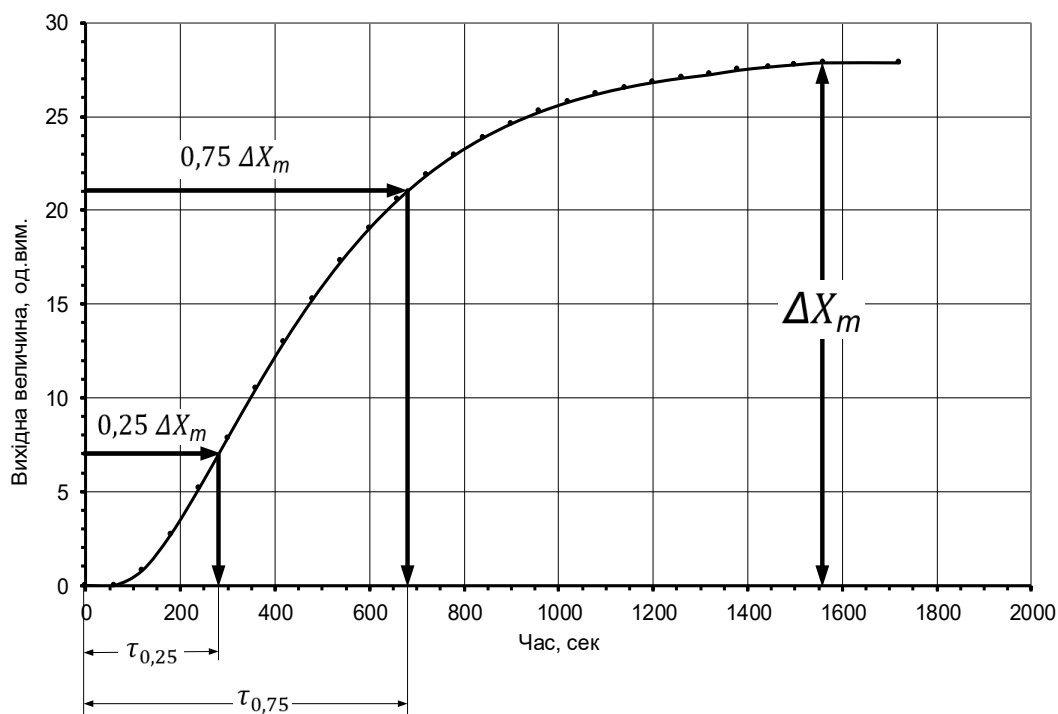


Рисунок 1.7 – Метод 63

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

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

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

1.2.3 Апроксимація кривої розгону

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

$$x(\tau) = K_{06} \left(1 - e^{-\frac{\tau - \tau_{06}}{T_{06}}} \right), \quad (1.19)$$

із визначенням K_{06} та із наперед заданим значенням K_{06} відповідно.

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

$$x(\tau) = K_{06} \left(1 - \frac{1}{T_3 - T_4} \left(T_3 \cdot e^{-\frac{\tau}{T_3}} - T_4 \cdot e^{-\frac{\tau}{T_4}} \right) \right), \quad (1.20)$$

із визначенням K_{06} та із наперед заданим значенням K_{06} відповідно.

1.2.4 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.

1.2.5 Визначення параметрів об'єктів керування 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.

1.3 Алгоритм та результати дослідження на прикладі однієї кривої розгону

У цьому дослідженні наведено результати використання вказаних в пп. 1.2.1 – 1.2.3 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.

1.3.1 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).

Крок 3. Визначення коефіцієнта детермінації R2 (R2).

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.

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

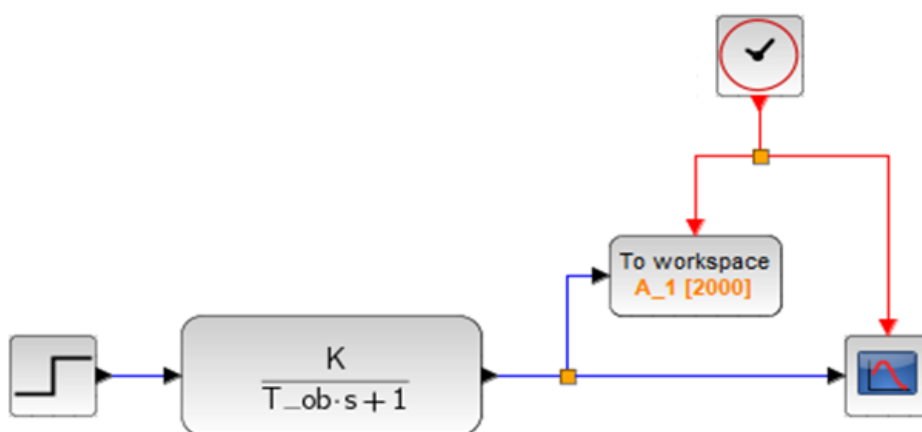


Рисунок 1.8 - Модель аперіодичної ланки першого порядку без запізнення

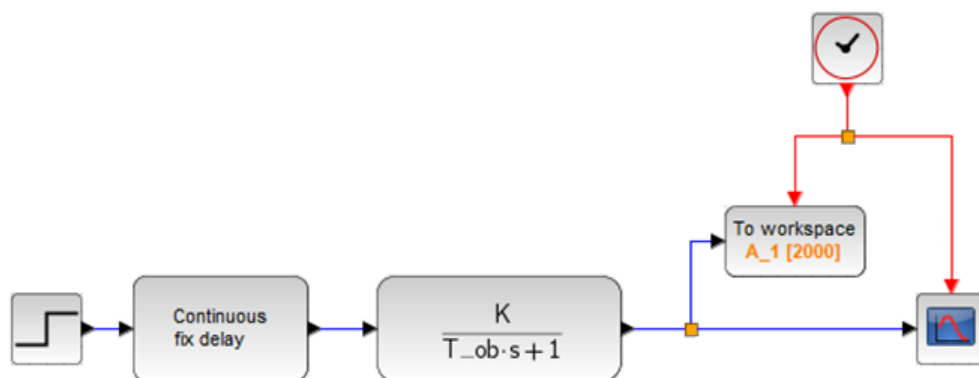


Рисунок 1.9 - Модель аперіодичної ланки першого порядку з запізненням

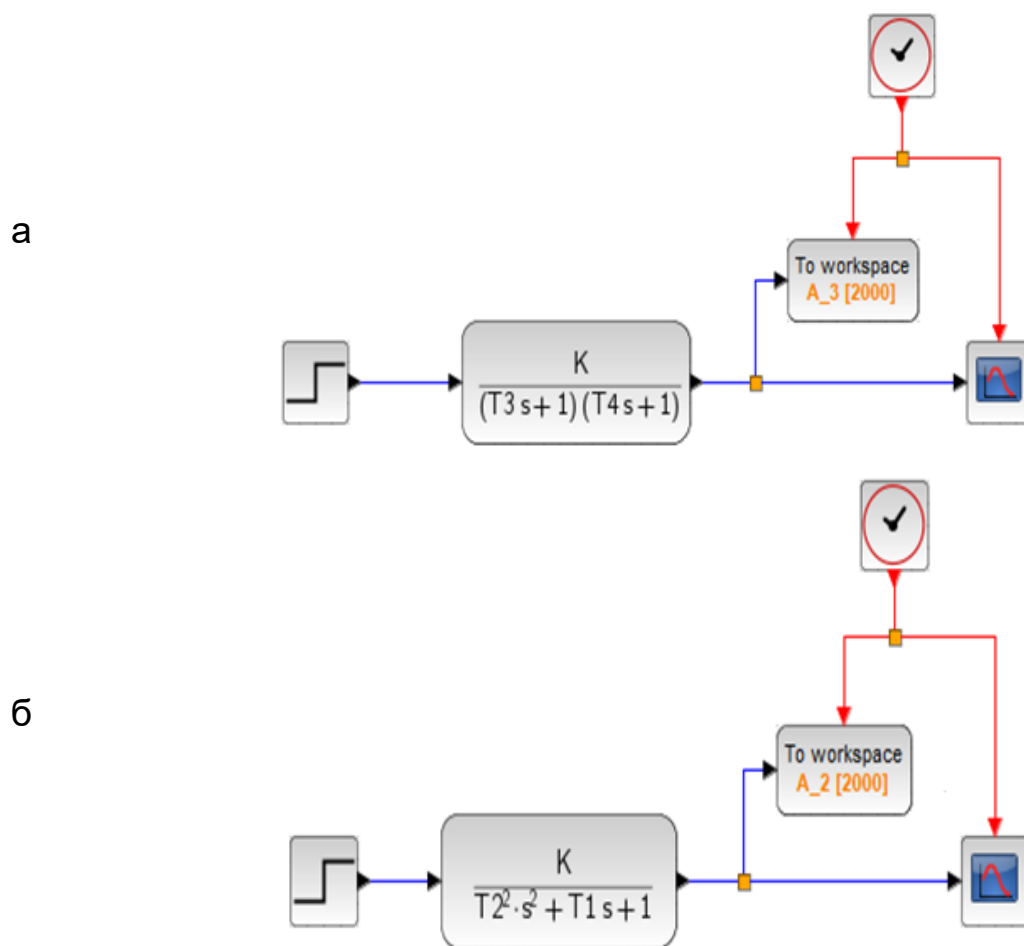


Рисунок 1.10 - Модель аперіодичної ланки другого порядку:
 а) із використанням констант T_3 та T_4 ; б) із використанням констант T_1
 та T_2

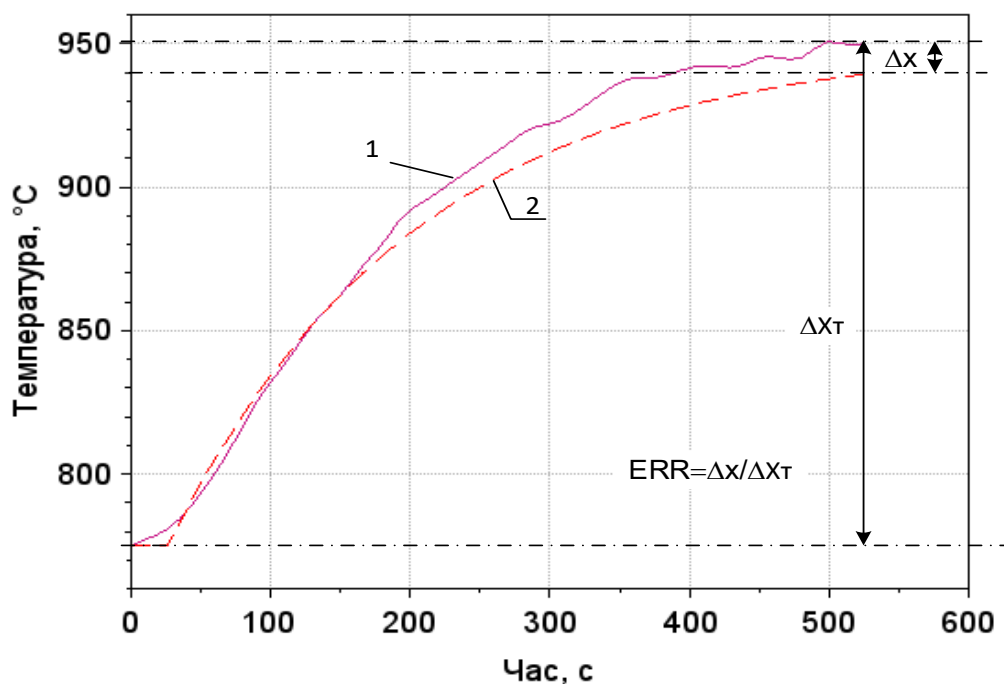


Рисунок 1.11 - Відносна статична похибка моделювання ERR

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.

1.3.2 Приклад реалізації алгоритму для однієї кривої розгону

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

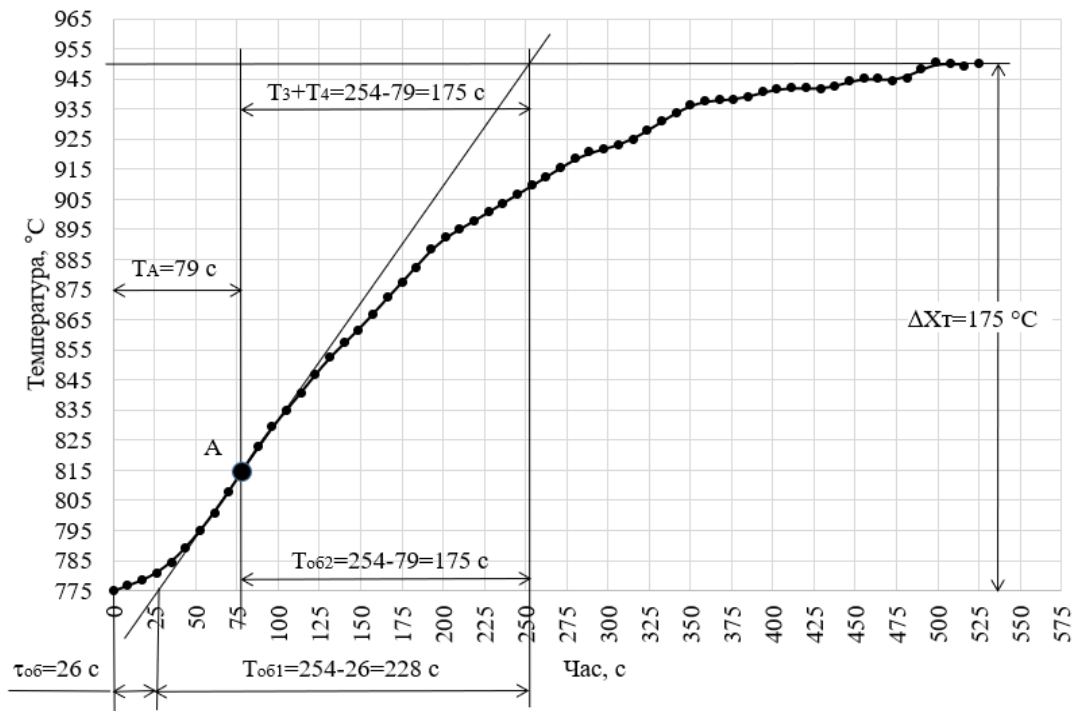


Рисунок 1.12 - Крива розгону по даним варіанта 24

1.3.2.1 Результати моделювання кривої розгону методами 10/11, 20/21, 30/31

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

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

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

Метод 31: Використовуючи рішення системи рівнянь (рис. 1.12):

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

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

За теоремою Вієта обчислені коефіцієнти T_1 та T_2 :

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

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

Також було реалізовано автоматичне визначення точки перегину [11], побудова дотичної та отримання параметрів об'єкту для інженерних методів 10, 20, 30. Результати наведені в табл.1.1 та на рис. 1.13.

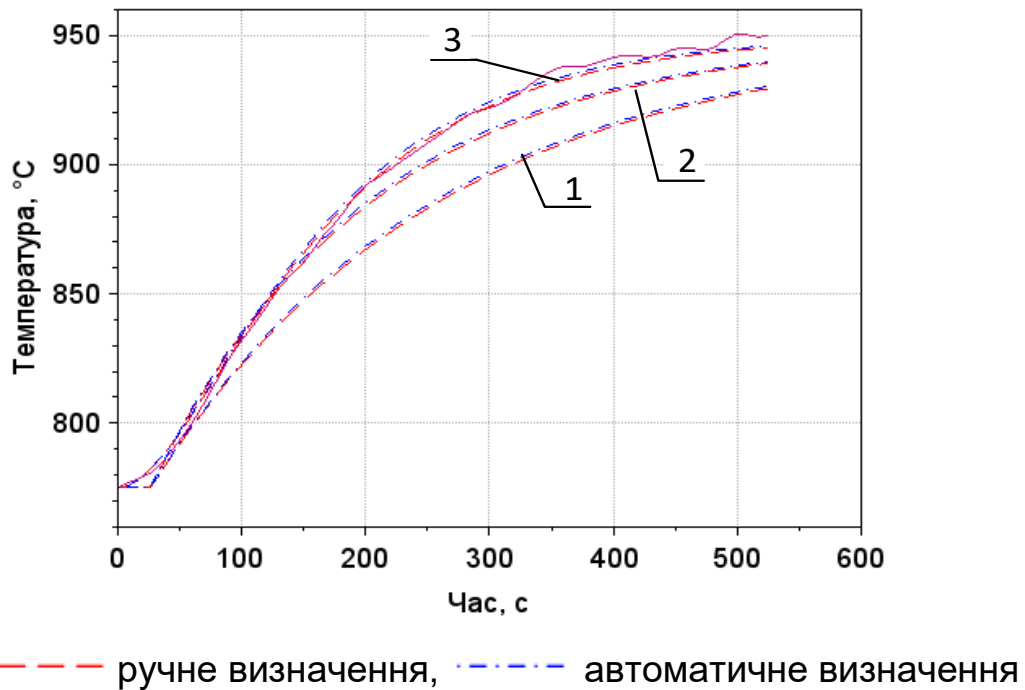


Рисунок 1.13 - Результати моделювання:

1 – методи 10/11; 2 – методи 20/21; 3 – методи 30/31

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

Продовження таблиці 1.1

Автоматичне визначення				Ручне визначення			
$\tau_{об}$	$T_{об}$	ERR	R2	$\tau_{об}$	$T_{об}$	ERR	R2
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

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.

1.3.2.2 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		

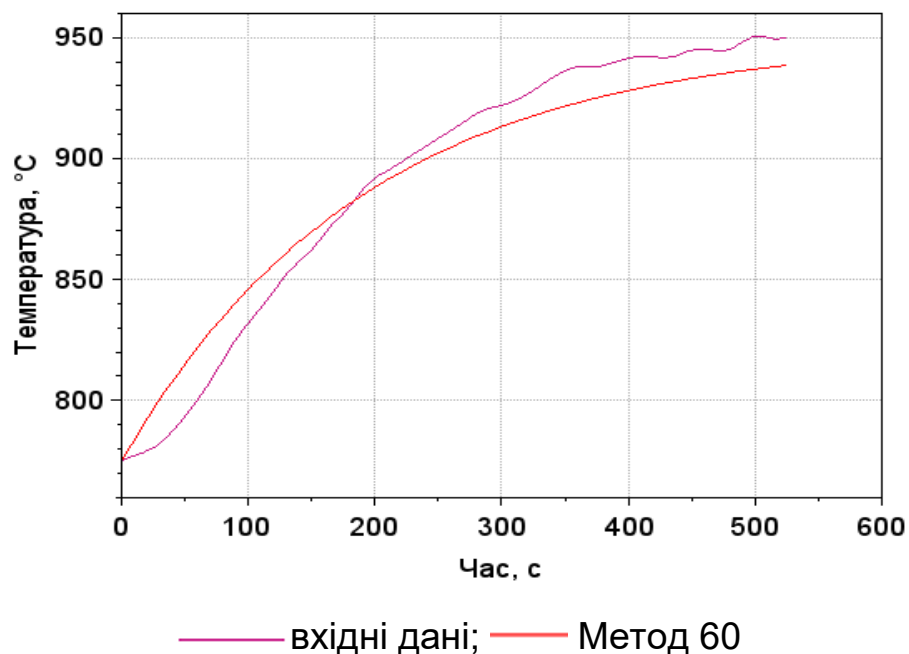


Рисунок 1.14 – Результати моделювання методом 60

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.

1.3.2.3 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		

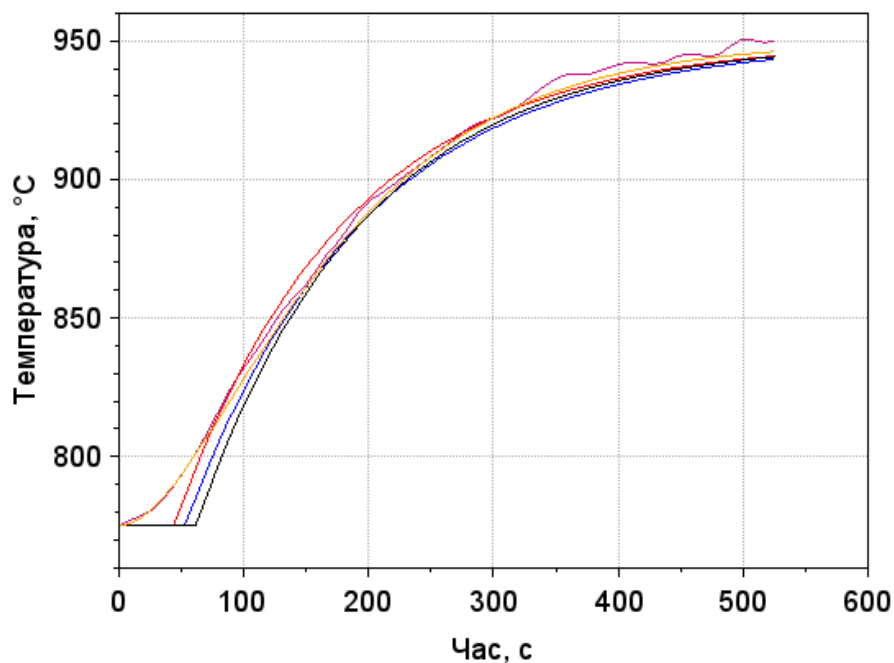


Рисунок 1.15 – Результати моделювання методами двох точок:

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

1.3.2.4 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 (1.19).

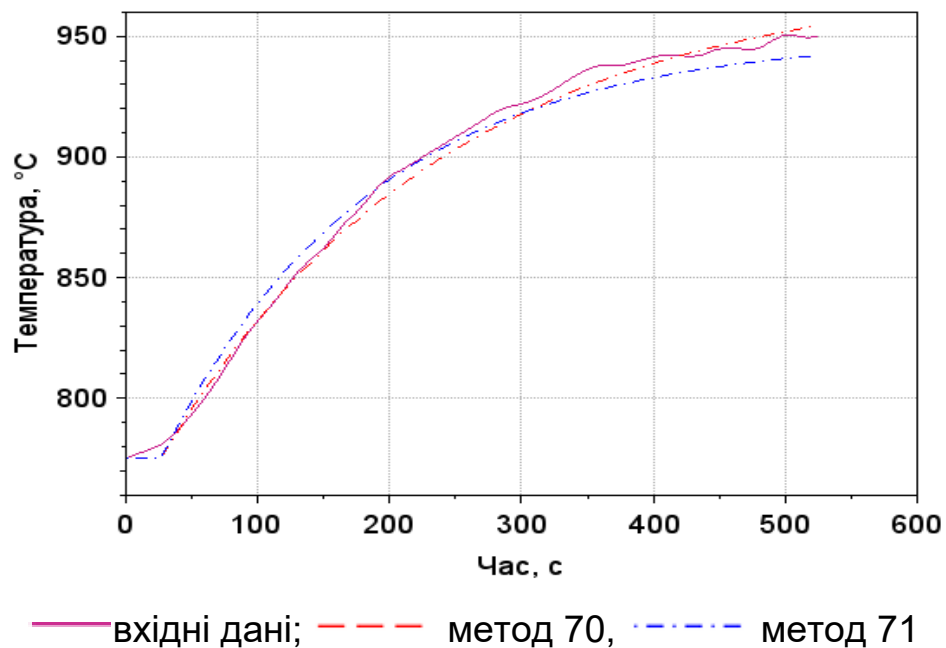


Рисунок 1.16 - Результати моделювання методами 70 та 71

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

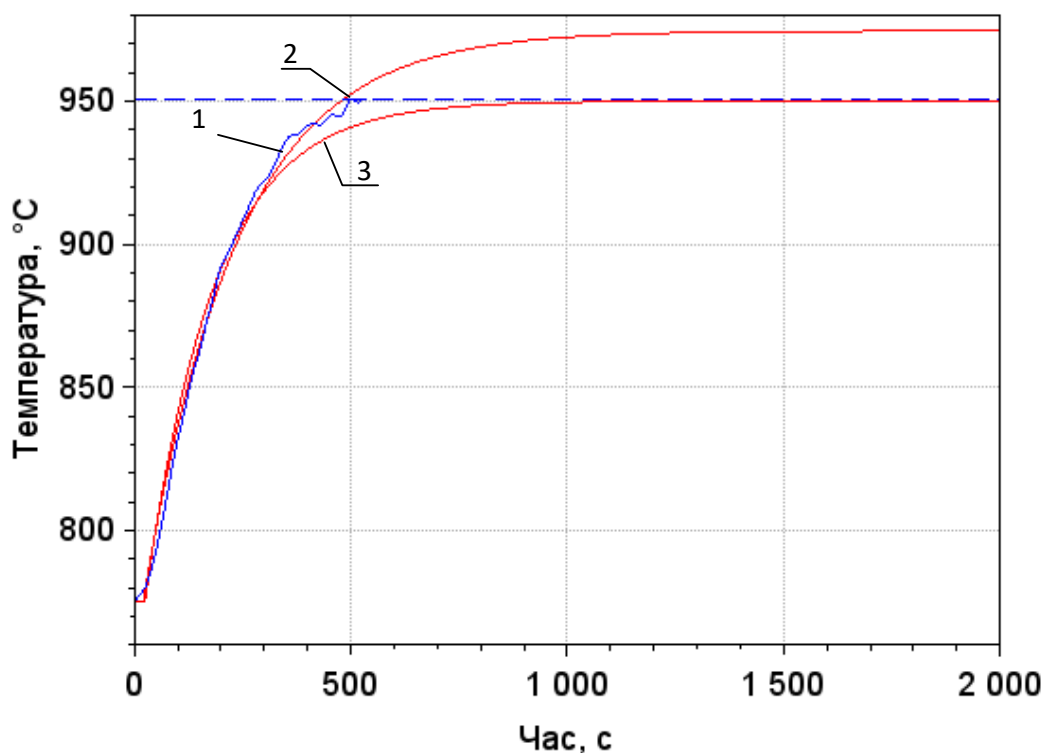
Параметр	Автоматичне визначення	ERR	R2
Метод 70			
$K_{об}$	9,978	-0,0252	0,995
$\tau_{об}$	19,424		
$T_{об}$	217,695		

Параметр	Автоматичне визначення	ERR	R2
Метод 71			
$K_{об}$	8,750	0,0448	0,986
$\tau_{об}$	23,508		
$T_{об}$	160,902		

З використанням вбудованої функції datafit [12] 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.



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

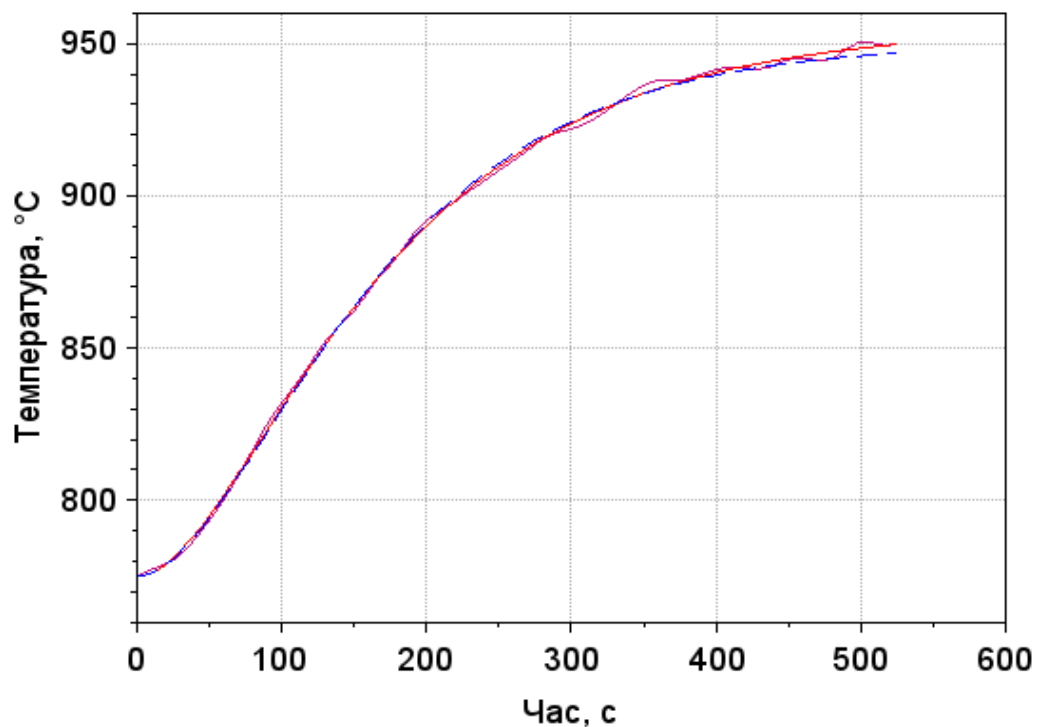
1.3.2.5 Результати моделювання кривої розгону методами 80 та 81

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.

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		



— вхідні дані; — Метод 80, - - - Метод 81

Рисунок 1.18 – Результати моделювання з використанням методів 80 та 81

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

1.4 Аналіз результатів дослідження вибірки кривих розгону

1.4.1 Середні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону

В табл. 1.6 та на рис. 1.19 наведені середні значення відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2 для всіх варіантів експериментальних даних кривих розгону, визначені за допомогою вищезгаданих п'ятнадцяти методів моделювання у додатку XCOS.

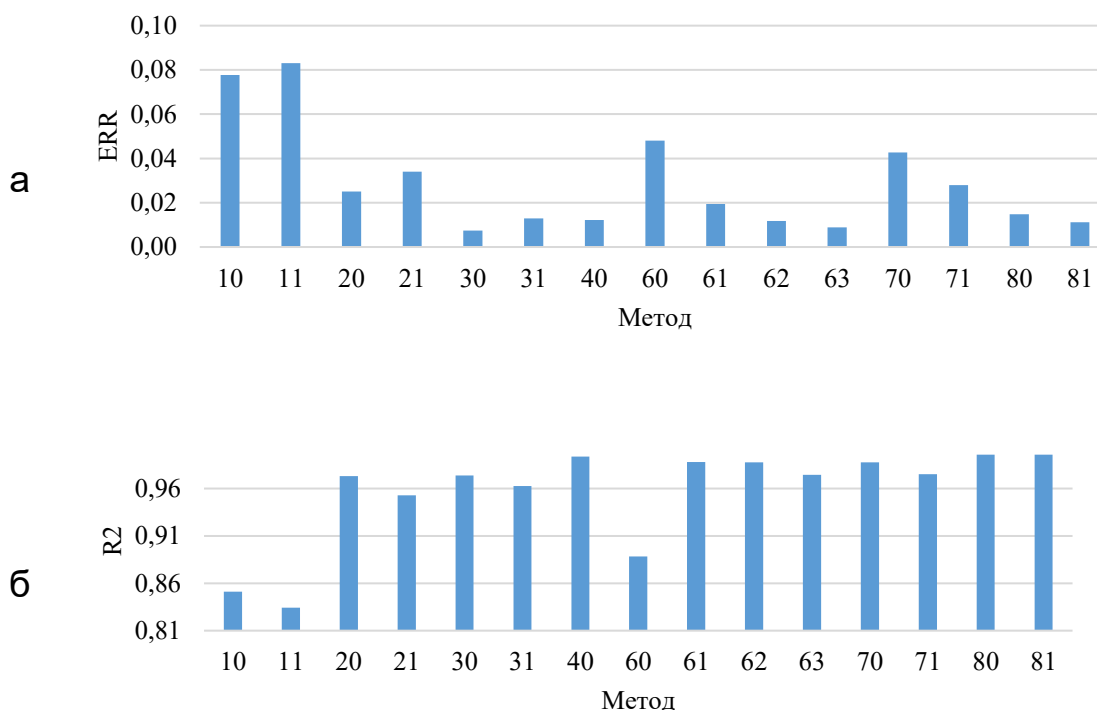


Рисунок 1.19 – Середні значення: а) відносної статичної похибки ERR; б) коефіцієнта детермінації R2 по всім варіантам кривих розгону

Таблиця 1.6 – Середні значення похибки ERR та коефіцієнта R2 для всієї вибірки

Метод									
№	10	11	20	21	30	31	40	60	61
ERR	0,079	0,08	0,026	0,035	0,008	0,014	0,013	0,050	0,02
R2	0,848	0,83	0,973	0,955	0,982	0,970	0,993	0,897	0,99
Метод									
№	62	63	70	71	80	81	min	max	
ERR	0,01	0,010	0,042	0,029	0,013	0,013	0,008	0,084	
R2	0,99	0,983	0,987	0,975	0,996	0,994	0,831	0,996	

1.4.2 Максимальні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону

В табл. 1.7 та на рис. 1.20 наведені максимальні значення відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2 для всіх варіантів експериментальних даних кривих розгону, визначені за допомогою вищезгаданих п'ятнадцяти методів моделювання у додатку XCOS.

Таблиця 1.7 – Максимальні значення похибки ERR та R2 для всієї вибірки

Метод									
№	10	11	20	21	30	31	40	60	61
ERR	0,25	0,308	0,09	0,213	0,058	0,162	0,047	0,128	0,081
R2	0,96	0,916	0,99	0,996	0,999	0,999	0,998	0,977	0,996
Метод							min	max	
№	62	63	70	71	80	81			
ERR	0,045	0,056	0,072	0,0915	0,0317	0,0587	0,032	0,308	
R2	0,996	0,999	0,996	0,996	0,9996	0,9996	0,916	0,9996	

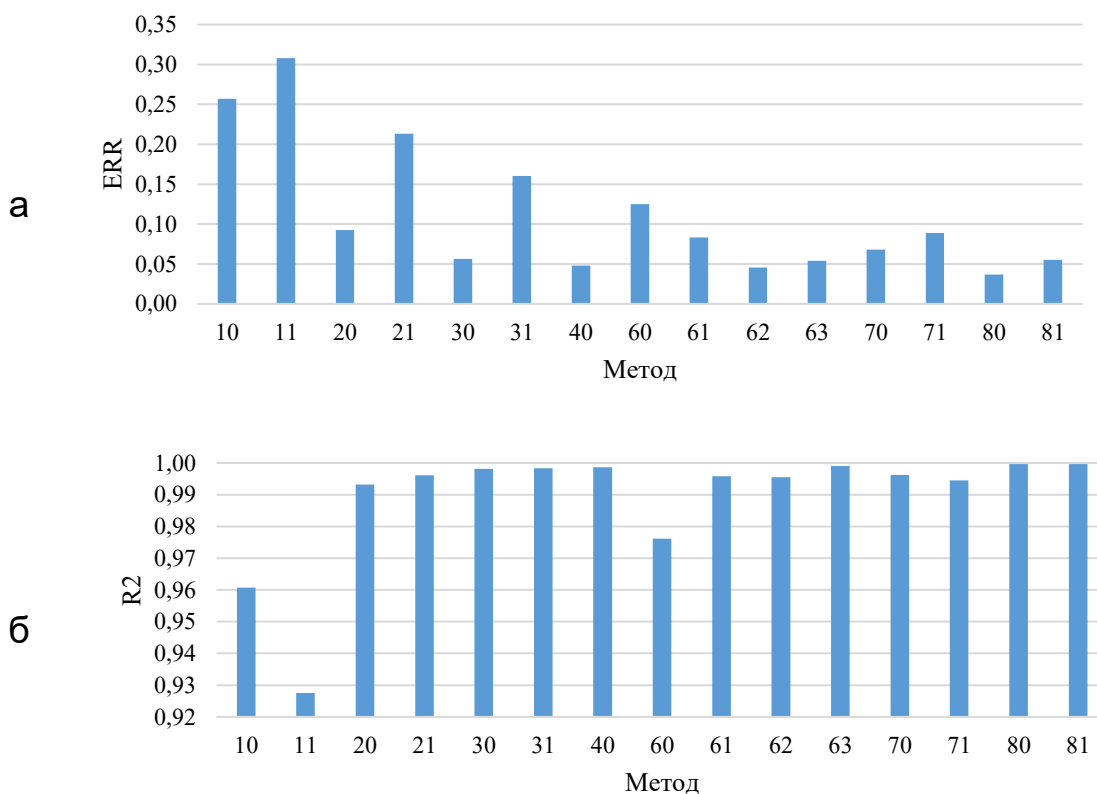


Рисунок 1.20 – Максимальні значення по кожному методу для всіх варіантів кривих розгону: а) ERR; б) R2

Аналіз наведених результатів підтверджує попередній висновок про те, що за допомогою методу 11 отримані незадовільні результати – максимальне значення максимальної відносної статичної похибки складає 0,308 (рис. 1.21) та максимальне значення коефіцієнта детермінації не перевищує 0,916.

Використання методів 30, 40, 62, 63, 80 та 81 для ідентифікації ОК забезпечує такі максимальні значення відносної статичної похибки моделювання, що не перевищують 0,05. Використання методів 20, 21, 30, 31, 40, 61, 62, 63, 70, 71, 80, 81 забезпечують такі максимальні значення коефіцієнта детермінації R2, що перевищують 0,99.

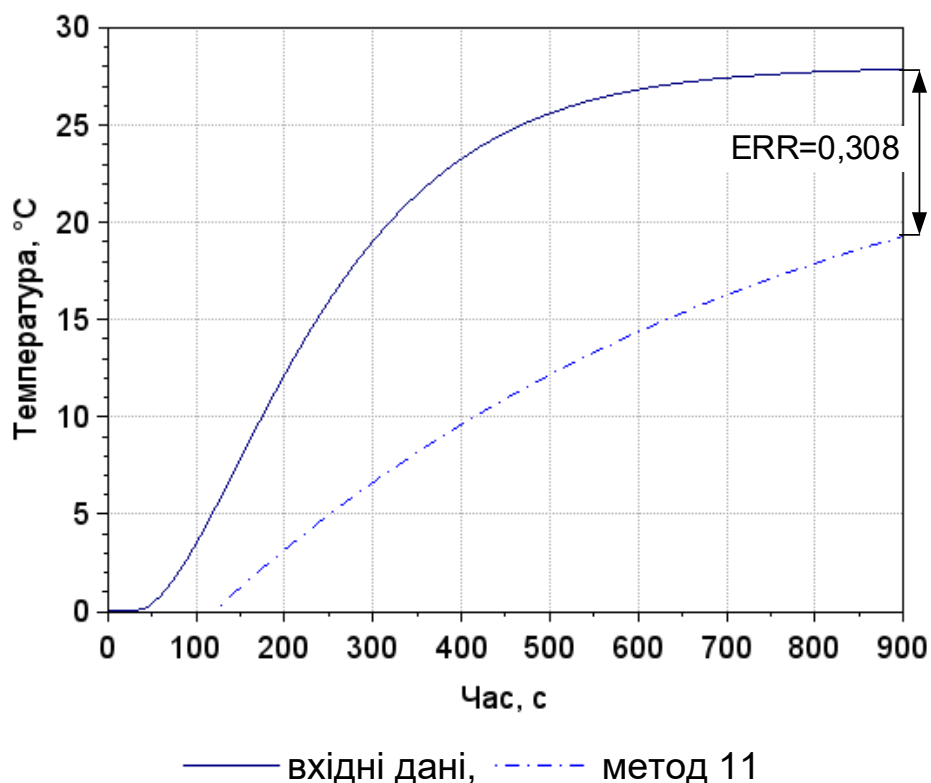


Рисунок 1.21 – Результати моделювання з використанням методу 11 для варіанту 21

Для ілюстрації максимального значення відносної статичної похибки на рис. 1.21 наведено результати моделювання кривої розгону з використанням параметрів ОК, визначених за допомогою методу 11 для експериментальних даних варіанта 21. Очевидна суттєва невідповідність результатів моделювання експериментальним даним.

1.4.3 Мінімальні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону

В табл. 1.8 та на рис. 1.22 наведені мінімальні значення відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2 для всіх варіантів експериментальних даних кривих розгону, визначені за допомогою вищезгаданих п'ятнадцяти методів моделювання у додатку XCOS.

Таблиця 1.8 – Мінімальні значення похибки ERR та R2 по всіх варіантах

Метод									
№	10	11	20	21	30	31	40	60	61
ERR	0,0184	0,0243	0,004	0,0054	0,0002	0,0005	0,001	0,007	0,002
R2	0,474	0,1918	0,7317	0,3859	0,8586	0,496	0,974	0,787	0,954
Метод							min	max	
№	62	63	70	71	80	81			
ERR	0,0016	0,0009	0,011	0,0032	0,0003	0,0013	0,0002	0,0243	
R2	0,9677	0,8984	0,982	0,9406	0,9923	0,9757	0,1918	0,9923	

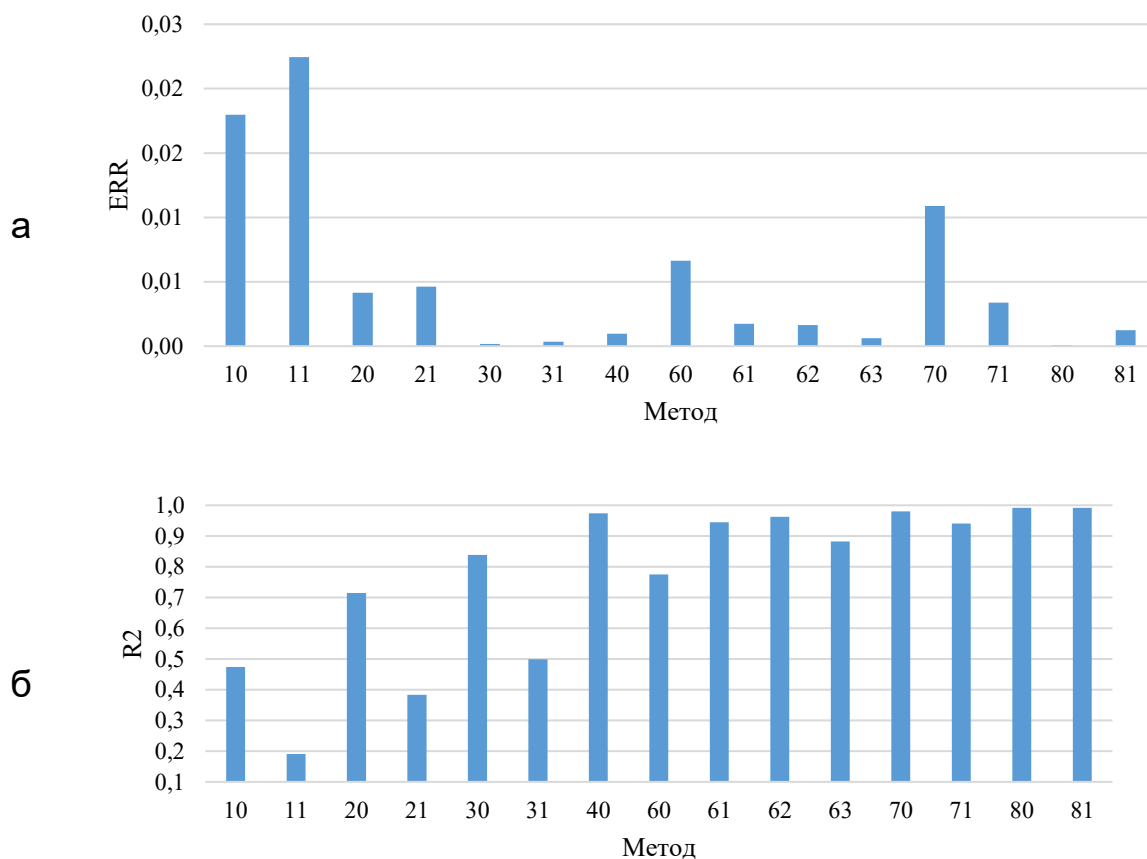


Рисунок 1.22 – Мінімальні значення ERR та R2 по кожному методу для всіх варіантів кривих розгону

При аналізі наведених результатів є очевидним висновок, що використання методу 11 знову призвело до отримання найгірших показників – найбільшого з мінімальних значення похибки 0,0243 (рис. 1.23) та найменшого з мінімальних значення коефіцієнта детермінації 0,1918.

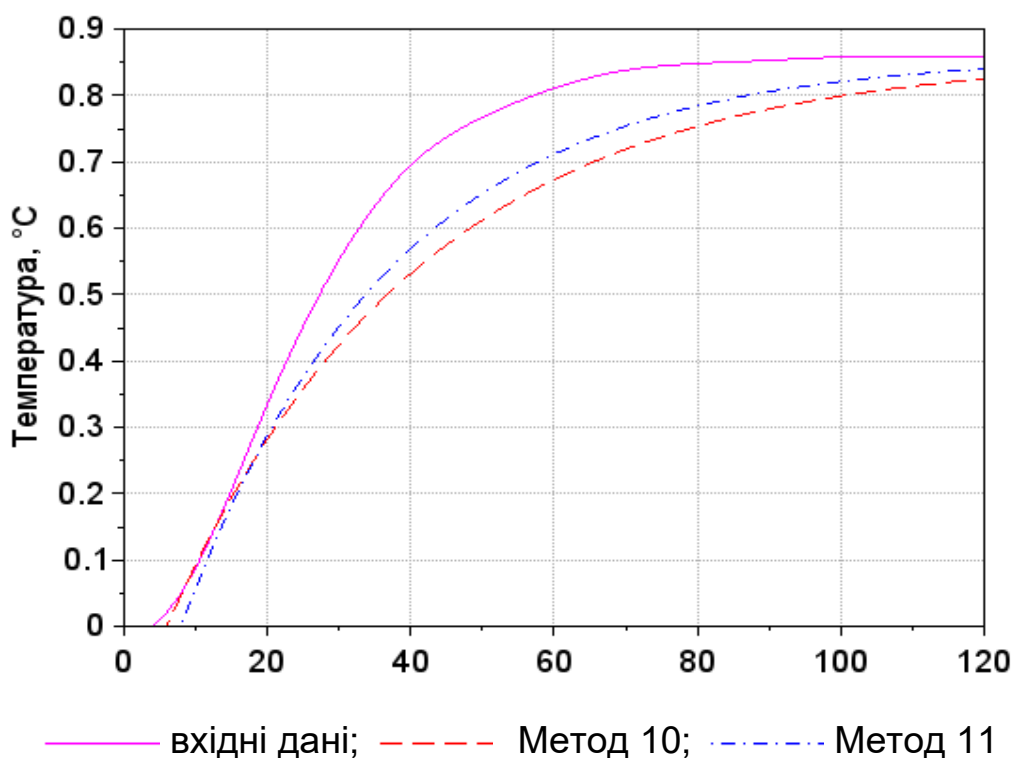


Рисунок 1.23 – Результати моделювання з використанням методу 11 для варіанту 38

Також можна бачити, що для метода 80 мінімальне значення коефіцієнта детермінації перевищує 0,99, а мінімальне значення відносної статичної похибки дорівнює 0,0003 (рис. 1.24).

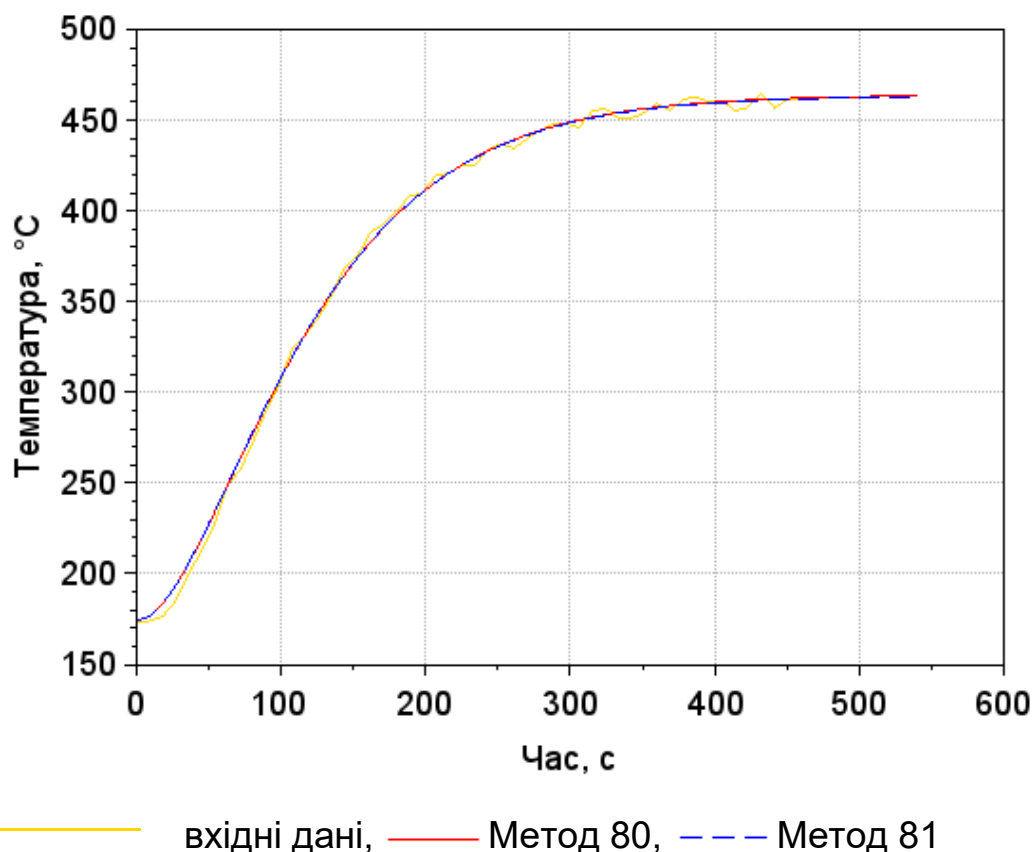


Рисунок 1.24 – Результати моделювання з використанням методу 80/81 для варіанту 4

1.4.4 Зведена інформація щодо показників моделювання кривих розгону для всієї вибірки

При аналізі наведеної табл. 1.9 та на рис. 1.25 зведеної інформації щодо мінімальних і максимальних значень відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R^2 , отриманих з використанням усіх методів, можна відзначити, що:

- використання методу 11 спричиняє наявність найбільших значень похибки в діапазоні від 0,0224 до 0,3081 та може забезпечити R^2 не більше 0,9275;
- метод 10 забезпечує кращі результати, порівняно з методом 11, але максимальний R^2 не більше 0,9607 та похибку ERR не нижче 0,018;

– використання методу 80 забезпечує найкращі характеристики –
найменший діапазон по ERR та R2.

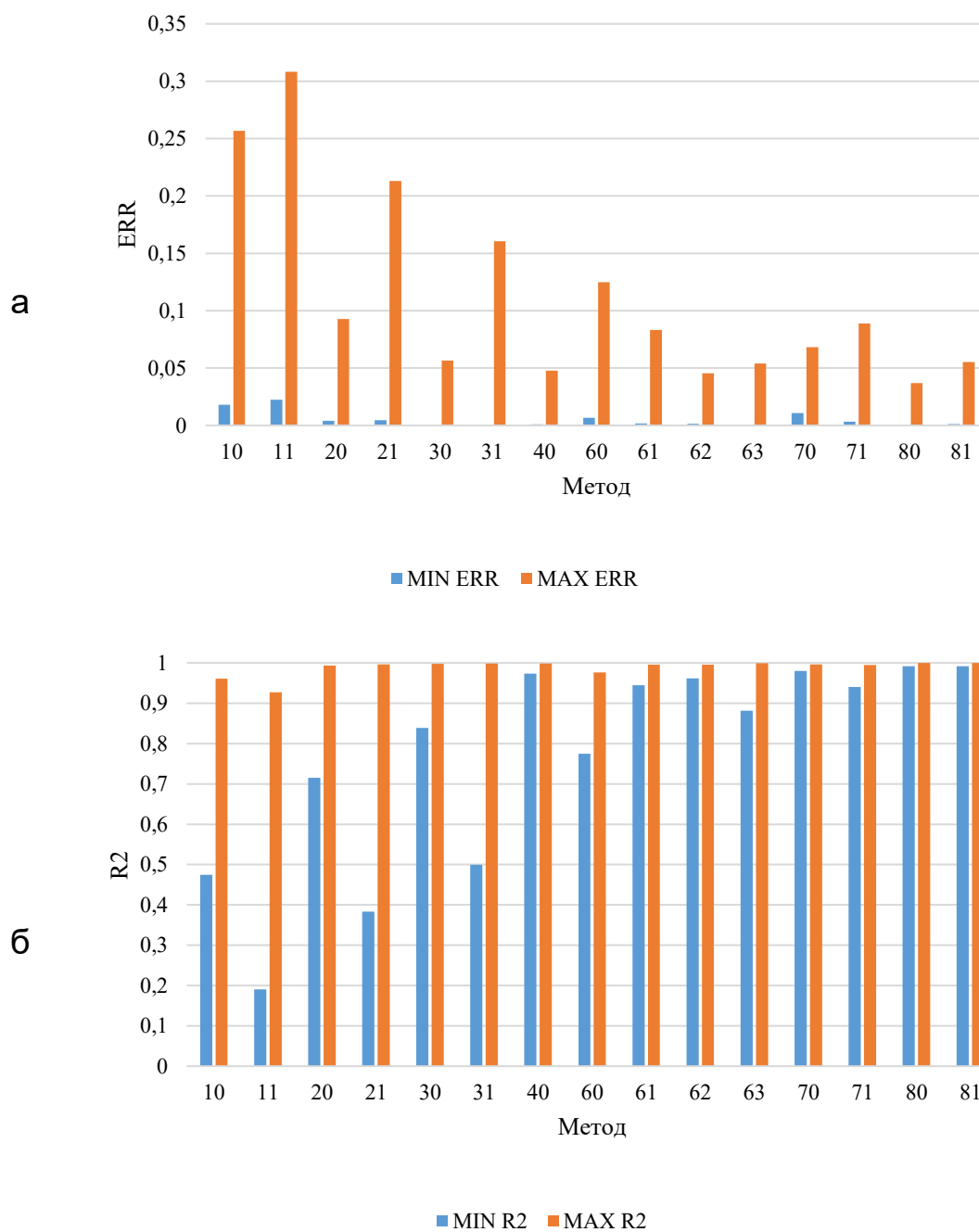


Рисунок 1.25 – Зведена інформація щодо мінімальних та
максимальних значень відносної статичної похибки моделювання та
коефіцієнта детермінації

Таблиця 1.9 – Зведена інформація по методам

Метод	min ERR	max ERR	min R2	max R2
10	0,0180	0,2568	0,4742	0,9607
11	0,0224	0,3081	0,1903	0,9275
20	0,0042	0,0927	0,7149	0,9932
21	0,0046	0,2131	0,3832	0,9961
30	0,0002	0,0565	0,8386	0,9981
31	0,0003	0,1605	0,4993	0,9984
40	0,0010	0,0479	0,9738	0,9987
60	0,0066	0,1248	0,7749	0,9761
61	0,0017	0,0833	0,9450	0,9958
62	0,0016	0,0455	0,9619	0,9955
63	0,0006	0,0541	0,8818	0,9991
70	0,0109	0,0682	0,9803	0,9963
71	0,0034	0,0888	0,9407	0,9945
80	0,0001	0,0368	0,9921	0,9997
81	0,0012	0,0554	0,9921	0,9997

1.4.5 Аналіз точності методів на підставі забезпечуваних при моделюванні значень відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації

1.4.5.1 Аналіз точності усіх методів дослідження

Були проаналізовані значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації, отримані в результаті моделювання кривих розгону з параметрами ОК, знайденими усіма методами, з метою визначити частоту забезпечення кожним методом мінімального значення похибки ERR або максимального значення коефіцієнта детермінації R2 (табл. 1.10, рис. 1.26) та зроблені наступні висновки:

– найчастіше мінімальне значення похибки забезпечують Методи 30, 31, 63 та 80, які використовують апроксимацію аперіодичною ланкою другого порядку;

– найчастіше максимальне значення R^2 наявне при використанні Методів 40 та 80.

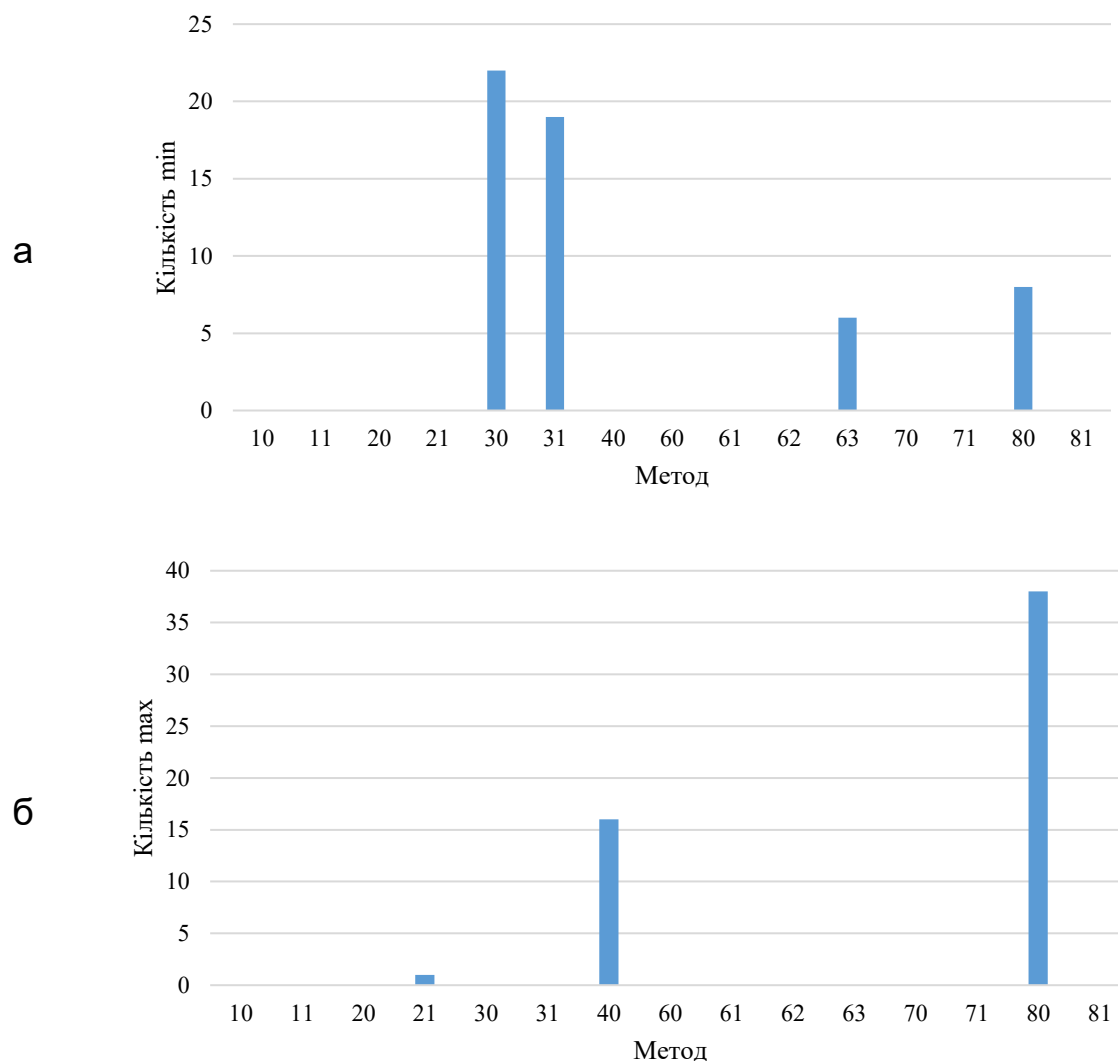


Рисунок 1.26 – Частота забезпечення кожним методом для всієї вибірки КР: а) мінімальної відносної статичної похибки ERR; б) максимального коефіцієнта детермінації R^2

Таблиця 1.10 – Частота забезпечення мінімальної відносної статичної похибки ERR або максимального коефіцієнта детермінації R2 кожним методом для всієї вибірки КР

№	Метод														
	10	11	20	21	30	31	40	60	61	62	63	70	71	80	81
min ERR	0	0	0	0	22	19	0	0	0	0	6	0	0	8	0
max R2	0	0	0	1	0	0	16	0	0	0	0	0	0	38	0

Було визначено частоту забезпечення кожним методом відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень (рис. 1.27).

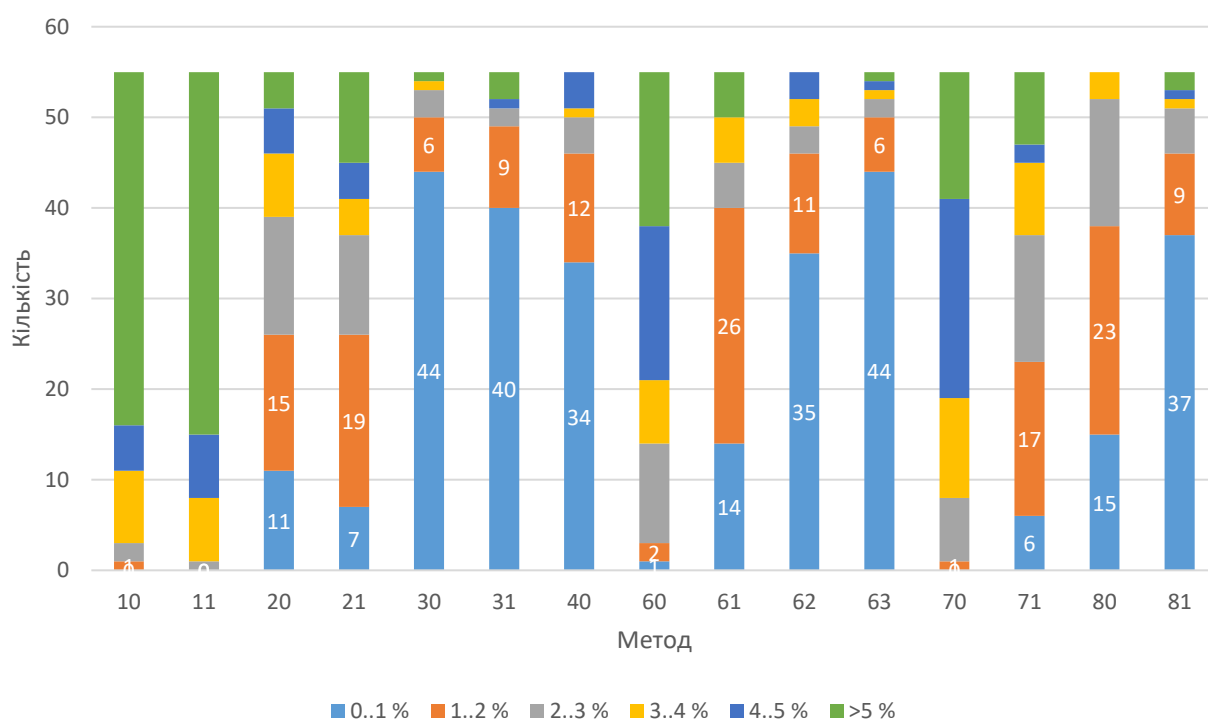


Рисунок 1.27 – Частота забезпечення кожним методом відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень

Як видно з рис. 1.27 найкращі результати щодо ERR забезпечує використання методів 30, 31, 40, 62, 63, 81, а найгірші – методи 10, 11, 60, 70.

Також було визначено частоту забезпечення кожним методом коефіцієнта детермінації R^2 в різних діапазонах його значень (рис. 1.28).

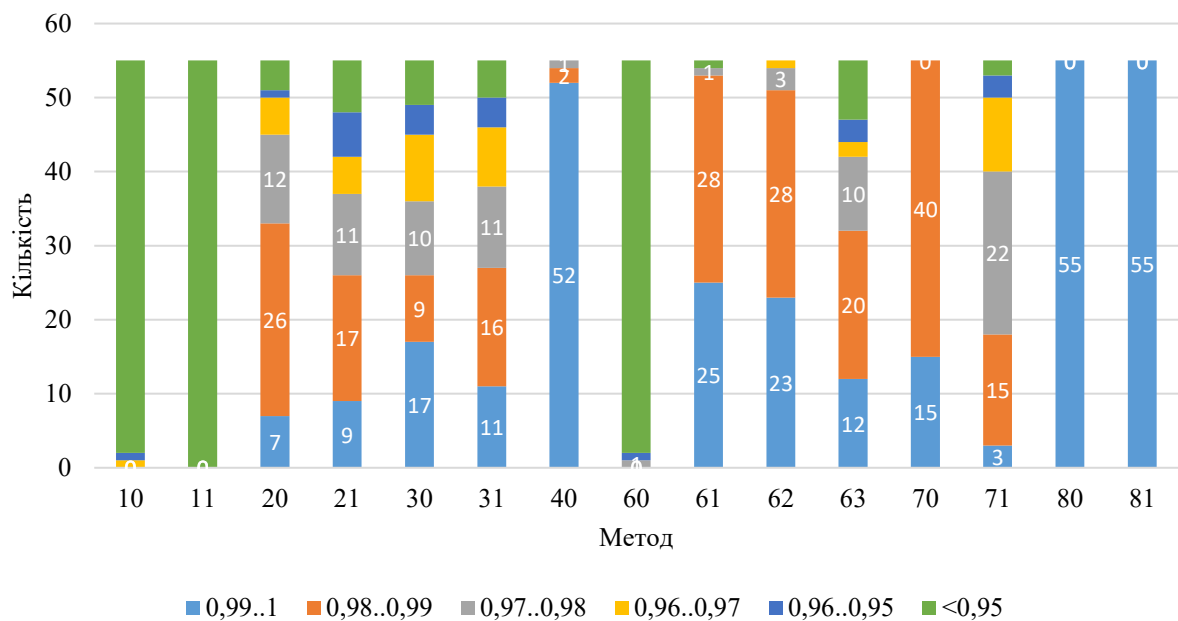


Рисунок 1.28 – Частота забезпечення кожним методом коефіцієнта детермінації R^2 в різних діапазонах його значень

Як видно з рис. 1.28 найкращі результати щодо R^2 забезпечує використання методів 40, 61, 62, 70, 80, 81, а найгірші – методи 10, 11, 60.

З наведених результатів (рис. 1.27, 1.28) можна зробити висновок, що методи 11, 21, 31, які передбачають визначення точки перегину КР та параметрів ОК вручну, забезпечують приблизно однакові результати в порівнянні з методами 10, 20, 30 з автоматичним визначенням, як для відносної статичної похибки, так і для коефіцієнта детермінації. Отже, зважаючи на недосконалість методів з ручним визначенням через

присутність людського фактору, було прийнято рішення виключити методи 11, 21, 31 із подальших досліджень.

1.4.5.2 Аналіз точності методів дослідження з автоматичним визначенням параметрів

Було проведено аналіз методів, окрім методів 11, 21, 31, аналогічний вищеприведеному в п. 1.4.5.1, результати якого наведені в табл. 1.11 та на рис. 1.29, 1.30, 1.31 та зроблені наступні висновки:

- найчастіше мінімальне значення похибки забезпечують методи 30 та 63;
- найчастіше максимальне значення R2 наявне при використанні методів 40 та 80.

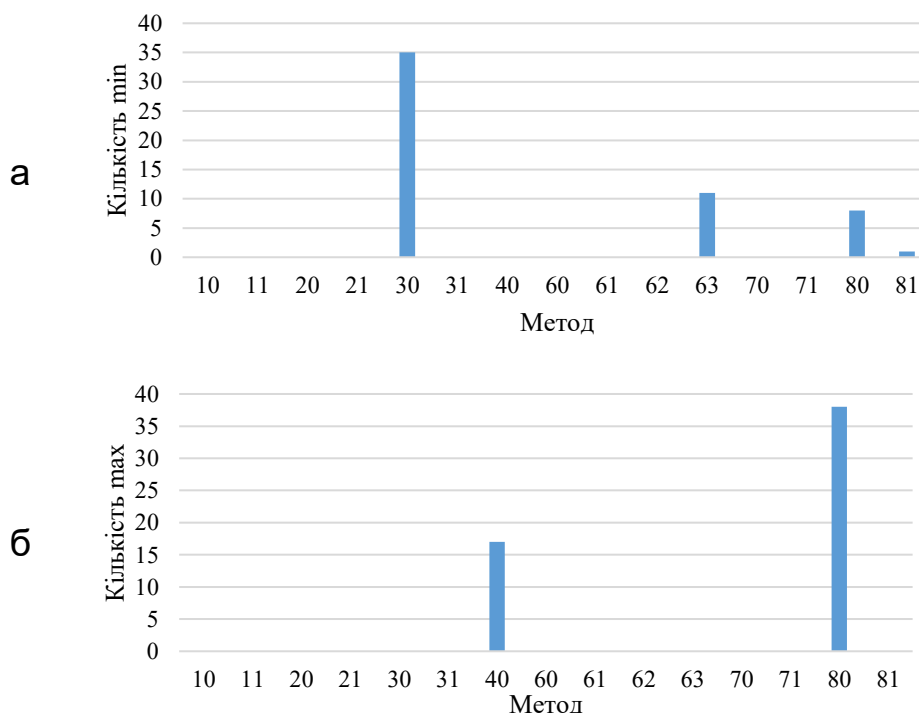


Рисунок 1.29 – Частота забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням для всієї вибірки КР: а) мінімальної відносної статичної похибки ERR; б) максимального коефіцієнта детермінації R2

Таблиця 1.11 – Частота забезпечення мінімальної відносної статичної похибки ERR або максимального коефіцієнта детермінації R2 кожним методом з автоматичним визначенням для всієї вибірки КР

№	Методи											
	10	20	30	40	60	61	62	63	70	71	80	81
min ERR	0	0	35	0	0	0	0	11	0	0	8	1
max R2	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	38	0

Було визначено частоту забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень (рис. 1.30).

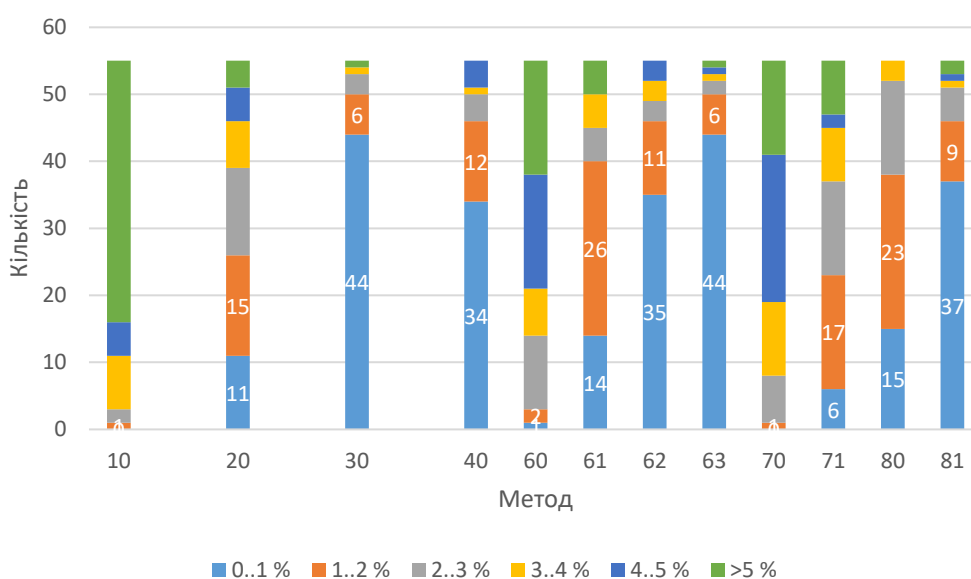


Рисунок 1.30 – Частота забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень

Як видно з рис. 1.30 найкращі результати щодо похибки моделювання ERR забезпечує використання методів 30, 31, 40, 62, 63,

81, а найгірші – методи 10, 60, 70, що підтверджує попередні висновки (п. 1.4.5.1).

Також було визначено частоту забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням коефіцієнта детермінації R^2 в різних діапазонах його значень (рис. 1.31).

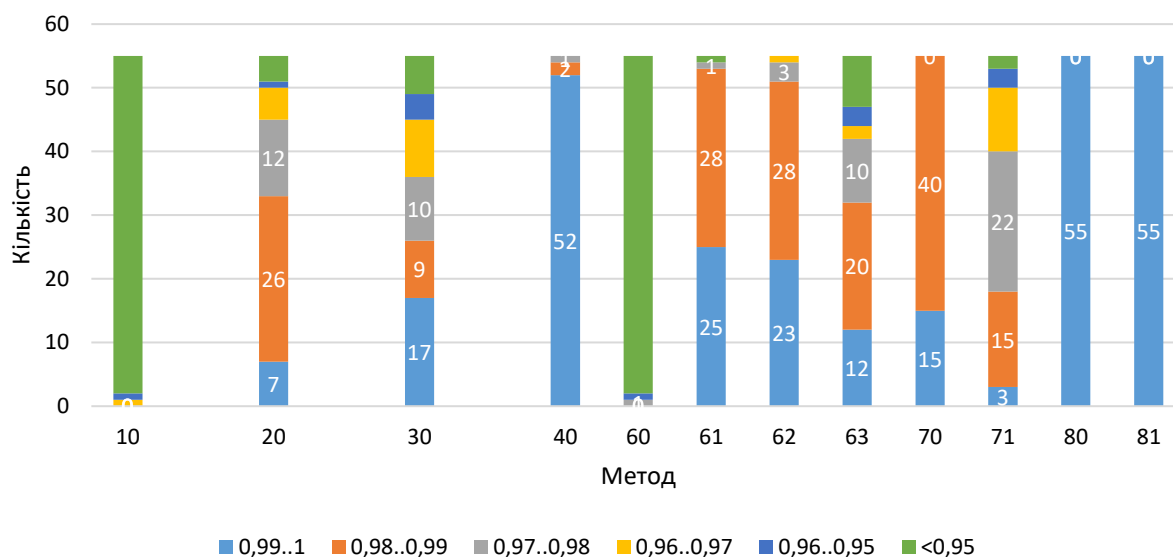


Рисунок 1.31 – Частота забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням коефіцієнта детермінації R^2 в різних діапазонах його значень

З наведених результатів (рис. 1.29, 1.30) можна зробити висновок, що методи 80 та 81 забезпечують максимальні значення коефіцієнта детермінації абсолютно для всіх КР з вибірки. Але, позаяк методи 30, 63, 80, 81 реалізують апроксимацію даних аперіодичною ланкою другого порядку, що передбачає ускладненість реалізації через значний для контролера обсяг обчислень, було прийнято рішення виключити їх із подальших досліджень.

1.4.5.3 Аналіз точності методів дослідження з автоматичним визначенням за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку

Було проведено аналіз методів з автоматичним визначенням за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку, аналогічний вищеописаному в п. 1.4.5.1 та п. 1.4.5.2, результати якого наведені в табл. 1.12 та на рис. 1.32, 1.33, 1.34 та зроблені наступні висновки:

- методи 40 та 62 найчастіше забезпечують мінімальне значення похибки;
- найчастіше максимальне значення коефіцієнта детермінації R2 наявне при використанні методу 40.

Таблиця 1.12 – Частота забезпечення мінімальної відносної статичної похибки ERR або максимального коефіцієнта детермінації R2 кожним методом з автоматичним визначенням за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку, для всієї вибірки КР

Метод	min ERR	max R2
10	0	0
20	0	0
40	25	48
60	0	0
61	3	0
62	26	4
70	1	3
71	0	0

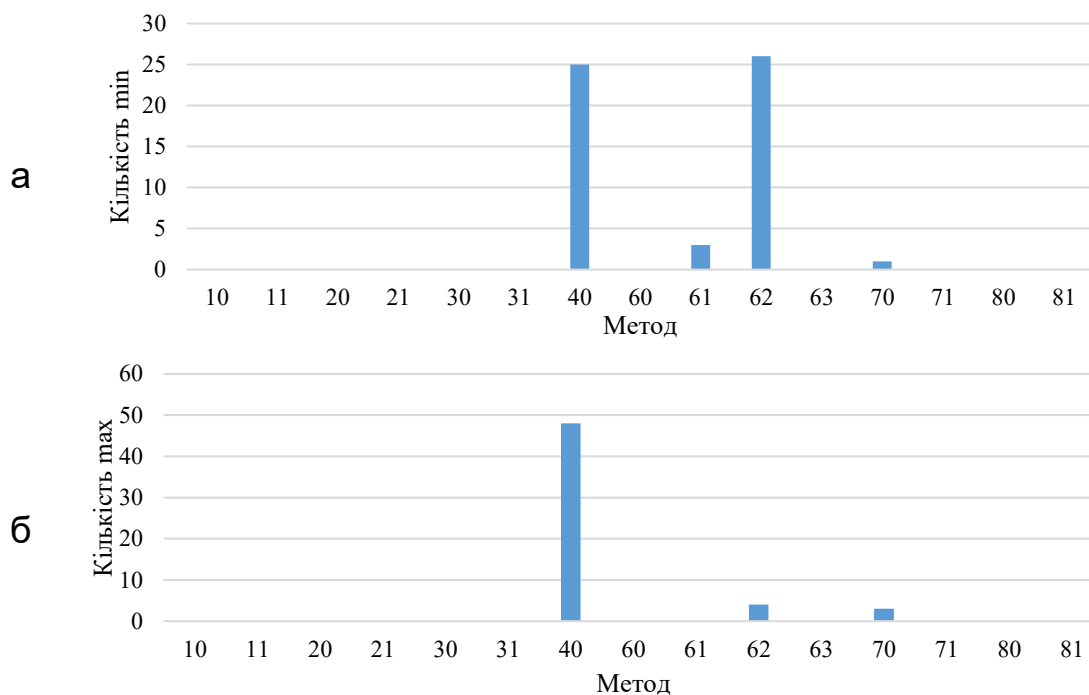


Рисунок 1.32 – Частота забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку, для всієї вибірки КР: а) мінімальної відносної статичної похибки ERR; б) максимального коефіцієнта детермінації R2

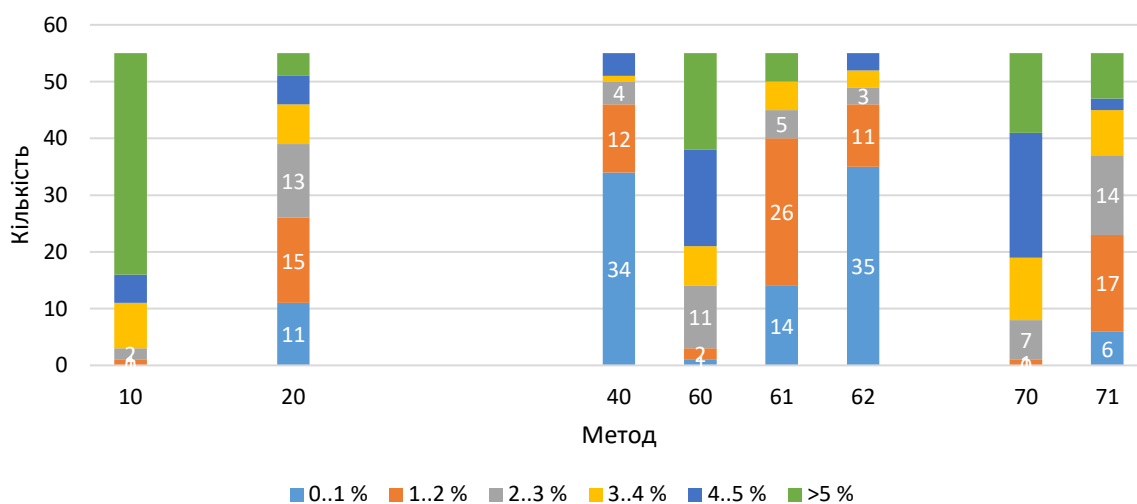


Рисунок 1.33 – Частота забезпечення відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень кожним методом з автоматичним визначенням, за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку

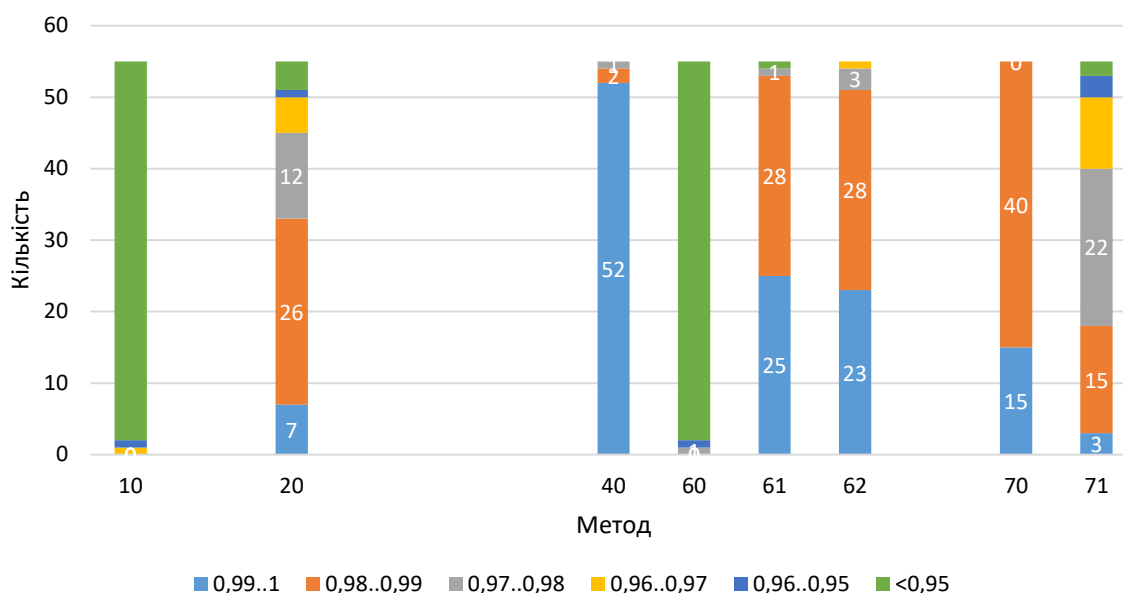


Рисунок 1.34 – Частота забезпечення коефіцієнта детермінації R^2 в різних діапазонах його значень кожним методом з автоматичним визначенням, за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку

З наведених результатів (рис. 1.33, 1.34) можна зробити висновок, що при виключенні методів, що апроксимують ланкою другого порядку, використання методів 40 та 62 забезпечує найменші значення відносної статичної похибки при моделюванні для більш ніж 60% вибірки, а також найбільші значення коефіцієнта детермінації для 94% вибірки.

1.4.6 Аналіз стабілізації параметра об'єкта керування при моделюванні

Відомо, що для аперіодичних об'єктів при реакції на стрибкоподібний вплив вихідна величина має досягти 98-99% рівноважного сталого значення за час, який складає $5 \times T_{об}$.

В якості критерію для порівняння результатів використання методів ідентифікації було обрано відношення $5 \times T_{об}$ до тривалості експерименту по зняттю кривої розгону T :

$$k = \frac{5 \times T_{об}}{T} \quad (1.22)$$

В ідеальному випадку отримані при моделюванні параметри об'єкта керування мають забезпечити досягнення вихідною величиною сталого значення за $5 \times T_{об}$ з мінімальним значенням відносної статичної похибки ERR та максимальним значенням коефіцієнта детермінації R^2 .

У табл. 1.13 та на рис. 1.35 наведена кількісна характеристика забезпечення критерія k усіма методами в різних діапазонах його значення.

Табл. 1.13 – Кількісна характеристика забезпечення критерія k усіма методами в різних діапазонах його значення

К	Методи														
	10	11	20	21	30	31	40	60	61	62	63	70	71	80	81
<0,9	0	0	1	0	0	0	19	0	9	30	0	1	1	0	0
0,9..0,95	0	0	3	5	1	0	9	0	0	0	1	0	0	1	1
0,95..1	0	0	6	2	2	1	8	1	21	8	1	0	1	0	0
1..1,05	0	0	2	1	3	0	5	0	0	7	0	0	4	0	0
1,05..1,1	0	0	4	9	4	6	4	0	0	1	3	1	4	1	1
1,1..2	42	39	39	36	44	45	10	49	25	9	48	43	45	47	50
>2	13	16	0	2	1	3	0	5	0	0	2	10	0	6	3

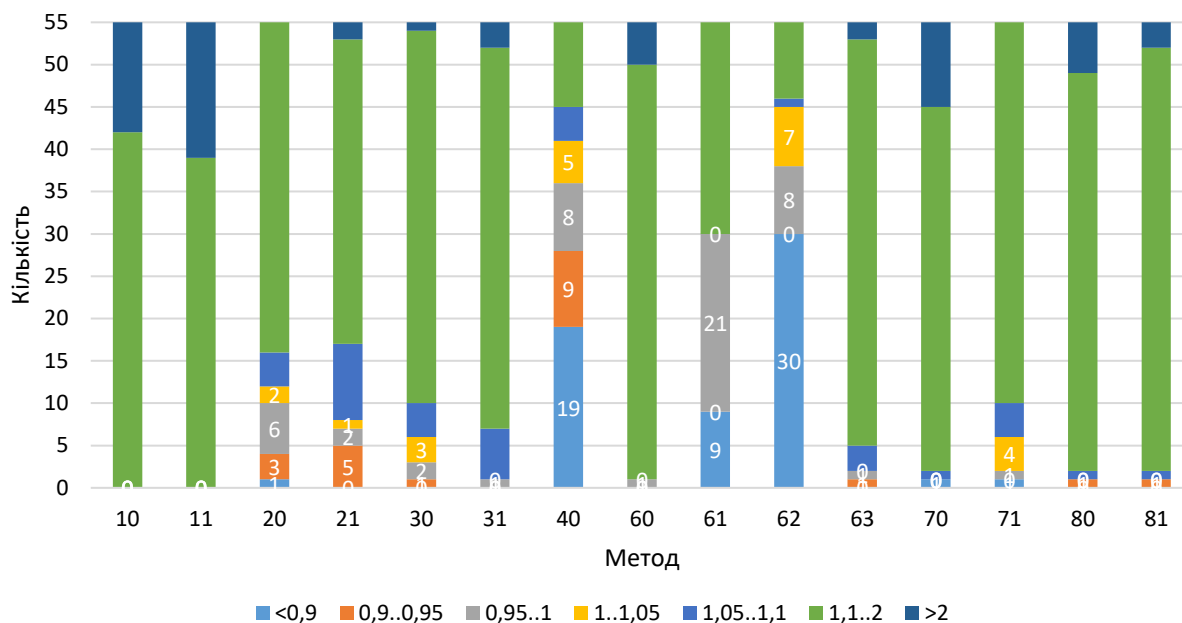


Рисунок 1.35 – Кількісна характеристика забезпечення критерія k усіма методами в різних діапазонах його значення

Слід відзначити, що по результатах аналізу в п. 1.4.5.2 використання методу 80 забезпечило найкращі значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації, але при аналізі здатності методу забезпечити досягнення сталого стану були отримані результати критерію k, які у переважній більшості значень належать до діапазону 1,1 – 2,0.

В той же час використання методів 40 та 62 забезпечило найкращі результати як мінімальних значень похибки, так і критерію стабілізації k.

Для додаткової перевірки цих висновків було проведено обчислення критерію стабілізації k для кривої розгону ОК варіанту 24 з параметрами, визначеними усіма методами. Як можна бачити (рис. 1.36), методи 40 та 62 забезпечують найкращі значення k.

Також для того, щоб додатково охарактеризувати здатність методів забезпечити досягнення сталого стану при моделюванні кривих розгону для варіанта 24 були визначені статичні похибки за час

моделювання, який дорівнює часу експерименту, та за час моделювання, що дорівнює $5 \times T_{об}$.

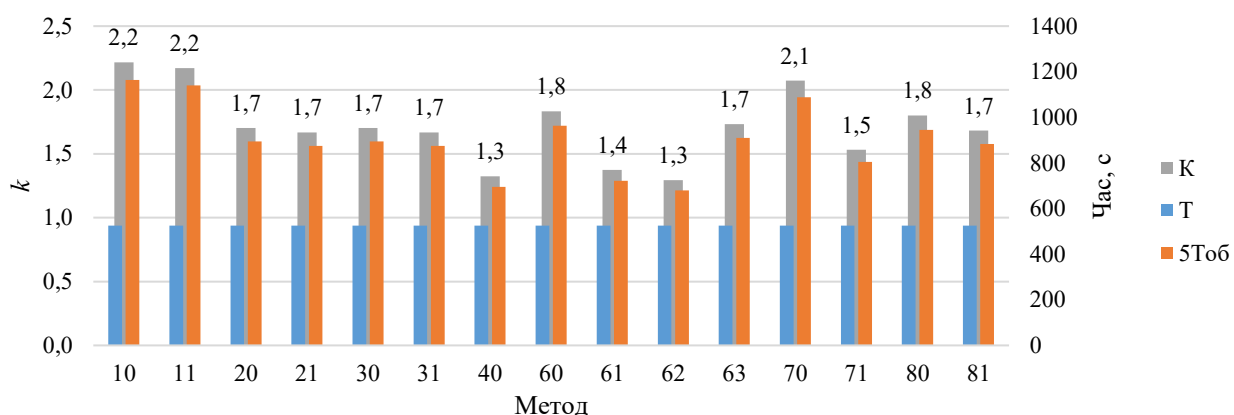


Рисунок 1.36 – Критерій стабілізації k , що забезпечується усіма методами для варіанта 24

Можна бачити з рис. 1.37 використання методів 40 та 62 для варіанта 24 забезпечує достатньо низькі значення відносних статичних похибок, в той час як для методів 70 та 80 наявні суттєві статичні похибки з протилежним знаком, що підтверджує висновки в п. 1.4.5.2.

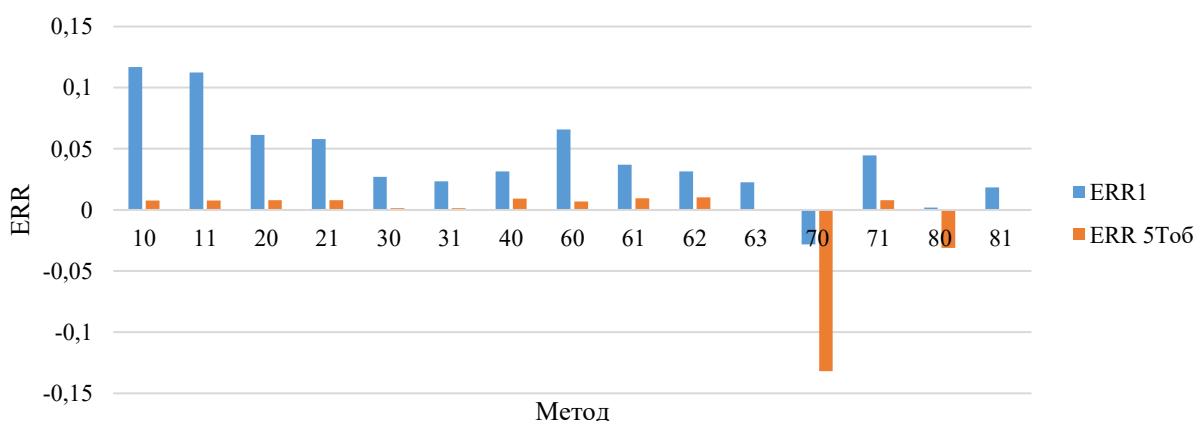


Рисунок 1.37 – Статична похибка для варіанта 24 за час моделювання, що дорівнює: Err – часу експерименту; $Err_{5Toб}$ – $5 \times T_{об}$

Узагальнені результати, що містять середні значення критерію стабілізації k та відносних статичних похибок ERR та ERR5Тоб, які були отриманні при моделюванні усієї вибірки КР на підставі параметрів, визначених усіма методами, наведені у табл. 1.14 та на рис. 1.38, 1.39.

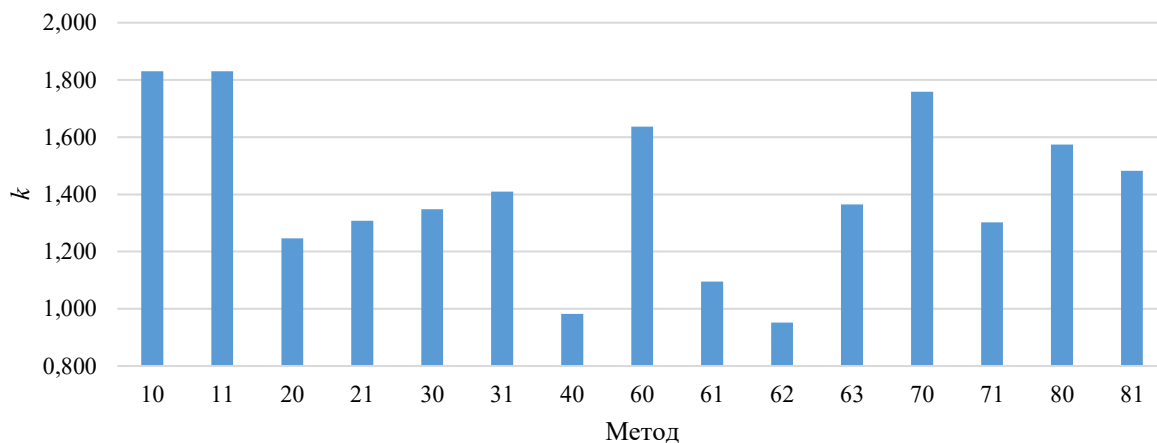


Рисунок 1.38 – Середні значення критерію k , визначені усіма методами для усієї вибірки КР

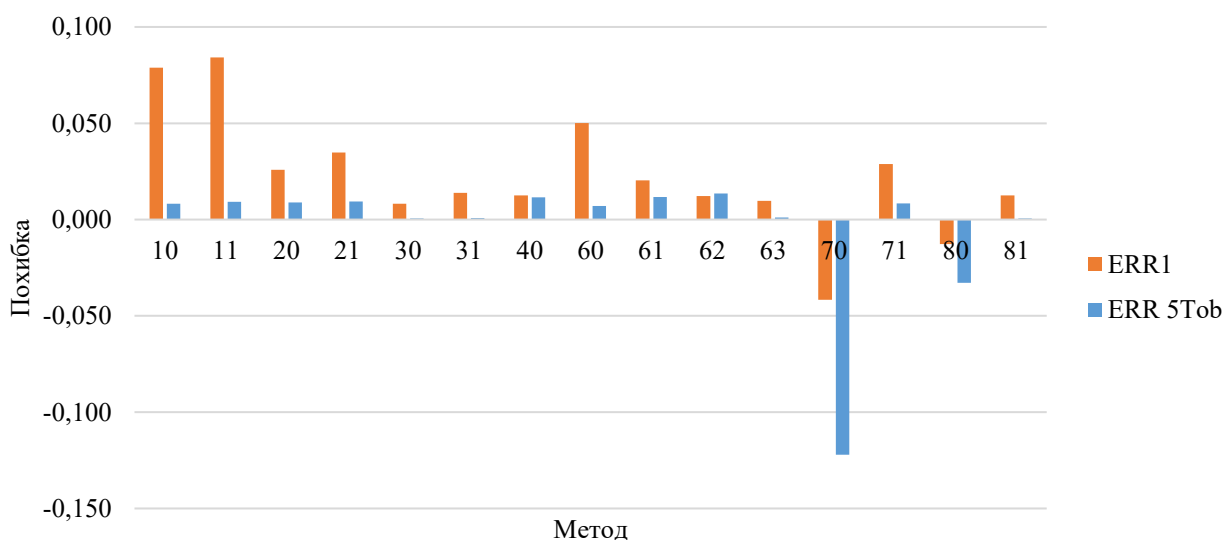


Рисунок 1.39 – Середні значення відносних статичних похибок ERR та ERR5Тоб, визначені усіма методами для усієї вибірки КР

Таблиця 1.14 – Середні значення k , Err та $Err5To6$ для усієї вибірки КР

Парам.	Метод							
№	10	11	20	21	30	31	40	60
k	1,83	1,83	1,24	1,31	1,35	1,41	0,98	1,64
ERR1	0,08	0,08	0,03	0,04	0,008	0,014	0,012	0,050
ERR 5To6	0,008	0,01	0,01	0,01	0,001	0,001	0,012	0,007
Парам.	Метод							
№	61	62	63	70	71	80	81	
k	1,09	0,95	1,37	1,76	1,30	1,57	1,48	
ERR	0,020	0,012	0,01	-0,04	0,029	-0,01	0,01	
R2	0,012	0,014	0,001	-0,122	0,008	-0,033	0,001	

Можна бачити, що наведені результати підтверджують раніше зроблені висновки щодо переважної ефективності використання методів 40 та 62 для ідентифікації ОК. Також підтвердилася недоцільність використання методів, що передбачають апроксимацію рівняннями аперіодичних ланок першого (метод 70) та другого порядку (метод 80), через суттєві залишкові відхилення вихідного параметру ОК.

1.4.8 Вплив тривалості стабілізації параметру в кінці кривої розгону на якість ідентифікації об'єкта керування

Традиційно при проведенні експерименту по «зняттю» кривої розгону вважається, що реакція об'єкта на ступінчатий вплив стабілізується, якщо значення технологічного параметра три рази повторюється. Тому важливо дослідити, які саме характеристики кривої розгону, зокрема її тривалість на етапі стабілізації, мають вирішальне значення для точності ідентифікації.

Візуальна оцінка результатів моделювання реакції об'єкту керування (рис. 1.40, а) показує про необхідність продовження моделювання. Для дослідження цієї проблеми до значень вихідної кривої розгону було додано ряд значень, які дорівнюють останньому. Як видно з графіків (рис. 1.40, б) відбувається значне зменшення статичної похибки ERR2 за результатами моделювання подовження кривої розгону [13].

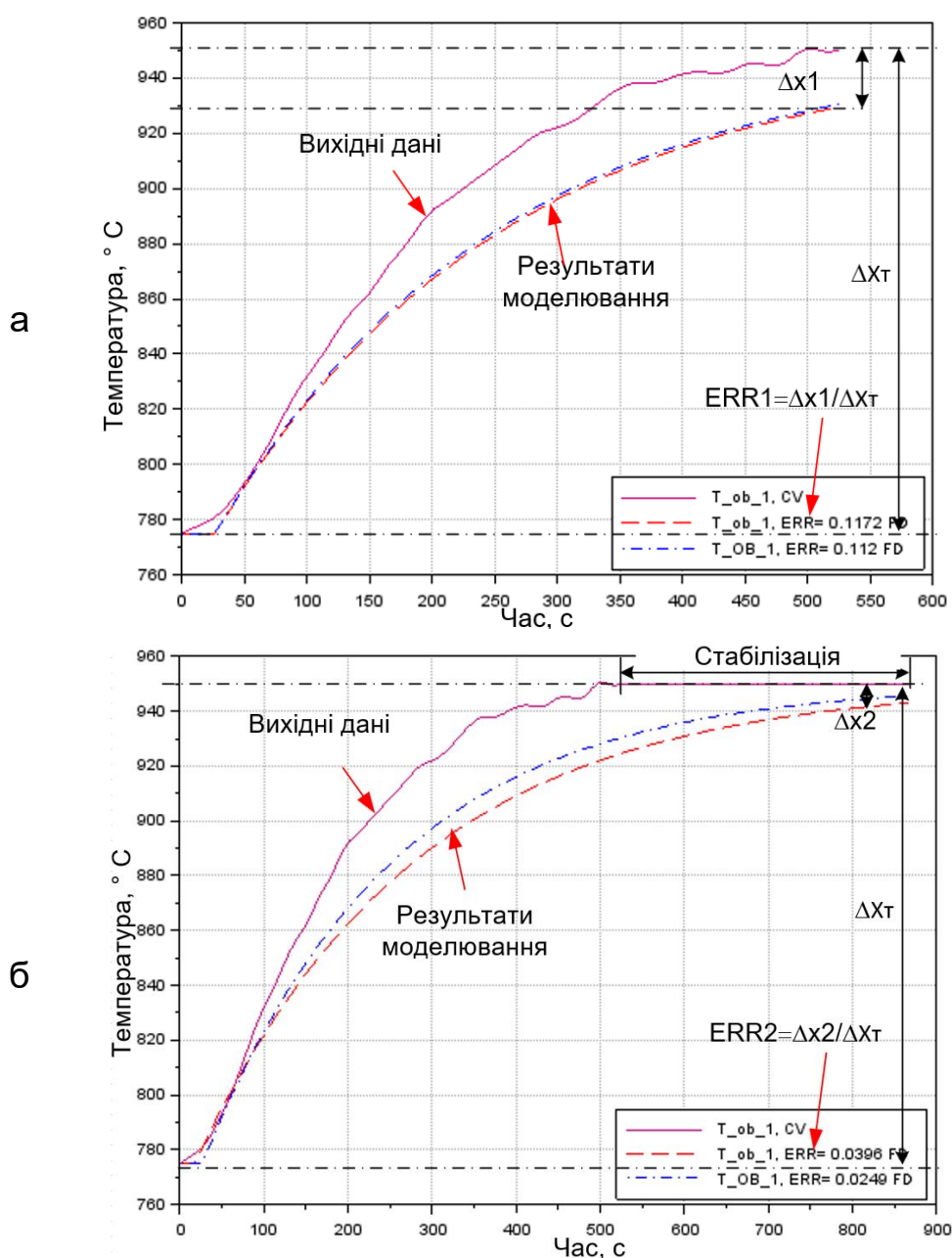


Рисунок 1.40 – Результати моделювання об'єкту керування: а) типового; б) при штучно подовженій вихідній кривій розгону

Такий експеримент було проведено для всієї вибірки кривих розгону дослідження та було ідентифіковано параметри об'єкту керування усіма зазначеними методами. Порівняння отриманих результатів (рис. 1.41) показує, що в середньому по результатам моделювання значення статичної похибки ERR зменшилось на 33% та значення коефіцієнту детермінації R^2 збільшилось на 1,5%. Якщо розглядати кожен метод окремо, то, наприклад вплив подовження кривої розгону на результати моделювання для методу 40 відсутній. З іншого боку наявний суттєвий валив на методи 70, 71, 80 та 81, які базуються на нелінійній апроксимації значень вихідної кривої розгону.

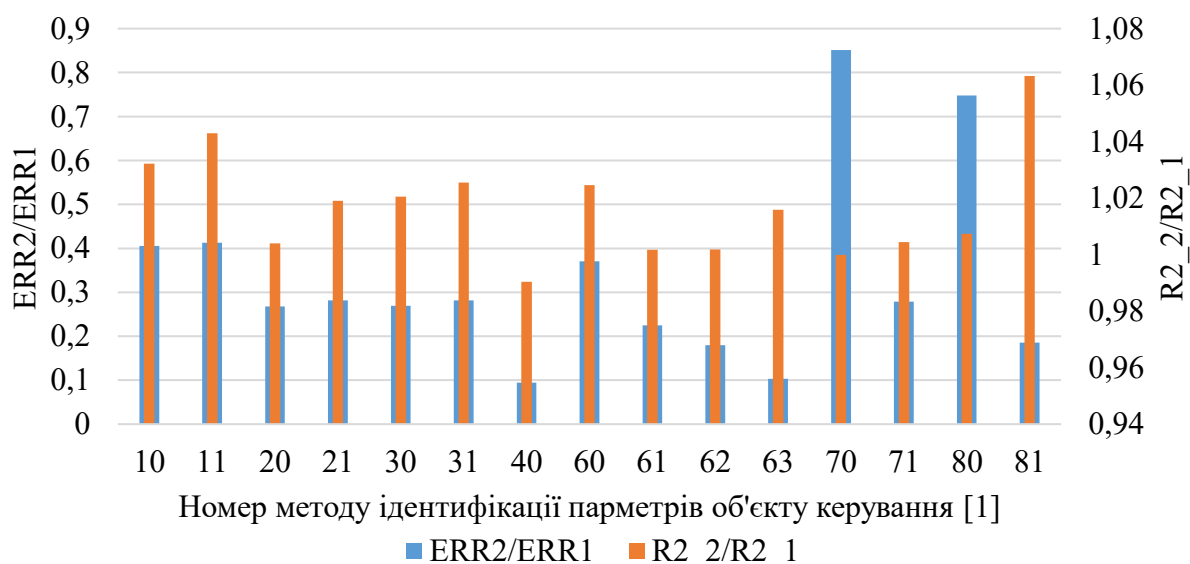


Рисунок 1.41 – Порівняння результатів моделювання

Результати дослідження наявно відображають, що тривалість стабілізації значення параметра при реакції об'єкта керування на ступінчасте збурення впливає на результати ідентифікації параметрів цього об'єкту. Необхідно отримувати більше значень кривої розгону в період стабілізації значення. Наразі складно відповісти, скільки конкретно значень «знімати» при стабілізації параметру: при надмірно короткій реакції об'єкту модель може не відображає інерційність

системи; водночас надто довгий перехідний процес призводить до зростання похибки моделі внаслідок накопичення зайвої інформації. Наприклад, необхідно ввести критерій, за яким значення має коливатись в межах визначеного відсотку від ΔX_t .

1.4.9 Вплив згладжування методом модифікованого рухомого середнього на результати дослідження параметрів об'єкта керування

Коливання значень параметра при реакції об'єкта на ступінчастий вплив при подальшому аналізі можуть суттєво вплинути на параметри налаштування відповідного регулятора. На рис. 1.42 представлено вихідну криву розгону, отриману у виробничих умовах.

Для визначення впливу згладжування авторами обрано метод рухомого (ковзного) середнього (англ. - Simple Moving Average, SMA) - найпростіший в реалізації. Метод було модернізовано – отримані значення прогнозу було зміщено на N-1 значень вліво, де N – період згладжування або кількість значень для обрахунку середнього.

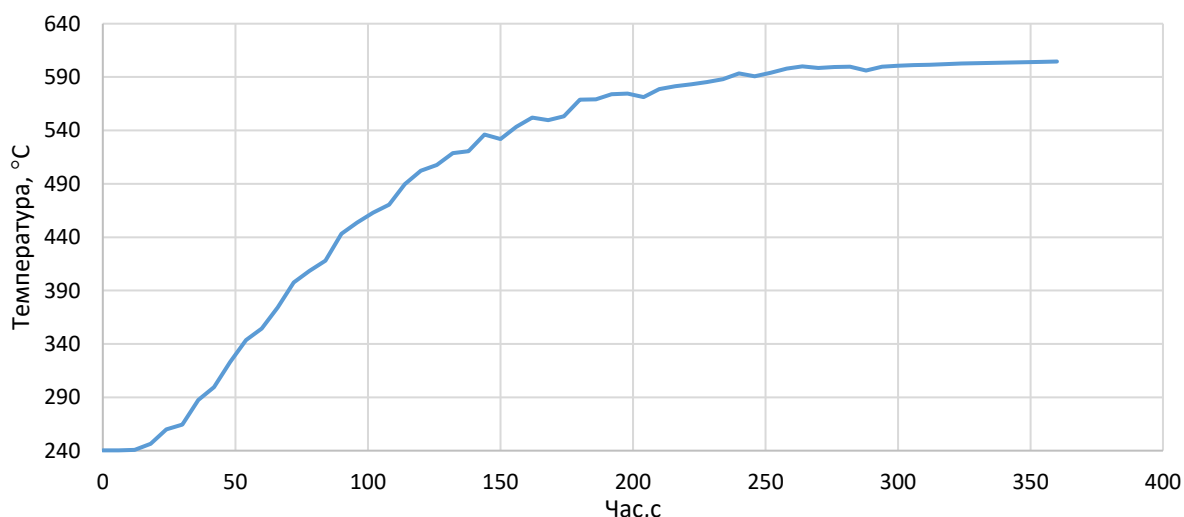


Рисунок 1.42 – Вихідна крива розгону параметру

Було проаналізовано згладжування рухомого середнього з періодами з 3, 5 та 7 значень (рис. 1.43, а).

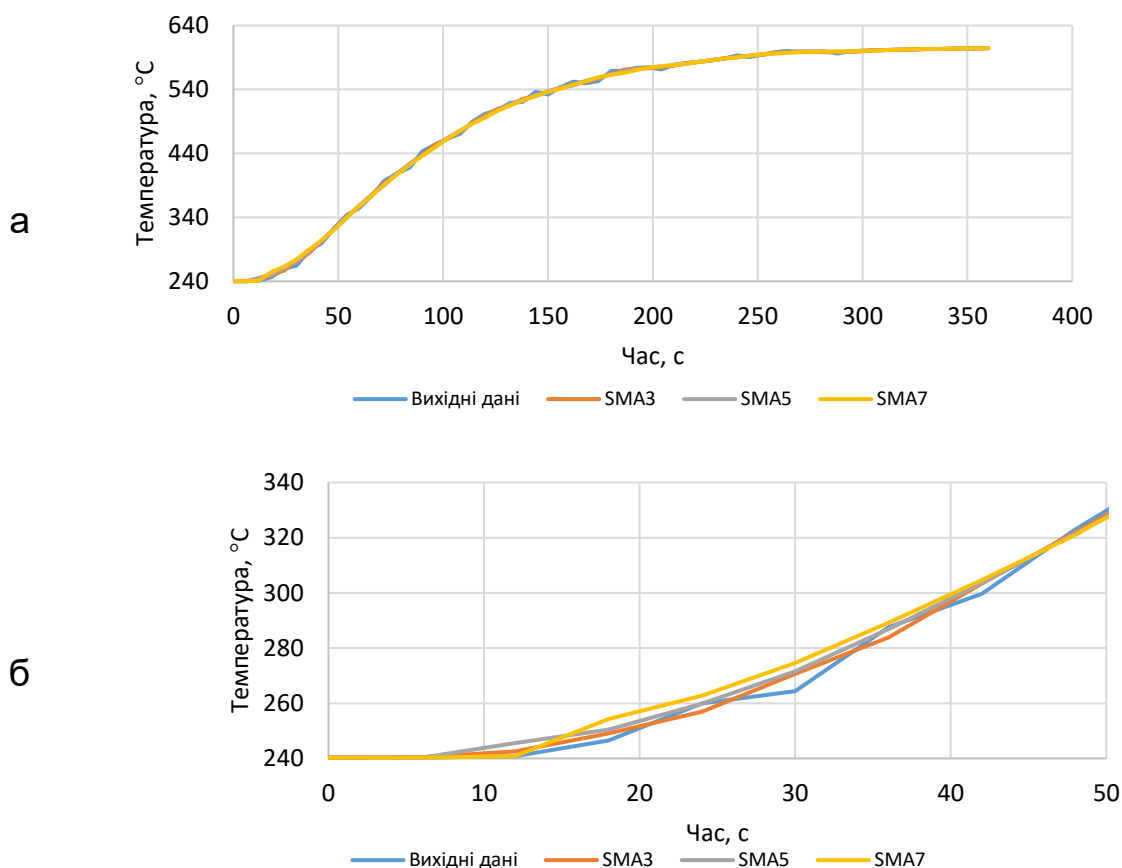


Рисунок 1.43 – Результати згладжування рухомого середнього з періодами з 3, 5 та 7 значень: а – загальний вид, б – деталізація

Слід звернути увагу, що при оцінюванні кожного зі згладжувань коефіцієнт детермінації R^2 дає значення більше 0,99, але підвищення періоду рухомого середнього знижує якість моделювання об'єкта керування після ідентифікації. Детальне вивчення показало (рис. 1.44), що зниження R^2 пов'язано з погіршенням опису частини затримки кривої розгону – збільшення часу затримки (рис. 1.43, б).

Кожна з трьох ліній згладжування забезпечує значення $R^2 > 0,99$, але з'ясувалось, що найкращі результати надає період з 3-х значень рухомого середнього (рис. 1.44).

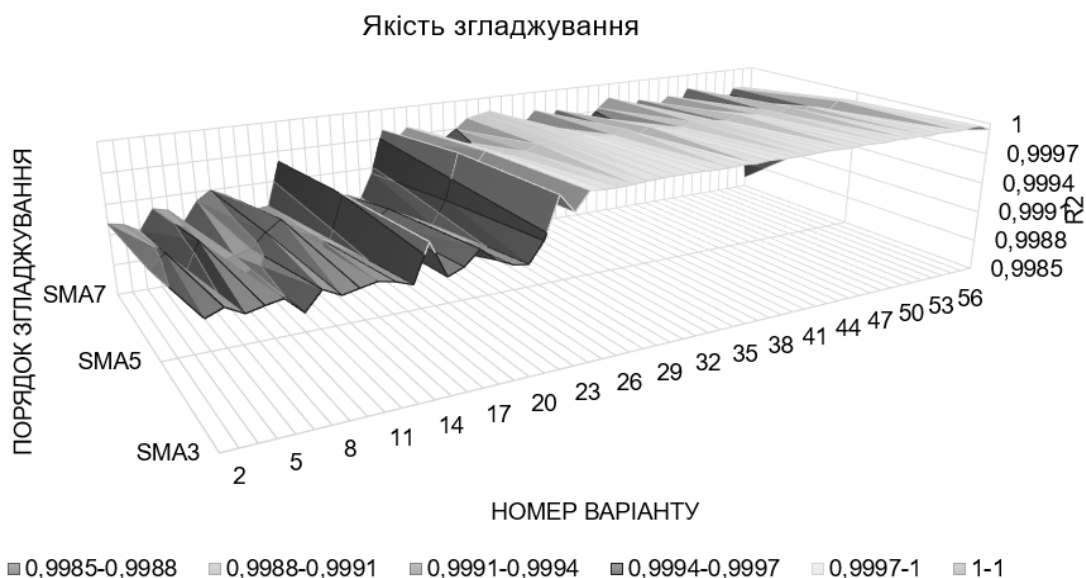


Рисунок 1.44 – Значення R2 при різних періодах рухомого середнього для кожного з варіантів дослідження

В подальшому для автоматичної ідентифікації об'єкта керування було обрано рухоме середнє з періодом у 3 значення для згладжування лінії кривої розгону. Використання запропонованої обробки вихідних даних дозволяє підвищити точність отримання параметрів об'єкта керування зі зменшенням статичної похибки при моделюванні реакції об'єкта керування на ступінчастий вплив. Метою подальших досліджень буде визначення впливу згладжування вихідних даних на налаштування регулятора відповідної системи керування [14].

Теоретичні результати. У результаті теоретичного аналізу розроблено класифікацію методів ідентифікації за принципом роботи та рівнем точності. Запропоновано критерій стабілізації $k = (5 \times T_{об})/T$ для оцінки здатності методів забезпечувати досягнення сталого стану системи. Досліджено вплив тривалості стабілізації параметра в кінці експерименту на точність ідентифікації. Розроблено модифікацію методу рухомого середнього зі зміщенням прогнозованих значень для згладжування кривих розгону.

Практичні результати. Експериментальні дослідження показали, що найвищу ефективність за критеріями точності демонструють методи 40 та 62, які забезпечують мінімальні значення відносної статичної похибки для більш ніж шістдесяти відсотків досліджуваної вибірки та максимальні значення коефіцієнта детермінації для дев'яноста чотирьох відсотків випадків. Ці методи також показали найкращі значення критерію стабілізації системи.

Встановлено, що методи 30, 63, 80, 81, попри високу точність моделювання, є недоцільними для практичного застосування через складність реалізації в промислових контролерах. Виявлено неефективність методу 11, який демонструє найгірші показники точності з діапазоном відносної статичної похибки від 0,0224 до 0,3081 та коефіцієнтом детермінації не більше 0,9275.

Розроблено рекомендації щодо обробки експериментальних даних, які включають застосування рухомого середнього з періодом три значення для згладжування кривих розгону, збільшення тривалості стабілізації параметра в кінці експерименту та виключення методів з ручним визначенням параметрів через вплив людського фактора.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає в проведенні комплексного порівняльного аналізу п'ятнадцяти методів ідентифікації на репрезентативній вибірці п'ятдесяти п'яти кривих розгону промислових об'єктів. Вперше введено критерій стабілізації для оцінки якості методів ідентифікації з точки зору досягнення сталого стану системи. Запропоновано модифікацію методу рухомого середнього зі зміщенням значень для підвищення точності обробки експериментальних даних. Досліджено та кількісно оцінено вплив тривалості стабілізації технологічного параметра на точність ідентифікації об'єктів керування.

Галузь використання. Результати дослідження мають практичне застосування в промисловій автоматизації для налаштування систем

автоматичного регулювання, в металургійній галузі для керування температурним режимом нагрівальних печей, в енергетиці для регулювання витрати енергоносіїв в опалювальних агрегатах, в хімічній промисловості для контролю технологічних параметрів, а також в освітній сфері при викладанні дисциплін з теорії автоматичного керування.

1.5 Висновки

Проведене дослідження дозволило встановити, що методи 40 та 62 є найбільш ефективними для практичного застосування в промислових умовах, забезпечуючи оптимальне співвідношення між точністю ідентифікації та простотою технічної реалізації. Доведено переваги автоматичних методів над ручними способами обробки даних через виключення впливу людського фактора на результати ідентифікації.

Встановлено, що методи, засновані на апроксимації аперіодичними ланками другого порядку, попри високу точність моделювання, є недоцільними для використання в промислових контролерах через значну обчислювальну складність. Експериментально підтверджено критичний вплив тривалості стабілізації технологічного параметра на якість ідентифікації, що вимагає збільшення кількості вимірювань у період досягнення сталого стану. Доведено ефективність застосування модифікованого методу рухомого середнього з періодом три значення для згладжування експериментальних даних та підвищення точності ідентифікації об'єктів керування.

Результати роботи опубліковані [3, 4, 11, 13].

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

Об'єкт дослідження: фізико-математична модель нагріву масивної металевої заготовки пласкої прямокутної форми на кшталт сляба, нагрів якої відбувається з одного боку. Також розглядається спрощена модель яка пов'язує витрати палива з температурою нагріву.

Мета дослідження: створення спрощеної моделі нагріву металевої заготовки. Дослідження закономірностей процесів нагріву по перетину заготовки та загального теплового стану в результаті дії температури нагріву значення якої змінюється у відповідності до типових оптимальних процесів регулювання різного ступеню коливальності. Дослідження впливу типу процесу регулювання на тепловий стан заготовки, швидкість нагріву та витратами палива. Розробка рекомендацій з вибору типу процесу регулювання за формою.

Методика досліджень:

- побудова фізико-математичної моделі нагріву металевої заготовки;
- формування графіків зміни температури нагріву, які відповідають типовим процесам регулювання;
- проведення числових експериментів з нагріву заготовки;
- аналіз графіків зміни температури у різних шарах металу;
- оцінка загального теплового стану заготовки, швидкості нагріву та витрат палива;
- аналіз загальних результатів моделювання.

Спеціальні інструменти та апаратура:

- персональний комп'ютер з процесором Ryzen 5-ї серії, об'єм пам'яті 16 Гб, диск SSD 512 Гб.

Програмне забезпечення:

– загальносистемне програмне забезпечення операційна система Windows 10 64 біт;

– для числового моделювання, обробки результатів моделювання та побудови графічних залежностей використано Microsoft Office Excel.

Теоретичні результати:

1) показано, що по мірі заглиблення у товщу металу коливання температури зменшуються;

2) показано відсутність суттєвого впливу типу процесу регулювання за формою на тепловий стан та швидкість нагріву;

3) показано відсутність суттєвого впливу типу процесу регулювання за формою на витрати палива.

Практичні результати:

1) створено спрощену фізико-математичну модель нагріву металеві заготовки;

2) розроблені рекомендації щодо вибору типового процесу регулювання та налаштувань регулятора для систем автоматизації нагріву металевих заготовок.

Наукова новизна:

1) встановлено, що тип процесу регулювання суттєво не впливає на швидкість нагріву;

2) встановлено, що тип процесу регулювання суттєво не впливає на витрати палива нагріву.

Галузі використання:

– рекомендації щодо вибору типового процесу регулювання та налаштувань регулятора можуть бути використані в АСУТП;

– модель нагріву металеві заготовки може бути використана в навчальному процесі для дослідження процесів регулювання.

2.1 Постановка задачі

В залежності від параметрів нагрівального пристрою як об'єкту керування, від його конструктивних особливостей, від параметрів налаштування регулятора буде залежати як відбувається процес нагріву, як змінюється температура у нагрівальному пристрої у часі, скільки часу потрібно на нагрів.

Процес нагріву пов'язаний з витратами палива, яке є важливою складовою собівартості металу. Очевидно, що витрати палива пов'язані з тим як відбувається нагрів. В свою чергу факторами які впливають на те як змінюється температура у нагрівальному пристрої у часі є налаштування регулятора. Вірогідно від типу процесу регулювання за формою та налаштувань регулятора можуть залежати витрати палива. Тому представляє інтерес дослідити як між собою пов'язані ці складові. Це може дозволити дати рекомендації по налаштуванню регуляторів, які б дозволили економити паливо.

Так як в силу об'єктивних і суб'єктивних причин зараз неможливо провести дослідження на реальному об'єкті, то необхідно побудувати спрощену модель, на якій провести числові експерименти. Необхідно з'ясувати:

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?

2.2 Побудова фізико-математичної моделі нагріву металевої заготовки

Сучасні знання у галузі теплофізики дають нам теоретичний опис і математичний апарат для побудови моделі [15, 16]. На першому етапі розглянемо одновимірну модель у вигляді прямокутного стрижня з одного кінця якого відбувається дія температури (рисунок 2.1). Стрижень розіб'ємо на елементарні об'єми $i = 1 \dots n$. На перший елемент діє зовнішня температура T_0 . В часі вона буде змінюватись відповідно до форми процесу регулювання. Далі тепло буде розповсюджуватися уздовж стрижня. Кожний елемент має температуру T_i та енергію Q_i . Зовнішній теплообмін крім передньої грані першого елемента відсутній.

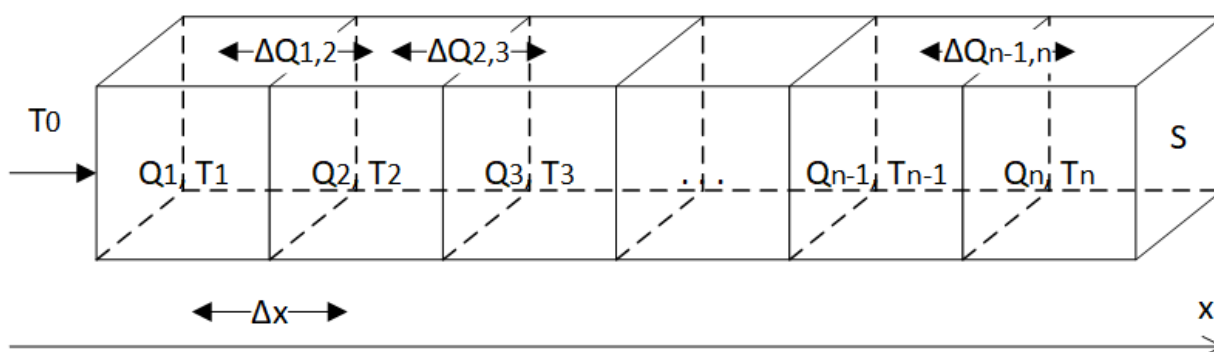


Рисунок 2.1 – Одновимірна модель у вигляді стрижню

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

$$\Delta Q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} S \Delta \tau \quad (2.1)$$

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 T_0 , яка буде змінюватись за відповідною формою. Отримаємо залежності 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 (рисунок 2.2). Теплообмін буде відбуватися одночасно через усі шість граней за рівняннями аналогічними (2.1).

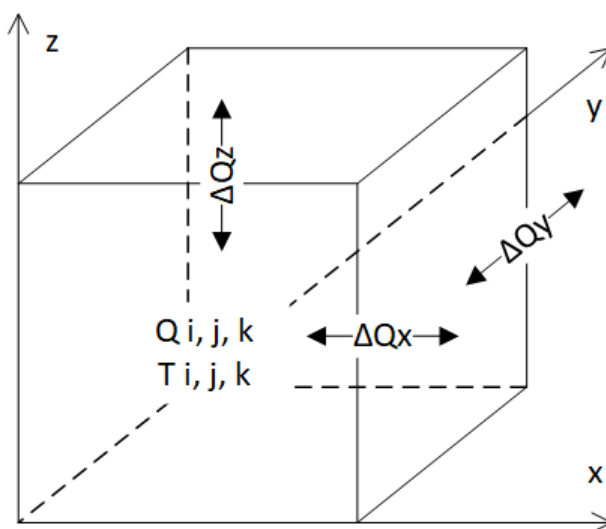


Рисунок 2.2 – Тримірна модель

Для проведення досліджень була побудована одномірна модель в середовищі Excel, на якій проводились чисельні експерименти. У якості стрижня використовувався сталевий стрижень з наступними характеристиками:

- довжина L 0,1 м;
- перетин $0,004 \times 0,004$ м;

- крок уздовж стрижня Δx 0,004 м;
- теплопровідність k 50 Вт/кг · К;
- щільність ρ 7800 кг/м³;
- питома теплоємність c 500 Дж/кг · К;
- температуропровідність розраховуємо за формулою:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} = \frac{50}{7800 \cdot 500} = 1.28 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.2)$$

Моделювання проводилося за наступних умов:

- 1) початкова температура 0 °С;
- 2) задана температура 500 °С;
- 3) крок часу $\Delta \tau$ приймаємо 0,5 с, що відповідає умовам стабільності [15]:

$$\Delta \tau \leq \frac{(\Delta x)^2}{2\alpha} = \frac{0,004^2}{2 \cdot 1.28 \cdot 10^{-5}} = 0,624 \text{ с} \quad (2.3)$$

Фрагмент таблиці розрахункової моделі показано на рисунку 2.3.

Час, с	T_0	Шар 1	Шар 2	Шар 3	Шар 4	Шар 5	Шар 6	Шар 7
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	2,720	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	29,878	1,090	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,5	56,969	12,187	0,437	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,0	83,991	25,421	4,969	0,175	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5	110,947	40,693	11,242	2,026	0,070	0,000	0,000	0,000
3,0	137,836	57,040	19,349	4,935	0,825	0,028	0,000	0,000
3,5	164,660	74,310	28,675	9,063	2,152	0,336	0,011	0,000

Рисунок 2.3 – Фрагмент розрахункової таблиці розрахункової моделі

Розрахунок температури для окремого шару відбувається за виразом, який отримуємо після перетворення формули (2.2) до форми з кінцевими різницями:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{\alpha \Delta \tau}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j) \quad (2.4)$$

де: j – моменту часу моделювання;

i – номер шару матеріалу.

2.3 Формування графіків зміни температури у відповідності до типових процесів регулювання

Процеси регулювання 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 процеси регулювання 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 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.

При дослідженні нашої моделі ми будемо розглядати процеси регулювання за завданням. Форма вхідного впливу прямокутна сходишка. Відповідно до теорії амплітуда вхідного впливу ніяк не впливає на форму процесу регулювання. Вона впливає тільки на розмах по вертикалі.

Від параметрів об'єкта керування також залежить форма процесу регулювання. Але об'єкт керування є пасивною складовою. Тому будемо вважати, що параметри об'єкта керування є постійними і не впливають на процес регулювання.

Таким чином форма і час процесу регулювання залежать від налаштувань регулятора. Для їх визначення та побудови процесу регулювання відповідної форми було розроблено окрему математичну модель, детальний розгляд якої виходить за межі теми дослідження. Загалом було виконано наступні дії:

- об'єкт керування було представлено у вигляді типового статичного об'єкту керування;
- параметри об'єкту керування були вибрані подібними до нашого стрижню;
- у якості регулятора було вибрано ПІД-регулятор;
- методами теорії автоматичного керування було розраховано необхідні налаштування, та змодельовані процеси регулювання з графіками зміни регульованої величини відповідної форми. Вони були масштабовані, та використані у якості температури T_0 .

За своєю формою процеси регулювання можуть бути аперіодичні, гранично-аперіодичні, помірно коливальні, суттєво коливальні,

незагасаючі та нестійкі. Дослідниками та практиками для практичного використання рекомендуються процеси від гранично- аперіодичного до помірно коливального з 40% перерегулюванням. Звичайні аперіодичні процеси вважаються більш повільними і менш точними. Суттєво коливальні процеси є дуже повільними та неточними. Незагасаючі та нестійкі процеси взагалі призводять до непрацездатності системи автоматичного регулювання. Виділяють три стандартних рекомендованих типи процесів. Гранично-аперіодичний вважається найбільш швидким. Він має коефіцієнт перерегулювання на рівні 4,32%. Процес з 40% перерегулюванням вважається найбільш точним. Такий процес має коефіцієнт перерегулювання на рівні 42,5%. Проміжне положення займає процес з 20% перерегулюванням. Він відповідно має збалансоване співвідношення між швидкодією та точністю.

Для досліджень було сформовано три графіки для температури T_0 , які відповідають описаним вище типовим процесам регулювання. Вони показані далі на рисунках 2.4, 2.6, 2.8.

2.4 Дослідження зміни температури по перетину металевієї заготовки

Для гранично аперіодичного процесу регулювання графік температури T_0 (і відповідно графік керуючого впливу і витрат палива) показано на рисунку 2.4. На рисунку 2.5 показано як змінюється температура за окремими шарами стрижню. Усі графіки мають аперіодичну форму, та у різному ступені схожі на графік експоненти.

Для процесу регулювання з 20% перерегулюванням графік температури T_0 показано на рисунку 2.6. На рисунку 2.7 показано як змінюється температура за окремими шарами стрижню. Тут ми бачимо що у зовнішніх шарах є коливання температури, а глибше вони зникають.

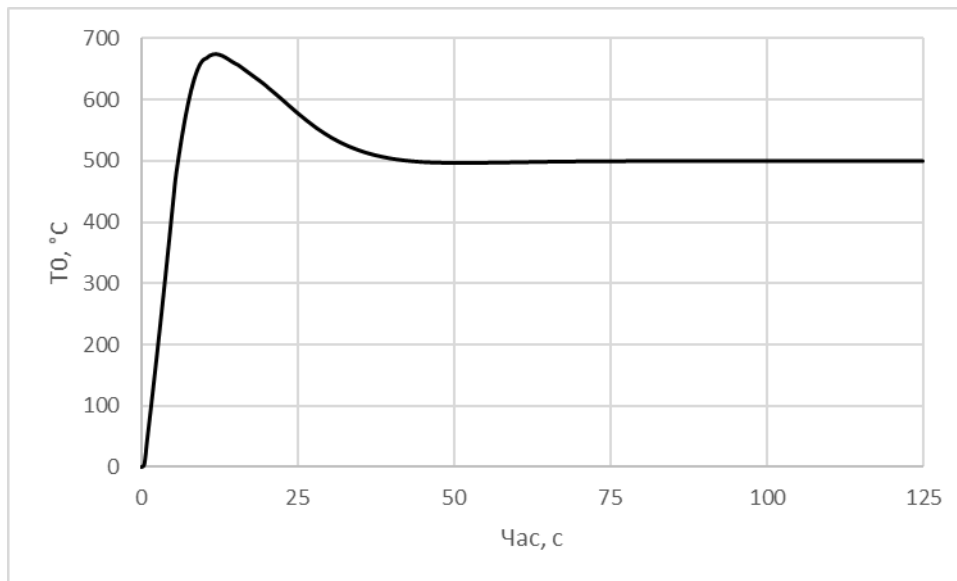


Рисунок 2.4 – Гранично-аперіодичний графік зміни температури нагріву

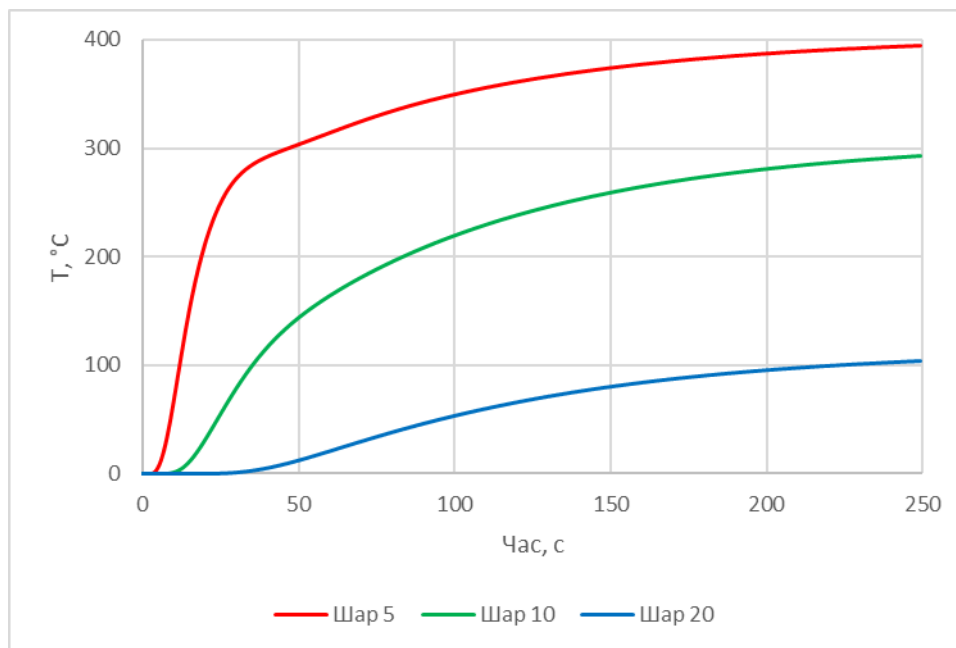


Рисунок 2.5 – Графіки зміни температури за шарами стрижня

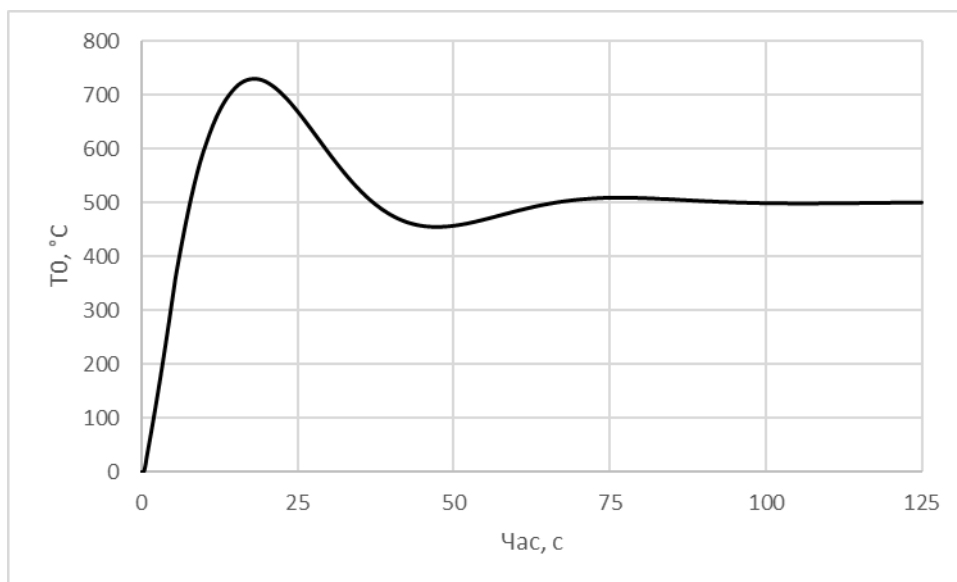


Рисунок 2.6 – Графік зміни температури нагріву з 20% перерегулюванням

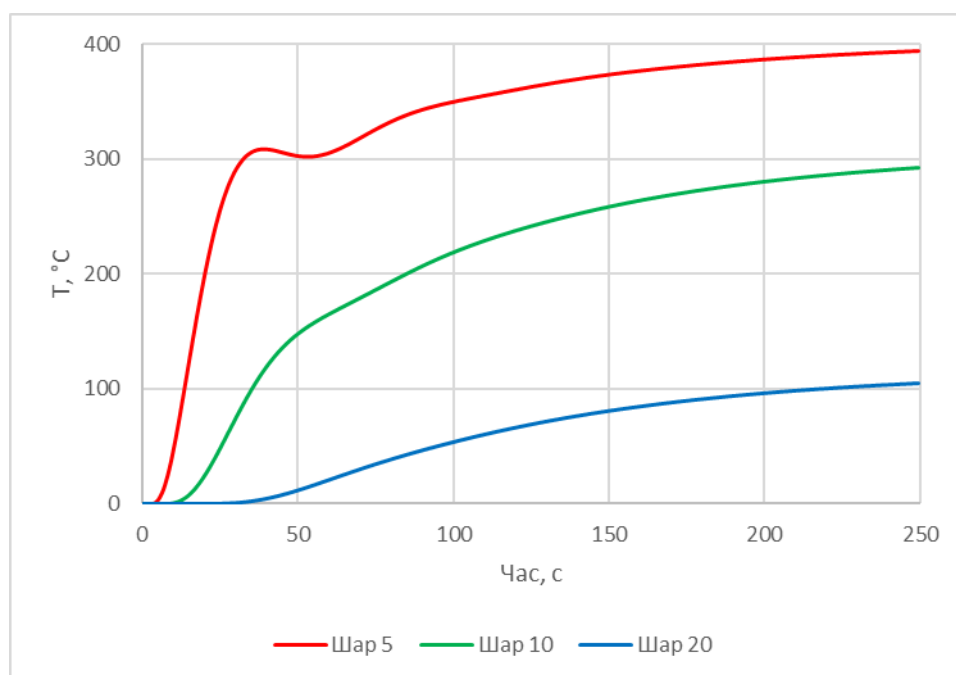


Рисунок 2.7 – Графіки зміни температури за шарами стрижня

Для процесу регулювання з 40% перерегулюванням графік температури T_0 показано на рисунку 2.8. На рисунку 2.9 показано як

змінюється температура за окремими шарами стрижню. Тут ми бачимо що коливання проникають глибше.

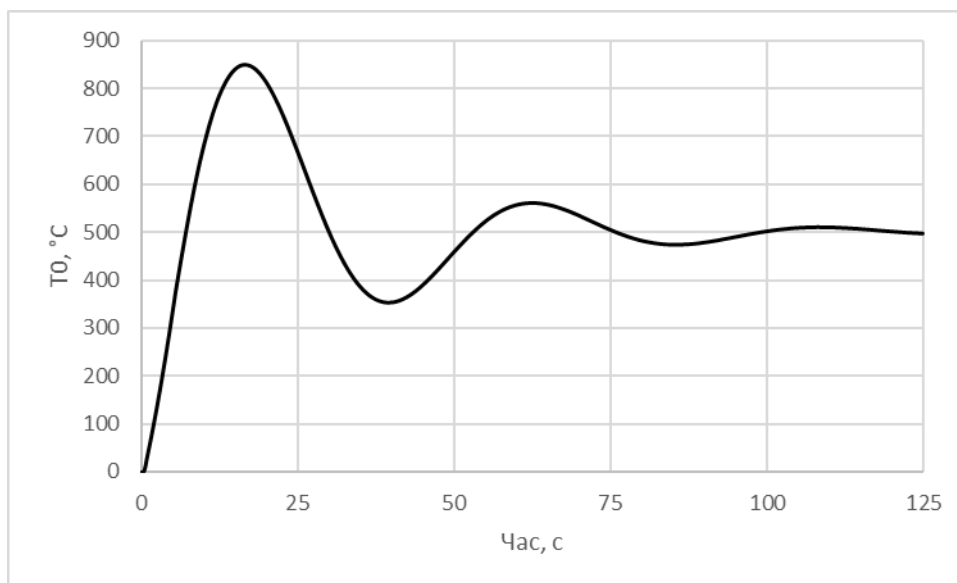


Рисунок 2.8 – Графік зміни температури нагріву з 40% перерегулюванням

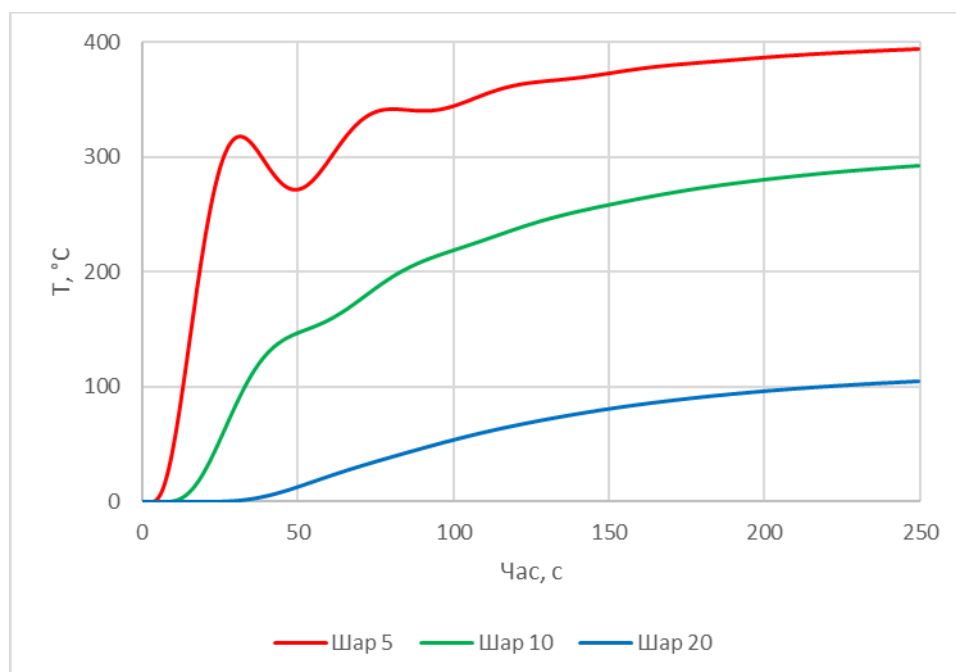


Рисунок 2.9 – Графіки зміни температури за шарами стрижня

Також були розглянуті два процеси, які виходять за межі типових. Для суто аперіодичного перехідного процесу графік температури T_0 показано на рисунку 2.10. На рисунку 2.11 показано як змінюється температура за окремими шарами стрижня. На перший погляд вони мало відрізняються від графіків 2.5.

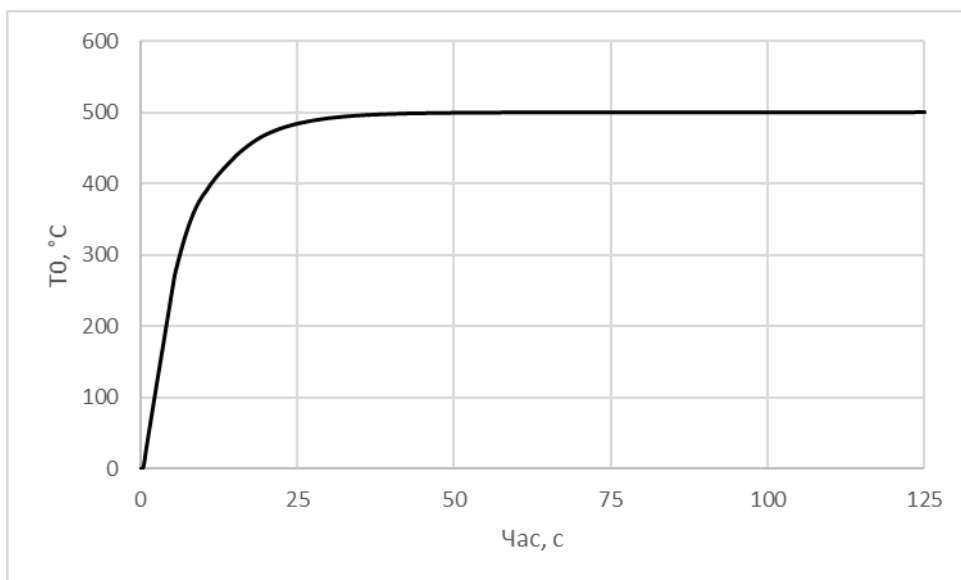


Рисунок 2.10 – Аперіодичний графік зміни температури нагріву

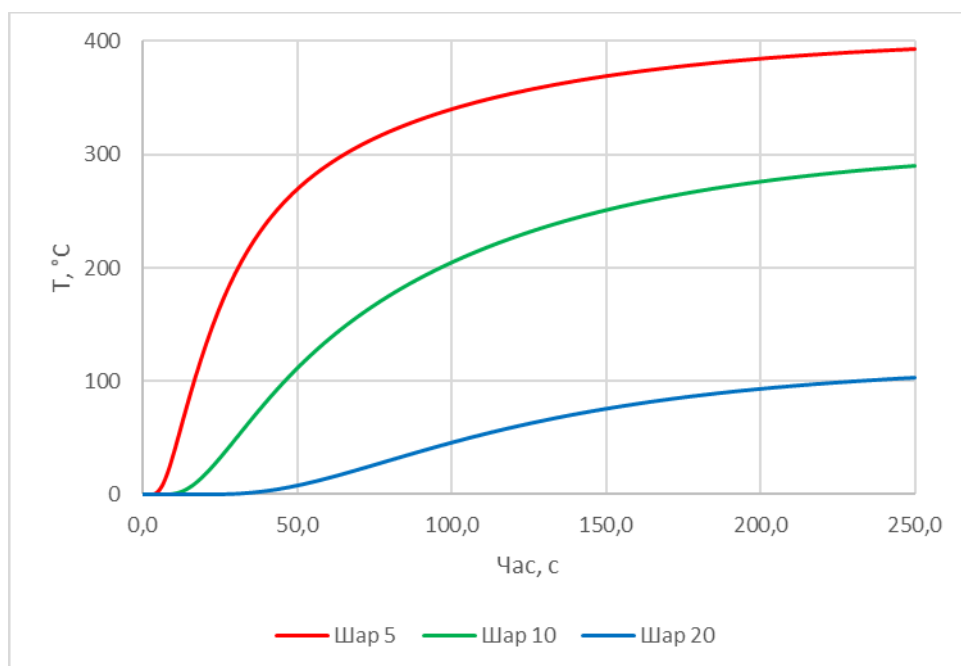


Рисунок 2.11 – Графіки зміни температури за шарами стрижня

Для перехідного процесу з 70% перерегулюванням графік температури T_0 показано на рисунку 2.12. Це значно перевищує рекомендований максимальний коефіцієнт перерегулювання. На рисунку 2.13 показано як змінюється температура за окремими шарами стрижню. Коливання проникають до глибинних шарів.

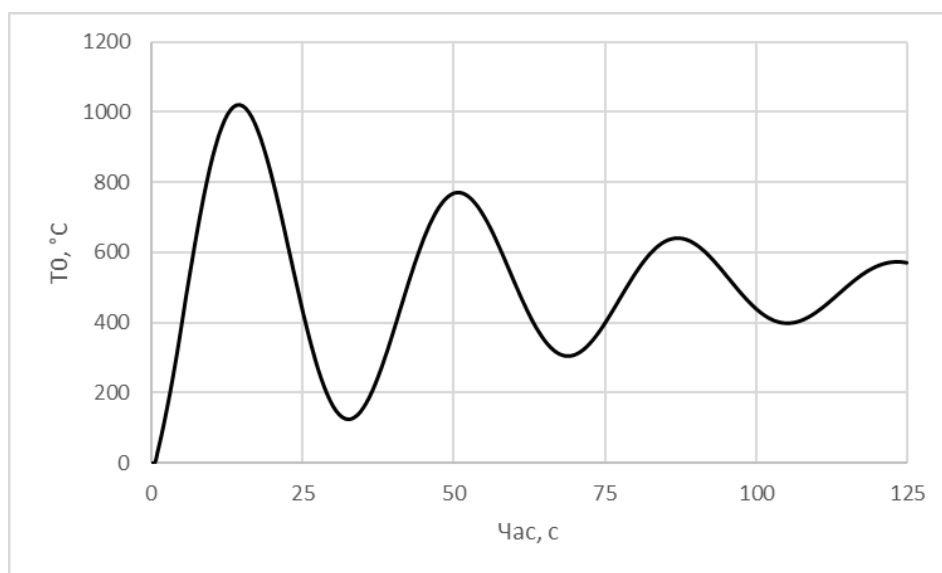


Рисунок 2.12 – Графік зміни температури нагріву з 70% перерегулюванням

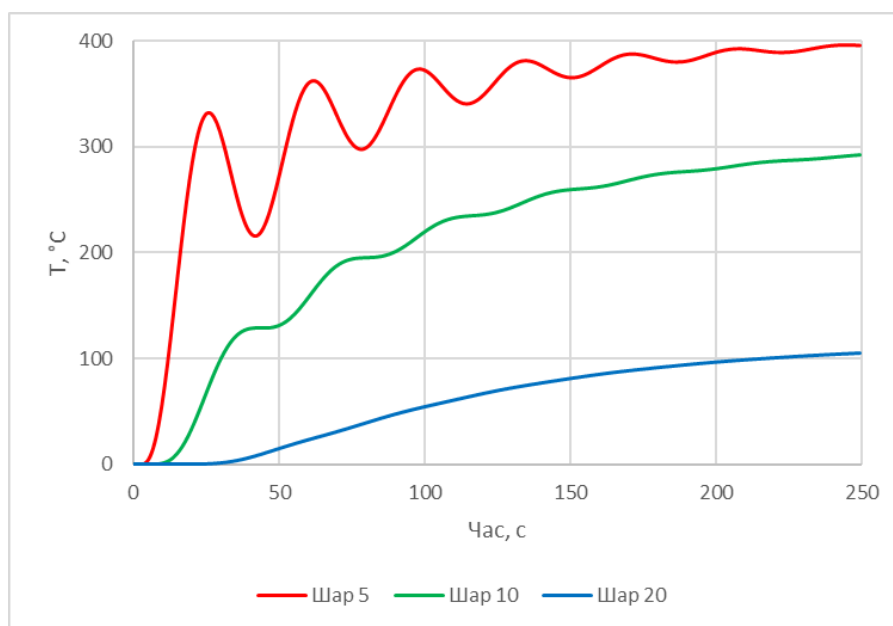


Рисунок 2.13 – Графіки зміни температури за шарами стрижня

За результатами аналізу графіків 2.5, 2.7, 2.9, 2.11, 2.13 можна зробити висновок, що по мірі проникнення в глибину коливання придушуються і у глибинних шарах температура зростає монотонно. У той же час, якщо припинити нагрів під час коливань, то можна отримати різну температуру зовнішніх шарів у залежності від моменту припинення.

2.5 Дослідження впливу типу процесу регулювання на швидкість нагріву

Порівнюємо як відбувається нагрів у однойменних шарах при різних формах графіку температури нагріву. На рисунку 2.14 поєднані графіки для порівняння зовнішнього 5-го шару.

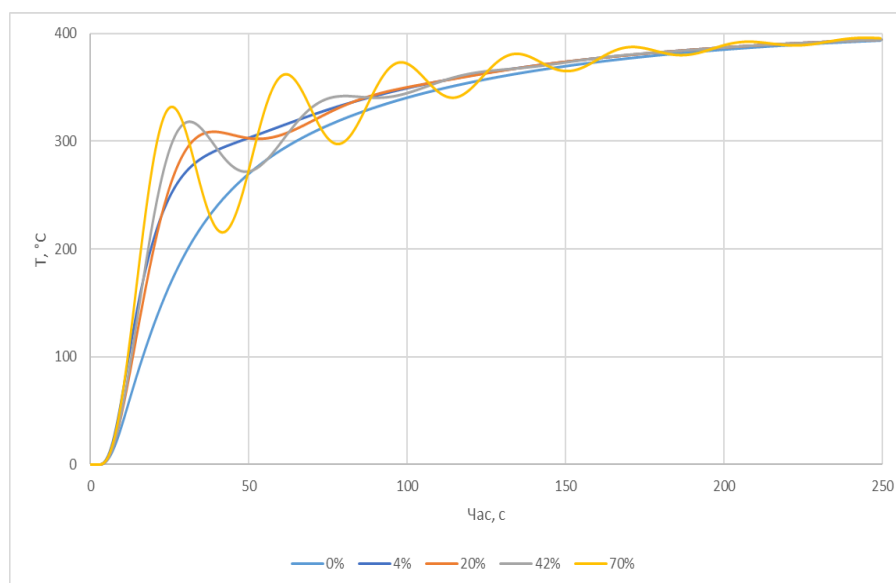


Рисунок 2.14 – Графіки температури зовнішнього шару для різних перехідних процесів

Температура за перехідними процесами від гранично-аперіодичного і до 70% перерегулювання змінюється згуртовано. Графіки відрізняються коливальністю і амплітудами відхилення від

усередненого значення. Температура для суто аперіодичного процесу помітно відстає від інших і досягає їх тільки при подальшій витримці.

На рисунку 2.15 поєднані графіки для середнього 10-го шару.

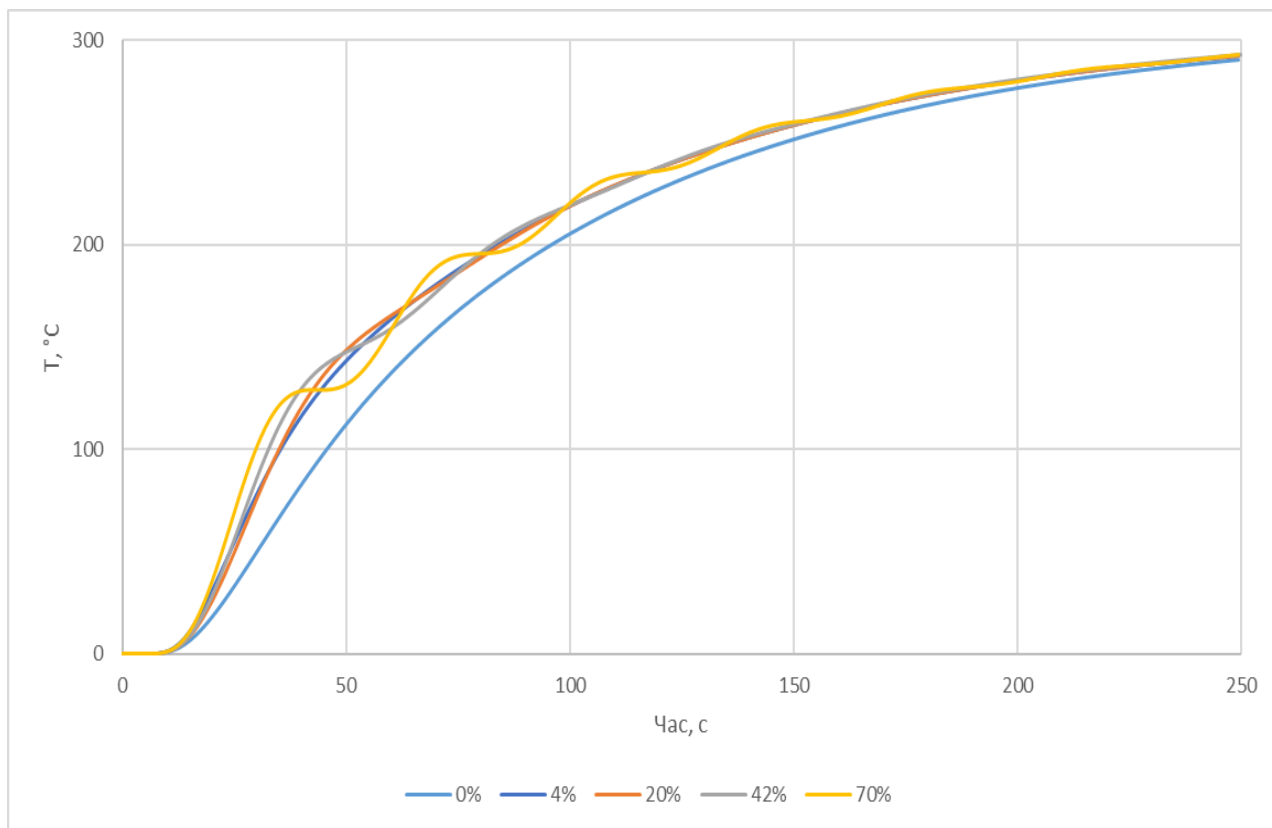


Рисунок 2.15 – Графіки температури середнього шару для різних перехідних процесів

Загалом ми бачимо ту саму картину. Графіки окрім суто аперіодичного згуртувались ще ближче. Графік для суто аперіодичного процесу так само суттєво відстає.

Нарешті на рисунку 2.16 поєднані графіки для порівняння внутрішнього 20-го шару.

Графіки окрім суто аперіодичного майже злились в один. Графік для суто аперіодичного процесу так само суттєво відстає.

Таким чином ми можемо зробити загальний висновок, що за винятком зовнішніх шарів у середніх і глибоких шарах нагрів відбувається незалежно від коливань температури нагріву.

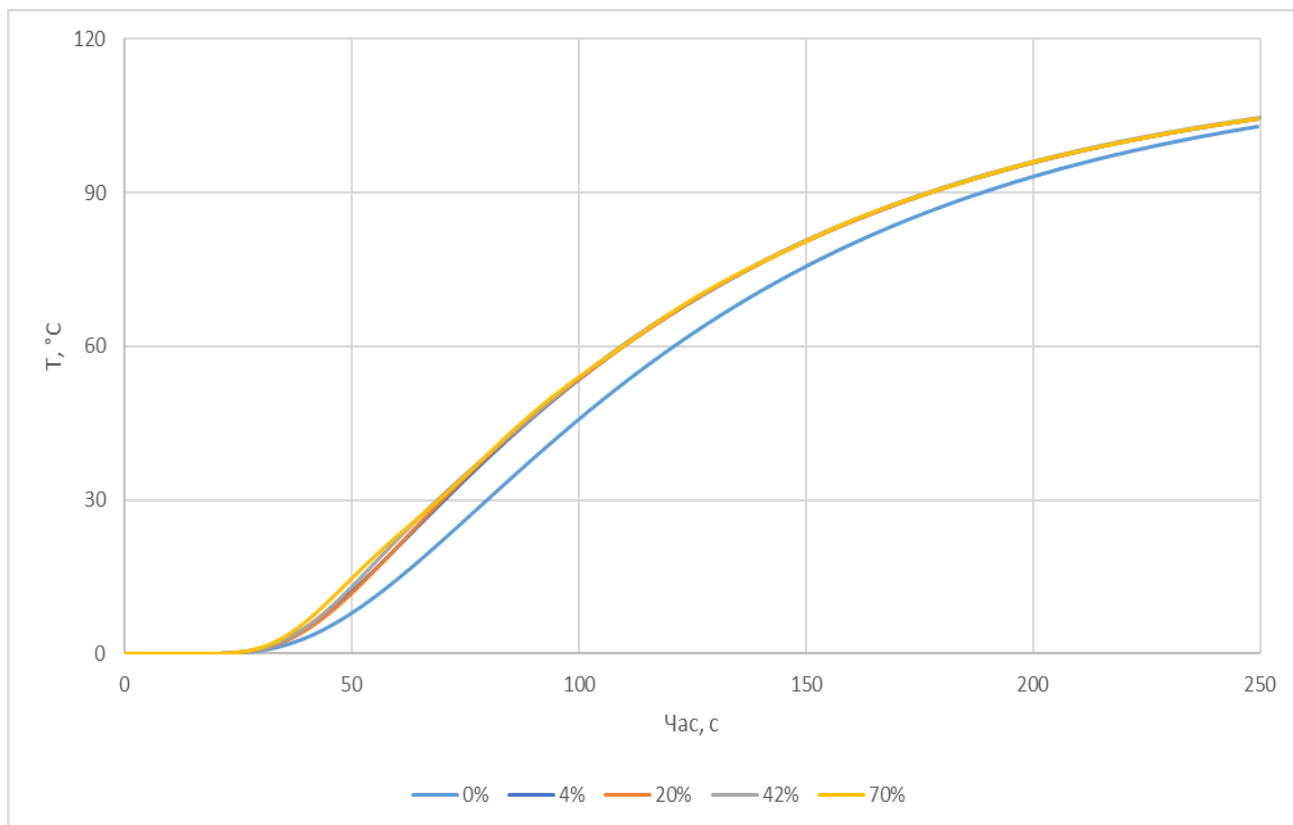


Рисунок 2.16 – Графіки температури внутрішнього шару для різних перехідних процесів

2.6 Дослідження впливу типу процесу регулювання на тепловий стан та витрати палива

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 процесу регулювання буде залежати кількість палива і його вартість. В свою

чергу вартість цих енергоресурсів є складовою собівартості металу і буде впливати на прибуток.

Отримати повну аналітичну залежність між керуючим впливом, витратами палива і температурою нагріву досить складно, тому що тут задіяні різні складні фізичні і хімічні процеси. Це рух і перемішування палива і повітря, процес горіння (окислення), передача енергії за рахунок всіх способів теплопередачі, нагрів суцільної металевої заготовки, евакуація продуктів згоряння. Але безсумнівно більший керуючий вплив призводить до більших витрат палива і до отримання більшої температури. Тобто має місце якась пропорційна залежність. Але вона буде мати відповідну нелінійність, так як обмеженням є теоретична температура горіння.

Будемо вважати, що в якомусь обмеженому діапазоні кількість палива приблизно пропорційна керуючому впливу і температурі, яка впливає на нагрів металевої заготовки. Представляє інтерес дослідити як форма перехідних процесів регулювання впливає на загальний нагрів металевої заготовки і витрати палива для цього. Це дасть можливість отримати відповіді на ряд поставлених раніше питань.

Для оцінки загального теплового стану (кількості накопиченої енергії) стрижню було розраховано середню температуру за всіма шарами стрижню для окремих моментів часу. Результати розрахунків наведено у таблиці 2.1. Температура розрахована для усіх типів процесів регулювання і для окремих моментів часу, кількість накопиченої енергії пропорційна середній температурі.

З таблиці 2.1 ми бачимо що на початковому відрізку часу, є коливання середньої температури, які можуть бути пояснені коливаннями температури зовнішніх шарів у вибрані для оцінки моменти часу. На заключній ділянці часу ми маємо однакову температуру. Трохи відрізняється температура для суто аперіодичного процесу.

Таблиця 2.1 – Середня температура стрижню

Коефіцієнт перерегулювання	Час, с				
	50	100	150	200	250
0%	121,04	178,40	210,13	227,80	237,64
4%	138,54	187,63	215,29	230,68	239,25
20%	137,11	187,76	215,28	230,66	239,24
40%	129,36	186,60	215,23	230,69	239,26
70%	144,44	191,56	212,17	231,96	239,10

Кількість палива в умовних числах пропорційна температурі T_0 , як ми прийняли раніше. В таблиці 2.2 наведені умовні числа витрат палива з початку і до відповідного моменту часу для різних процесів регулювання.

Таблиця 2.2 – Витрати палива в умовних числах

Коефіцієнт перерегулювання	Час, с				
	50	100	150	200	250
0%	42833	92797	142784	192778	242776
4%	52962	102884	152884	202884	252884
20%	53310	102925	152882	202880	252880
40%	52220	103141	153326	203353	253355
70%	52940	104960	153330	203936	253856

З таблиці 2.2 ми бачимо, що так само на заключній ділянці процесу витрати палива в умовних числах приблизно однакові за винятком суто аперіодичного процесу, для якого нагрів відбувається з відставанням.

В таблиці 2.3 розраховані питомі витрати палива в умовних числах на один градус середньої температури. Як і можна очікувати, на заключній ділянці процесу вони також порівняно однакові.

Таблиця 2.3 – Питомі витрати палива в умовних числах на один градус середньої температури

Коефіцієнт перерегулювання	Час, с				
	50	100	150	200	250
0%	14,16	20,81	27,18	33,85	40,86
4%	15,29	21,93	28,41	35,18	42,28
20%	15,55	21,93	28,41	35,18	42,28
40%	16,15	22,11	28,50	35,26	42,36
70%	14,66	21,92	28,91	35,17	42,47

Таким чином ми бачимо відсутність суттєвого впливу форми процесу регулювання на витрати палива.

2.7 Дослідження тримірної моделі нагріву

При розгляді тримірної моделі було зроблено висновок, що при нагріві плоских заготовок за формою сляба, основна частина матеріалу нагрівається паралельно і процеси відбуваються однаково у сусідніх умовних стрижнях (рисунок 2.17) так само як в одномірній моделі. Відмінність буде мати місце тільки на краях заготовки.

Оскільки для одномірної моделі не були отримані цікаві і корисні результати, то далі цей напрямок не розглядався.

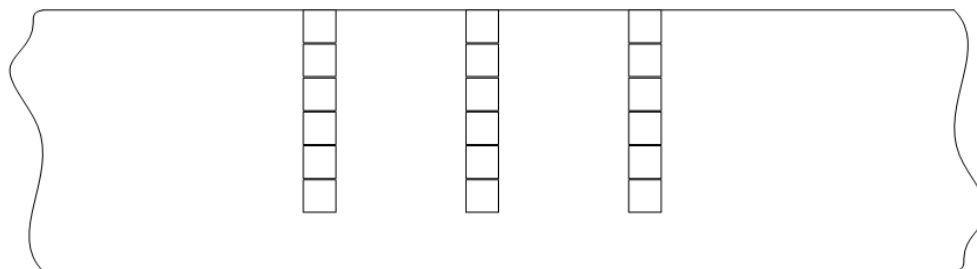


Рисунок 2.17 – Паралельні стрижні нагріву у суцільній плоскій заготовці

2.8 Висновки

В результаті моделювання процесів нагріву за різними формами графіків ми отримали наведені вище результати і можемо зробити наступні висновки:

1. Форма процесу майже не впливає швидкість нагріву і питомі витрати палива.
2. Виключення складає суто аперіодичний процес при якому процес нагріву є повільнішим.
3. При використанні процесу з великою коливальністю при завершенні процесу нагріву можемо отримати відхилення температури зовнішніх шарів від потрібної.
4. Можна рекомендувати використовувати гранично аперіодичний процес, який забезпечує більш плавний процес нагріву. При цьому обладнання буде працювати у більш щадному режимі і буде мати менший знос.
5. При цьому треба уникати суто аперіодичних процесів регулювання як більш повільних.

Результати роботи не опубліковані.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОКАТНИМИ СТАНАМИ

3.1 Постановка задачі дослідження

Аналіз технічних задач контролю об'єктів металургійного виробництва (наявність, положення, геометричні й габаритні параметри, швидкість, температура, якість поверхні) показав, що реалізація їх здійснюється за допомогою спеціалізованих первинних перетворювачів, заснованих на різноманітних фізичних принципах роботи, що зумовлює їхню значну кількість і різноманітність на виробництві [17, 18, 19].

Застосування аналогових інформаційних сигналів у вимірювальних перетворювачах ускладнено наявністю переважно безперервних збурюючих впливів, що обумовлено специфікою теплотехнічного виробництва.

При застосуванні одиночних імпульсів, енергія переданих сигналів еквівалентна, а в деяких випадках значно менше енергетичних характеристик серед їхнього розповсюдження. При роботі таких пристроїв в екстремальних умовах металургійного виробництва значно підвищується ймовірність отримання хибної інформації або пропуску корисного сигналу. Поява цих помилок контролю обумовлена низькою перешкодозахищеністю вимірювальних перетворювачів і, як наслідок, низькою достовірністю одержуваної первинної інформації. Це обумовлює виникнення аварійних ситуацій у роботі промислового устаткування, що призводять до значних матеріальних витрат. З іншого боку, велика кількість датчиків на об'єкті автоматизації визначає підвищені вимоги до швидкодії інформаційної системи, тому що ефективність системи управління визначається швидкісними і якісними показниками використаних первинних перетворювачів [17, 20, 21].

Проте, існуючі фотоелектричні перетворювачі аналогового й імпульсного типу при роботі в екстремальних умовах виробництва у значній мірі схильні до дії оптичних і електромагнітних перешкод, що призводять до видозміни інформаційного сигналу. Виявлено, що при визначенні об'єктів при оптичній локації на основі синхронного накопичення «пачки» імпульсів більш ніж на порядок підвищується співвідношення сигнал-перешкода, що підвищує достовірність вимірювальної інформації. Водночас, велика кількість інформаційних імпульсів у «пачці» (кілька сотень) значно знижує швидкість системи контролю [21, 22].

Таким чином, підвищення швидкості та достовірності контролю технологічних параметрів об'єктів контролю в екстремальних умовах металургійного виробництва є актуальною виробничою задачею.

Тому метою дослідження є підвищення ефективності роботи металургійного обладнання шляхом підвищення швидкості та достовірності контролю первинних вимірювальних перетворювачів у складі інформаційно-вимірювальної системи прокатного стану.

Отже, об'єктом дослідження є інформаційно-вимірювальна система прокатного стану.

При проектуванні вимірювальних перетворювачів як засобів первинного контролю параметрів об'єктів металургійного призначення слід звернути увагу на завдання, що виконуються конкретним перетворювачем, можливість інтеграції його в локальну інформаційну систему контролю, а так само можливість поєднання функцій контролю. Вимірювальний перетворювач повинен бути простий в роботі, надійний, мати уніфікований набір блоків (ремонтоздатен) [21, 23].

3.2 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 [17, 19].

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 [24, 25].

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 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 розкатої і згорнутої в рулон

смуги на конвеєр, що охолоджує, відбувається за допомогою первинних перетворювачів, переважно фотоелектричного типу [17, 19].

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

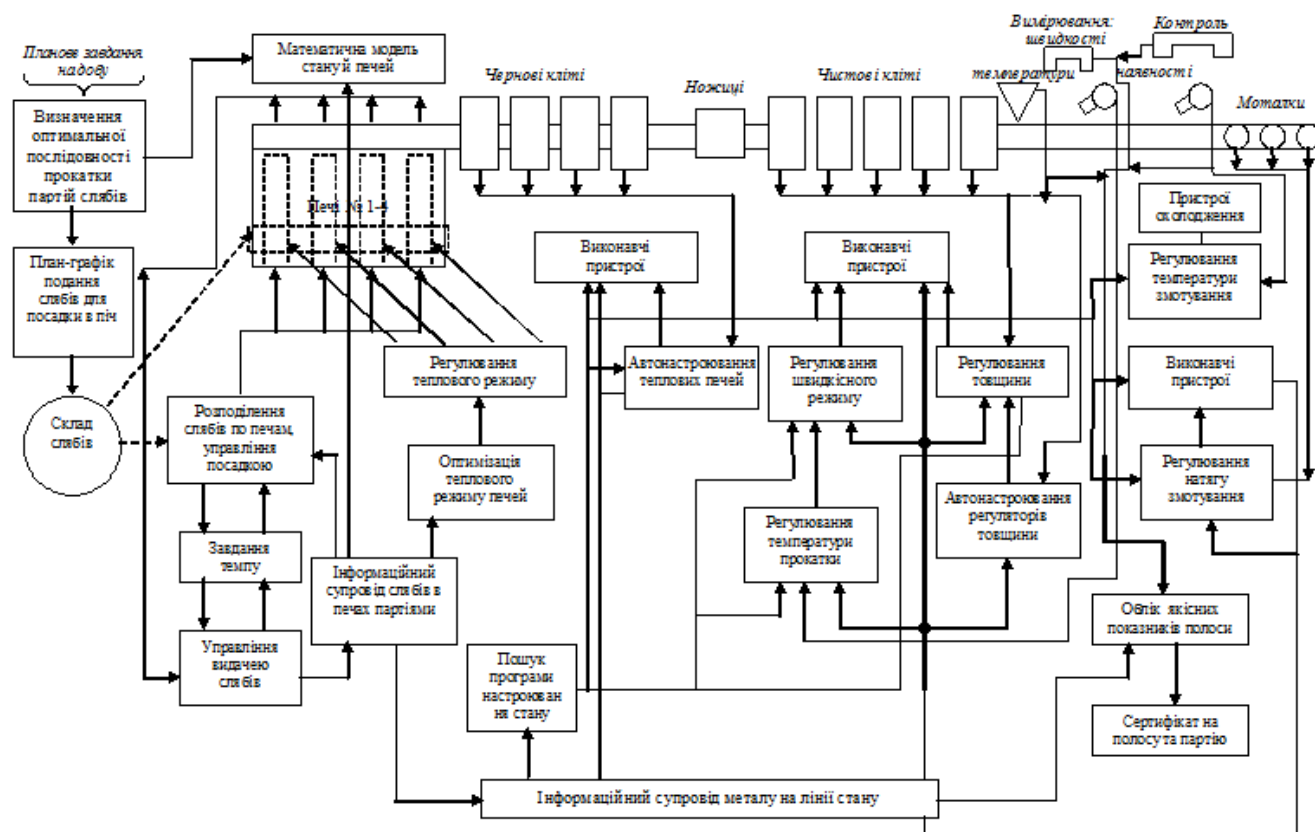


Рисунок 3.1 – Функціональна схема інформаційно-вимірювальної системи листового стану гарячої прокатки

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 цих 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, що йде 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 браку 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 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.

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 [17, 18].

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, які 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 усєї лінії, так і окремих ділянок прокатних станів.

3.3 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 [19]. 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.

Функціональна схема комплексної автоматизації прокатного стану наведена на рис. 3.2.

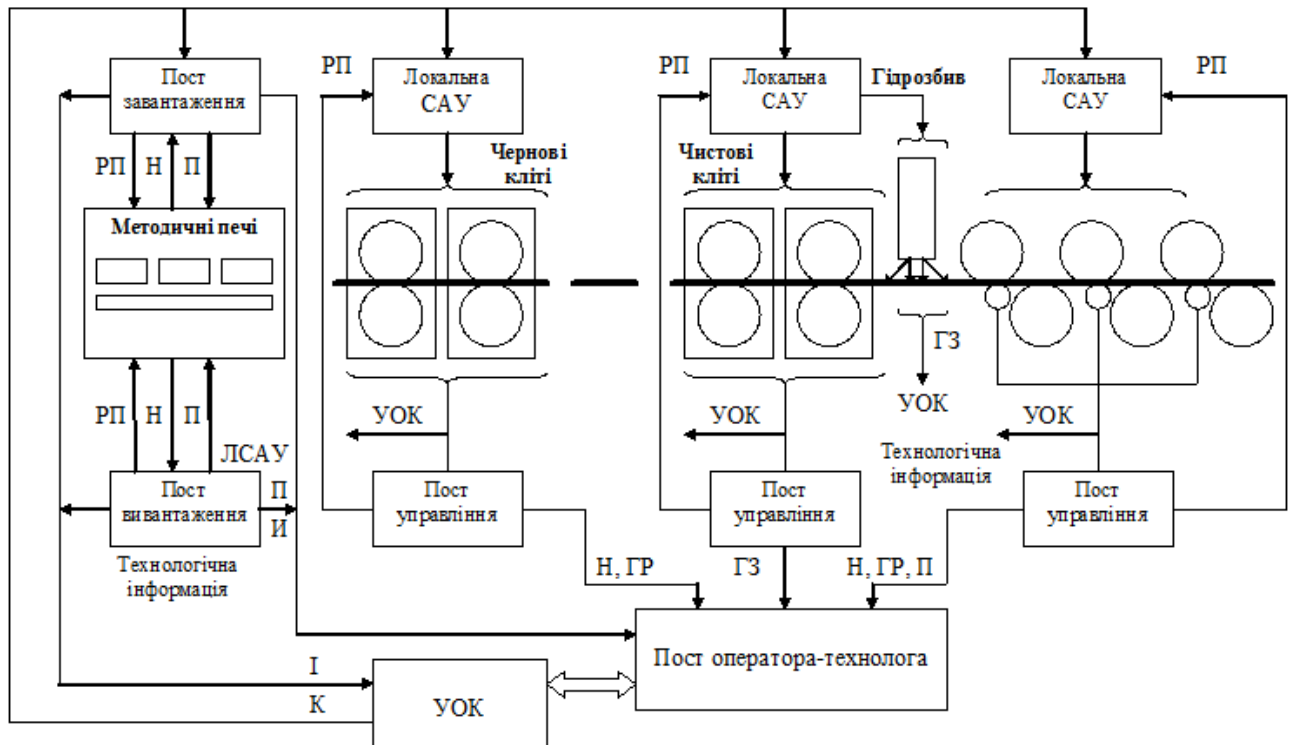


Рисунок 3.2 – Функціональна схема системи комплексної автоматизації стану гарячої прокатки: Н – наявність, П – положення, ГР – геометричні розміри, ГЗ – якість гідрозбиву, І – інформація, К – команди, ЛСАУ – локальні САУ, РП – регулюючі пристрої, УОК – управляючий обчислювальний комплекс

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 контрольні-вимірювальні пристрої. Так при автоматизації широкосмугових станів (ШСС) гарячої прокатки використовується до тисячі одиниць таких пристроїв, причому понад 20% їх – фотоелектричного типу [18].

Істотний внесок у розробку та створення ряду спеціалізованих пристроїв контролю параметрів прокатних станів внесли такі зарубіжні фірми: Sick, АЕУ 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 [18, 19].

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 [18, 26].

3.4 Дослідження фотоелектричних вимірювальних перетворювачів

3.4.1 Класифікація перетворювачів фотоелектричного типу

В результаті комплексного аналізу всіх наявних фотоелектричних вимірювальних перетворювачів (ФЕВП) з різними видами

інформаційних оптичних сигналів, їх структурної організації, специфіки їх функціонування і вирішуваних завдань можна виділити три основні групи ФЕВП (рис. 3.3), що мають конкретну область застосування [27, 28].



Рисунок 3.3 - Загальна класифікація ФЕВП

Наведемо коротку характеристику ряду модульних структур ФЕВП на основі кодоімпульсної модуляції оптичного сигналу, запропонованих в якості засобів первинного контролю параметрів об'єктів праці в металургії з екстремальними виробничими умовами.

Принцип роботи кодових перетворювачів досить простий і зрозумілий: генерується кодова послідовність і передається на фотоприймач, після чого в схемі управління відновлюється прийнята кодова послідовність і порівнюється з еталонним значенням коду.

Розподілені кодові ФЕВП кращі через механічну і гальванічну розв'язки передавача і приймача. Однак такий перетворювач досить складний в реалізації за рахунок труднощі синхронізації тракту передачі і прийому сигналів.

Найпростіший приклад ФЕВП з самонастроюванням можна побачити в стандартній системі дистанційного керування побутовими аудіо- та відео пристроями. У приймальнику реалізований найпростіший цифровий фільтр з часовою і частотною селекцією інформаційного оптичного сигналу, що дає досить високий рівень перешкодозахищеності. При цьому частота роботи приймача залежить від частоти передавача і налаштовується переданим кодом. Даний вид ФЕВП можна виділити особливим способом через те, що для нього є стандартна елементна база і передбачена можливість доопрацювання електричної схеми та адаптації до конкретних умов застосування. При цьому електронний тракт передачі не пов'язаний з електронним тактом прийому.

Особливий інтерес представляє компенсаційний ФЕВП на основі цифрової фільтрації прийнятого коду. Повна інформація про принцип роботи таких інформаційних пристроїв є в роботах [27, 28]. Цікаво, що вони дозволяють визначити неузгодженість переданого і прийнятого сигналу, а також відновити прийнятий код. Такі ФЕВП можуть бути використані в тих випадках, де необхідно визначити величину перешкоди (неузгодженості), що діє в середовищі поширення сигналу і впливає на переданий код, при винесенні логічного висновку про правильність контролю - «так» чи «ні». Прийнятий код порівнюється компаратором з еталонним шляхом віднімання, а різниця подається на фільтр динамічного обнуління, де з прийнятою послідовністю віднімається ця різниця. В результаті обнуління виходить відновлена послідовність сигналів, а різниця є помилка прийому, за якою судять про ступінь «забруднення» середовища.

Універсальний ФЕВП слідкуючого типу призначений для вирішення комплексних завдань з розрахунку довжини контрольованого виробу, його швидкості (при відомих розмірах) руху, виявлення об'єкта, а так само визначення кількості виробів і призначений для адаптивних

систем управління. Такий ФЕВП однаково надійно працює як з пачкою імпульсів, так і з кодовими послідовностями, що досягається за рахунок оригінального схемного рішення. Сформований код одночасно подається на передавач і на цифровий компаратор приймача, де ці коди, порівнюючись, показують ступінь спотворення сигналу в каналі (середі) розповсюдження оптичного сигналу. Залежно від величини спотворення коду видається повідомлення про результат контролю.

Аналогові і імпульсні ФЕВП детально вивчені в роботах [19, 27] і не потребують додаткового розгляду.

Найбільш перспективним напрямком у створенні ФЕВП як засобів первинного контролю є проектування систем контролю об'єктів за допомогою декількох каналів управління, коли один центральний передавач посиляє сигнали управління на кілька просторово рознесених приймачів. Можлива передача повідомлень по одному каналу, при цьому виникає задача поділу каналів передачі-прийому. Існує три можливих способи поділу інформаційних каналів для ФЕВП з кодоімпульсною модуляцією оптичного сигналу.

Часовий поділ каналів управління реалізується в такий спосіб. З одного передавача пересилаються команди або повідомлення по черзі на кожен приймач в суворій послідовності і з регламентованим часом передачі. Даний спосіб характерний як для просторово розподілених каналів, так і для одноканального прийому-передачі декількох повідомлень. Єдиним і істотним недоліком такого поділу каналів є мала швидкодія, що перешкоджає нарощуванню каналів, знижує загальну ефективність інформаційно-виміральної системи з ФЕВП.

Рівневий поділ каналів полягає в змінюванні потужності сигналу, що передається при передачі сигналів на різні приймачі або при передачі різних повідомлень. Даний спосіб неефективний через складність, а часом і неможливість зміни потужності оптичного сигналу, наприклад, коли випромінювач працює в імпульсному режимі.

Чисельноімпульсний поділ каналів найбільш доцільний в застосуванні. При такому способі поділу каналів кожен з них кодується певним чином, що виключає можливість помилкового вибору каналу і не знижує швидкодію при будь-якій кількості каналів. Цей спосіб легко реалізується апаратно і без зайвих витрат часу на проектування.

У пропонованих первинних перетворювачах фотоелектричного типу при незначному доопрацюванні джерел і приймачів кодоімпульсних оптичних сигналів передбачається можливість чисельноімпульсного (кодового) поділу каналів, що дає можливість створювати багатоканальну систему контролю об'єкта праці за умови зручного розташування вимірювальних перетворювачів на об'єкті контролю.

3.4.2 Розрахункова модель перетворювача оптичного типу

Теорія розглянутих первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) оптичного типу в загальному випадку заснована на встановленні зв'язку між вхідною величиною $x_{вх}$ і розподілом потужності світлового випромінювання $P(x)$ в конкретному середовищі розповсюдження [29].

Довжина каналу розповсюдження оптичних сигналів L_k (КРОС) набагато більше довжини хвилі світла, тому досить точна для практичного використання методика розрахунку світлорозподілу в цих каналах зв'язку може бути отримана при використанні законів геометричної оптики. Однак, використовуючи оптичний сигнал в ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль, застосування термінології та аналітичних залежностей для видимого випромінювання при розрахунку статичних характеристик ПВП оптичного типу як первинних вимірювальних перетворювачів інформації буде некоректним.

Відповідно до загальної теорії вимірювальних перетворювачів [29, 30] для математичного опису використовуються поняття узагальнених сил F і швидкостей \mathcal{Q} . Теоретично вибір F і \mathcal{Q} може бути довільним, а практично визначається наявними залежностями. В даному випадку, доцільно перейти від поняття світлового потоку до потужності випромінювання - $P(x)$. Відомий вираз для розрахунку потужності:

$$P = U \times I = I^2 R, \quad (3.1)$$

де P – потужність, Вт;

U - напруга, В;

I - сила струму, А;

R - опір, Ом.

Для нього зручно вибрати в якості узагальненої сили - струм I , а узагальненої швидкості - потужність P .

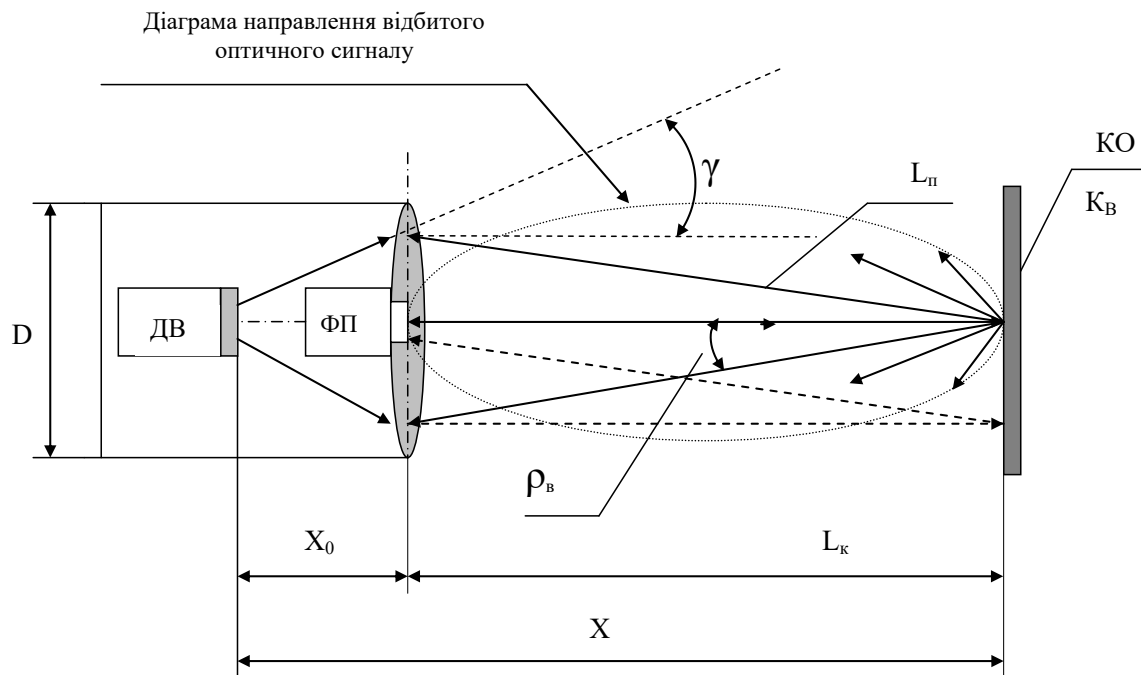
За аналогією з виразом геометричній оптики, що зв'язує силу світла J з потоком Φ , що поширюється в межах тілесного кута Ω , маємо $\Phi = J \cdot \Omega$, а встановлені узагальнені параметри будуть інтерпретовані таким чином:

$I^2 \approx J$ - узагальнена сила світла;

$P \approx \Phi$ - узагальнена потужність випромінювання;

$R \approx \Omega$ - оптичне опір, $\Omega = \frac{1}{S}$, де S - площа, обмежена кутом Ω .

Розрахунок розподілу потужності випромінювання в КРОС з зосередженим джерелом випромінювання є дуже складною задачею, тому що $P(x)$ залежить від довжини каналу (L_k), тілесного кута випромінювання (Ω), коефіцієнта відбиття (K_v), від параметрів випромінювача, місця його установки і ряду інших параметрів. Розрахункова схема ПВП з зосередженим джерелом випромінювання наведена на рис. 3.4.



ДВ – джерело випромінювання, ФП – фотоприймач, КО – контролюємий об’єкт,
 K_B – коефіцієнт відбиття поверхні об’єкта, γ, ρ – угли виходу та відбиття проміню,
 D – діаметр апертури лінзи, L_k, L_p – довжина каналу та проміню відповідно,
 X_0, X – відстань від випромінювача до лінзи та об’єкта відповідно

Рисунок 3.4 - Розрахункова схема ПВП оптичного типу із зосередженим джерелом випромінювання

Для ПВП, що реалізує оптичну локацію, зручно розглядати окремо потужність відбитого прямого випромінювання $P_{пр}(x)$ і відбитого під кутом до бічної поверхні об’єкта контролю $P_{кут}(x)$, які є складовими сумарної потужності $P(x)$, що потрапляє на фото приймальний пристрій (ФПУ):

$$P(x) = P_{пр}^B(x) + P_{угл}^B(x) \quad (3.2)$$

На основі математичної моделі ПВП оптичного типу і наведених вище міркувань, розподіл потужності випромінювання в КРОС визначається виразом

$$P_{\text{пр}}^{\text{В}}(x) = P_0 \exp(-K_x \cdot x) K_{\text{В}} = I^2 \frac{S}{X^2} \exp(-K_x \cdot x) K_{\text{В}}, \quad (3.3)$$

де $K_x = \frac{1}{4\pi}$ – природні втрати в КРОС;

X – довжина оптичного каналу, м.

Дещо складніше буде питання визначення потужності відбитого під кутом світлового потоку $P_{\text{В}}(x)$.

Джерело випромінювання є точковим, поміщений на осі і дає пучок променів з малою апертурою - в межах кута $2\gamma = \Omega$ (див. рис. 3.4).

При відображенні промінь частково поглинається або проходить всередину об'єкта контролю. Будь-який об'єкт має свою величину відбивної здатності, яка визначається коефіцієнтом відбиття $K_{\text{В}}$. Причому коефіцієнт відбиття є функцією кута падіння променів. Практично зміна $K_{\text{В}}$ визначається збільшенням кута відбиття (падіння), через що відбувається збільшення довжини шляху променю, а це призводить до часткової втрати потужності випромінювання.

Довжина шляху променю, що вийшов під кутом γ до осі, дорівнює:

$$L_{\text{п}} = \frac{(L_{\text{к}} + X_0)}{\cos\gamma} = \frac{X}{\cos\gamma} \quad (3.4)$$

Тоді зміна коефіцієнта відбиття визначається виразом:

$$\rho_{\text{розр}} = K_{\text{В}} \cdot \exp\left(-K_x X \int_{\gamma}^0 \frac{1}{\cos\gamma} d\gamma\right), \quad (3.5)$$

де $\rho_{\text{розр}}$ – розрахунковий коефіцієнт відбиття .

Тоді, досить точну для практичних розрахунків формулу для визначення потужності відбитого під кутом γ світлового випромінювання можна отримати з виразу (3.3) з урахуванням (3.5).

$$P_{\text{угл}}^B(x) = P_{\text{пр}}^B(x) \cdot P_{\text{розр}},$$

$$P_{\text{угл}}^B(x) = P_o \exp(-K_x X) \cdot K_B \exp\left(-K_x X \int_{\gamma}^0 \frac{1}{\cos \gamma} d\gamma\right). \quad (3.6)$$

Тоді, для ПВП, що реалізує оптичну локацію, сумарна потужність випромінювання, що падає на ФП, дорівнює:

$$P(x) = P_o \exp(-K_x X) \cdot K_B + P_o \exp\left(-K_x X \int_{\gamma}^0 \frac{1}{\cos \gamma} d\gamma\right) \cdot K_B =$$

$$= P_o K_B \left[\exp(-K_x X) + \exp\left(-K_x X \int_{\gamma}^0 \frac{1}{\cos \gamma} d\gamma\right) \right] \quad (3.7)$$

Очевидно, що основна потужність випромінювання, відбитого від поверхні об'єкта, буде зосереджена на осі оптичної системи.

Згідно розрахунковій схемі кут γ визначається з виразу:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{D/2}{X_o}, \quad \gamma = \operatorname{arctg} \frac{D}{2X_o}, \quad (3.8)$$

де D - діаметр лінзи, м;

X_o - місце установки лінзи, щодо джерела випромінювання, м.

Для випадку оптичної локації величина X , яка характеризує довжину шляху променя падаючого на вказану поверхню і віддзеркалену від нього, задається рівною $2L$.

3.4.3 Дослідження перетворювача оптичного типу

Запропонована інтерпретація математичної моделі ПВП оптичного типу дозволяє провести розрахунок розподілу потужності випромінювання $P(x)$ на фотоприймачі при різних значеннях коефіцієнтів відбиття K_B і довжини каналу, а також визначити

оптимальну довжину каналу, при якій відбитий оптичний сигнал буде впевнено фіксуватися на приймальному кінці перетворювача. В процесі моделювання таких ПВП шляхом варіювання узагальненими прийомами і змінними елементами проводиться пошук нового технічного рішення, відповідного поставленим вимогам [30].

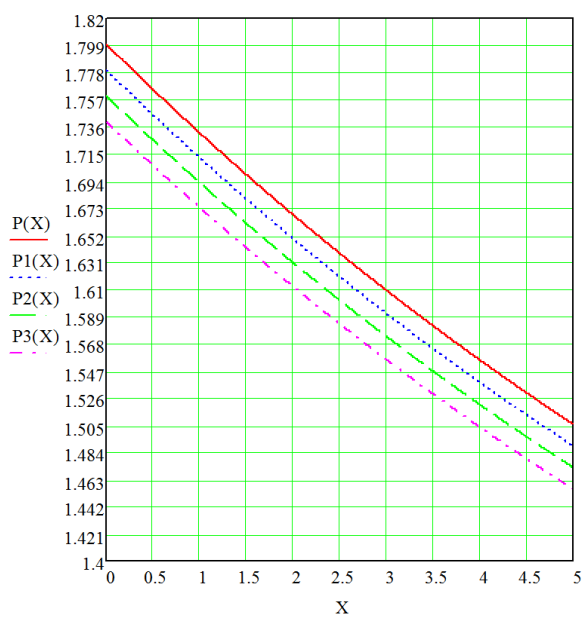
Таким чином, вираз (3.7), перетворене до виду

$$\frac{P(x)}{P_0} = K_B \left[\exp(-K_x X) + \exp\left(-K_x X \int_{\gamma}^0 \frac{1}{\cos \gamma} d\gamma\right) \right] \quad (3.9)$$

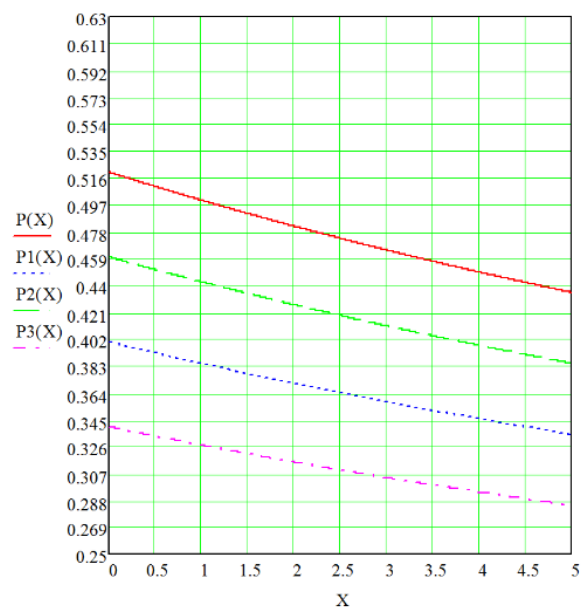
є основним при розробці методики розрахунку перетворювача і його можна вважати рівнянням статичної характеристики ПВП оптичного типу. Статична характеристика дозволяє визначити основні параметри, а також режим роботи перетворювача.

Зважаючи на складність інтегральних виразів (3.9), що описують математичну модель ПВП оптичного типу, його доцільно вирішувати чисельним методом на ЕОМ. При цьому актуальним питанням залишається визначення фактичних значень коефіцієнтів відбиття для матеріалів різного виду і теплового стану. Порівняння отриманих коефіцієнтів з розрахунковими дозволить перевірити адекватність запропонованої моделі.

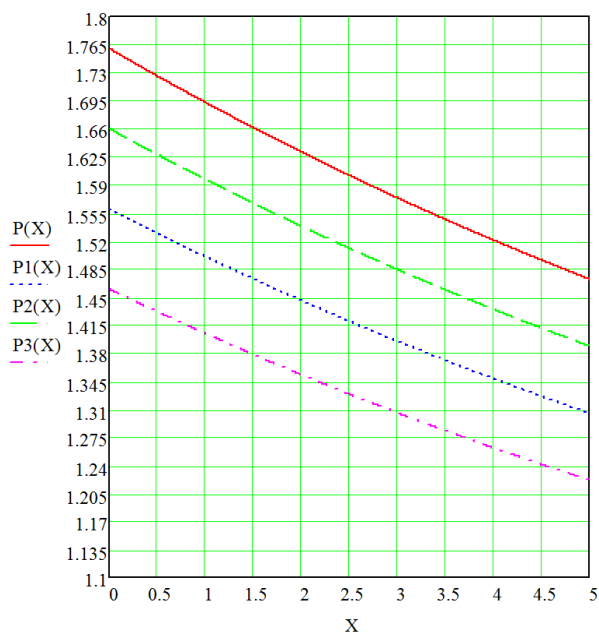
На рис. 3.5 наведені залежності відносного значення сумарної потужності $P(x)/P_0$ на фотоприймачі від загальної довжини оптичного каналу X (де P_0 – значення потужності випромінювання при $x = x_0$). А на рис. 3.6 представлена діаграма зміни потужності сигналу на фотоприймачі $P(x)/P_0$ від кута відбиття γ , що визначає розрахунковий коефіцієнт відбиття $\rho_{\text{розр}}$.



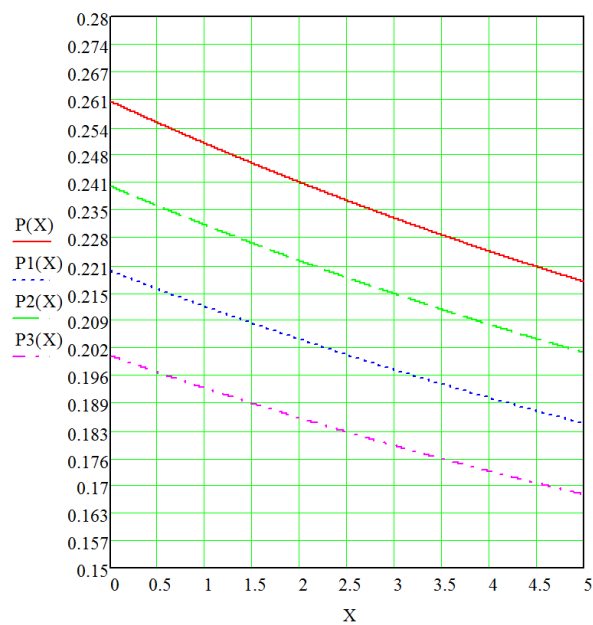
а



б



в



г

Рисунок 3.5 – Статичні характеристики тепловізору для сталей:
 а – вуглецева; б – хромиста; в – хромонікелева; г – жаростійка

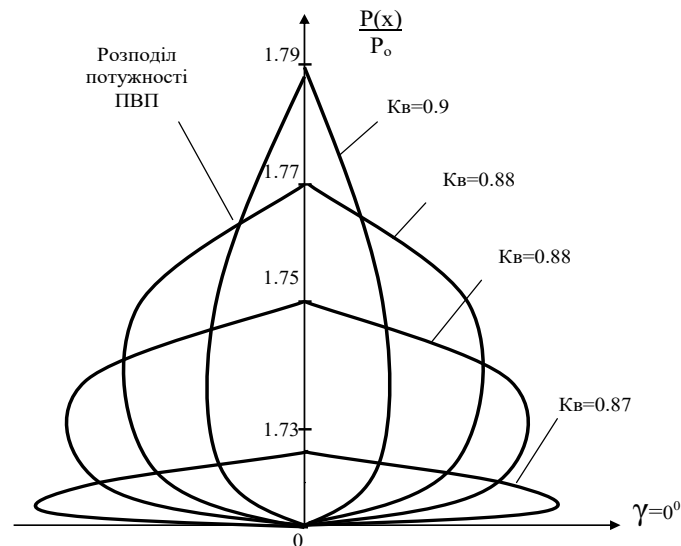


Рисунок 3.6 - Діаграма розподілу потужності відбитого сигналу в залежності від кута візування і K_v

Розрахунки проводилися на ЕОМ з використанням програми MathCAD. Дані для розрахунку взяті з реального оптичного ПВП (тепловізор типу FLIR A310) з наступними параметрами: $K_x = 0.08$, $X_o = 5\text{м}$, $D = 0.03\text{м}$. Коефіцієнти випромінювання взяті для різних марок сталей використовуваних в прокатному виробництві: окислена вуглецева сталь ($K_v = 0.87\dots 0.9$); хромиста нержавіюча сталь ($K_v = 0.17\dots 0.26$); хромонікелева нержавіюча сталь 0X18H10 ($K_v = 0.72\dots 0.88$); жаростійкі сплави ($K_v = 0.1\dots 0.13$).

За результатами моделювання можна зробити наступні висновки:

- отримано розрахункові залежності, що описують зміну потужності випромінювання від довжини оптичного каналу і величини зовнішніх послаблюють факторів;

- отримано аналітичні вирази і розроблена методика розрахунку з використанням ЕОМ статичної характеристики ПВП оптичного типу в залежності від характеристик середовища розповсюдження оптичного сигналу.

Результати дослідження дозволяють визначити оптимальну довжину оптичного каналу (взагалі або для конкретного виду матеріалу) для отримання максимальної достовірності контролю.

Теоретичні дослідження показали, що діаграма відбитих сигналів має вузьку спрямованість, для цього ПВП необхідно встановлювати строго перпендикулярно до контрольованого об'єкту, що дасть можливість отримати на фотоприймачі максимально можливу потужність відбитого і ослабленого оптичного сигналу.

Зменшення кута зору фотоелектричного вимірювального перетворювача на величину понад п'ять градусів енергетично не вигідно, так як потужність відбитих сигналів різко знижується, що обумовлено специфікою змішаного відбиття (основна енергія поширюється по законам спрямованого відбиття, а інша – дифузно розсіюється).

У зв'язку з роботою перетворювача в якості оптичного локатора, актуальна проблема дослідження послаблюючої дії каналу розповсюдження оптичних сигналів, зокрема відбивної здатності матеріалу об'єктів Кв. Ця величина має найбільший вплив на відбитий оптичний сигнал, більш ніж на порядок послаблюючи його енергію.

Основна втрата енергії оптичного сигналу обумовлена низькою відбивною здатністю матеріалу об'єкта. Таким чином, основним способом збільшення довжини каналу є підвищення чутливості фотоприймального пристрою.

3.5 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 [21].

Розглянемо особливості побудови таких систем автоматизації процесів прокатки [31, 32, 33, 34, 35, 36].

З аналізу відомо, що слабка організація виробництва у пічному районі призводить до зниження продуктивності всього стану [31, 32]. 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. 3.7.

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 першим направляючим лотком стану. На позиціях контролю встановлюються фотоелектричні датчики, причому позиції 8 використовується не оптичний локатор, а перетворювач сигналу.

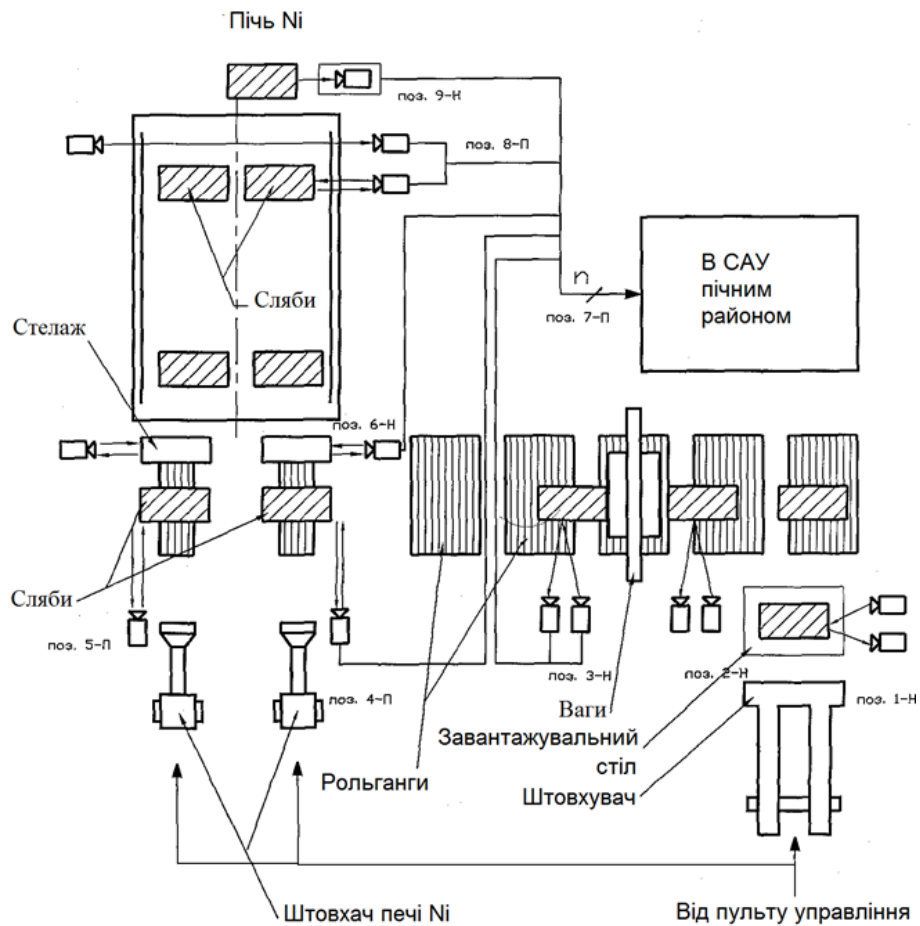


Рисунок 3.7 – Система автоматичного стеження за слябами в пічному районі: САУ – система автоматичного управління; Н – індикатор наявності; П – індикатор положення; ПОЗ – номер позиції контролю

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 видачою 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. 3.8.

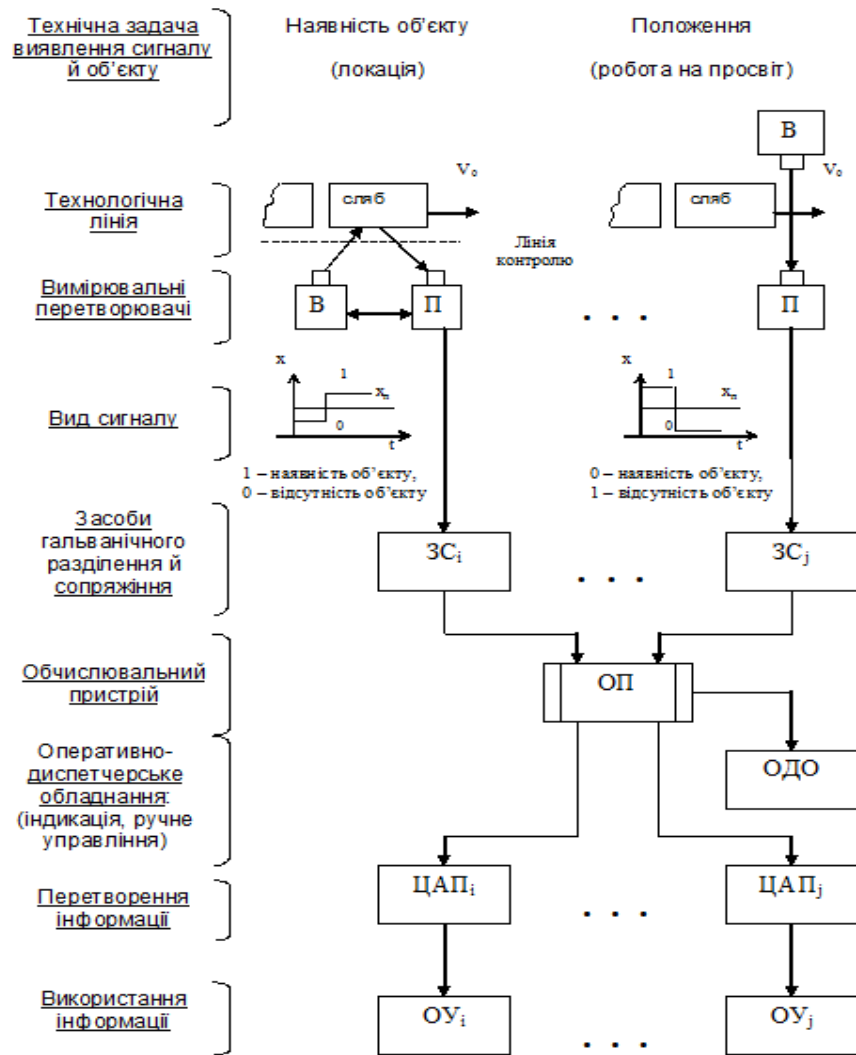


Рисунок 3.8 – ІВС стеження за слябами в пічному районі: В – випромінювач; П – приймач; ЗС – засоби сполучення; ОП - обчислювальний пристрій; ОДО – оперативно-диспетчерське обладнання; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ОУ – об'єкт управління

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 [37, 38].

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.

3.6 Висновки

Проведені дослідження існуючих та визначення нових способів отримання первинної інформації про стан процесу прокатки для підвищення ефективності роботи обладнання та стану в цілому дозволили сформулювати наступні висновки:

1. Системи контролю технологічних параметрів прокатних станів вимагають значного асортименту первинних перетворювачів різного функціонального призначення до роботи в екстремальних умовах металургійного виробництва. 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 металургійними 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.

3. Доведено, що фотоелектричний спосіб контролю параметрів об'єктів забезпечує необхідну перешкодозахищеність, достовірність контролю і точність вимірів. Зазначений спосіб реалізується у фотоелектричних вимірювальних перетворювачах. Завадостійкі фотоелектричні перетворювачі звичайно працюють при активному способі контролю, із спеціальними випромінювачами, що створюють оптичний сигнал із властивостями, що істотно відрізняються від властивостей оптичних перешкод. А кодування інформації дозволяє значно підвищити завадостійкість первинного перетворювача.

4. Наведений приклад реалізації системи автоматичного стеження за слябами у пічному районі прокатного стану, що доводить практичну значимість наведених досліджень.

Основними науково-технічними результатами проведеного дослідження можна вважати:

- розробку методики розрахунку фотоелектричного вимірювального перетворювача з цифровою фільтрацією оптичного кодоімпульсного сигналу як первинного елемента ІВС, що дозволить підвищити якісні показники і реальну перешкодостійкість перетворювача при роботі в екстремальних умовах прокатних цехів, макета цифрового фотоелектричного перетворювача;

- розробку методики проектування вимірювальної частини ІВС контролю технологічних параметрів об'єктів контролю на базі фотоелектричного вимірювального перетворювача з цифровою фільтрацією кодоімпульсного оптичного сигналу для виявлення об'єктів будь-якого теплового стану.

Результати роботи опубліковані [17, 20-25, 27, 28, 30-38].

4 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ, АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ВВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В АСУТП

Об'єкт дослідження: фізична та математична модель комплексного технологічного агрегату, що включає в себе систему з двома ємностями (перша - власне агрегат, друга розглядається функціонально як димовий тракт), датчиками, для вимірювання технологічних параметрів та системою керування на основі мікроконтролера. Також розглядається цифровий двійник цього об'єкта.

Мета дослідження: розробка алгоритмів обробки аналогових сигналів, що поступають в АСУ ТП, які включають в себе фільтрацію, корекцію та масштабування. Ідентифікація структури та параметрів об'єкту керування. Розробка системи автоматичного керування об'єктом на базі мікроконтролера. Розробка і випробування цифрового двійника об'єкта керування з використанням математичного моделювання.

Методика досліджень:

- побудова фізичного макету технологічного об'єкта;
- проведення експериментів з вимірювання технологічних параметрів (температура, швидкість повітря) при різних значеннях керуючих впливів;
- вибір алгоритмів фільтрації та корекції аналогових сигналів;
- ідентифікація параметрів об'єкта за отриманими експериментальними даними;
- розробка і тестування ПІД-регуляторів;
- аналіз результатів моделювання та порівняння з реальними вимірами.

Спеціальні інструменти та апаратура:

- саморобний фізичний макет технологічного агрегату;

- мікроконтролер Renesas RA2A1 для зчитування та обробки вхідних даних та генерації керуючих впливів;
- термометри опору типу Pt100, цифрові датчики температури DS18B20;
- датчики тиску, швидкості повітря;
- ПК для розробки програмного забезпечення мікроконтролера та фіксації та архівації параметрів об'єкту управління.

Програмне забезпечення:

- середовище розробки e2 studio для написання програмного коду мікроконтролера;
- Segger RTT для отримання даних від мікроконтролера та збереження їх у файли;
- Microsoft Excel для обробки отриманих даних та побудови графіків.

Теоретичні результати:

- 1) показано доцільність використання фільтра Калмана для швидкозмінних параметрів і комбінації медіанного та аперіодичного фільтрів для повільнозмінних параметрів;
- 2) показано доцільність використання поправок з урахуванням швидкості зміни параметру для повільнозмінних параметрів;
- 3) розроблено математичну модель об'єкта керування у вигляді сукупності елементарних ланок.

Практичні результати:

- 1) створено фізичний макет технологічного об'єкта;
- 2) реалізовано систему збору та обробки аналогових сигналів;
- 3) встановлено методи корекції похибок температури з урахуванням динаміки та величини керуючих впливів;
- 4) впроваджено ПІД-регулятори для керування технологічним процесом;
- 5) досягнута точність температурних вимірювань до 0,5–1 °С.

Наукова новизна:

- 1) запропоновано вводити динамічну поправку для вимірювання температури, в залежності від швидкості її зміни;
- 2) розроблено адаптивну математичну модель із змінними параметрами на основі діапазону керуючих впливів;
- 3) застосовано комбінацію методів фільтрації, корекції та математичного моделювання для створення та тестування цифрового двійника технологічного агрегату з термо- та аеродинамічними процесами.

Галузі використання:

- автоматизація технологічних процесів (АСУ ТП);
- цифрове моделювання та управління в промисловості;
- розробка цифрових двійників в енергетиці, гірничій промисловості, металургії;
- навчальні комплекси з автоматичного управління.

4.1 Постановка задачі та огляд літератури

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 [39] 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 проєктування 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 [40] 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 [41] 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 їхню 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 [42] 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 [43] 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 [44], 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 [45] 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 [46] 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 РНМ (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 [47] 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. По-третє, охолодження та перемішування додатково динамічно контролюються для забезпечення стабільності якості. Після введення системи зменшились 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 [48] 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 [49] 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 був реалізований імітатор об'єкта управління, розроблений його цифровий двійник, і оцінені на його базі алгоритми 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.

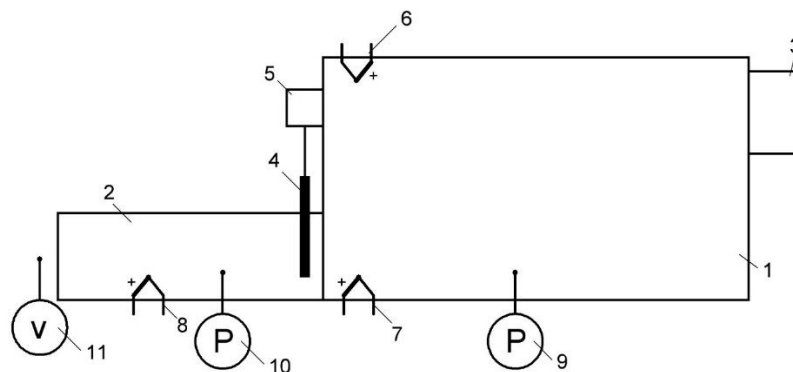


Рисунок 4.1 – Структурна схема макету технологічного об'єкту

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 (ємність 1) закріплений нагрівач повітря з вентилятором 3, який вдуває гаряче повітря всередину. Потужність як нагрівача, так і вентилятора контролюються та регулюються за допомогою мікроконтролера.

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

У макеті вимірюються наступні технологічні параметри:

- температура в двох точках робочого простору агрегату за допомогою хромель-алюмелевих термопар (6 та 7) та температура в димовому тракті за допомогою аналогічної 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 виглядала 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 проєкт. Друга проблема була вирішена шляхом заміни термопар на термометри опору, які менш схильні до електромагнітних наводок та до взаємного

впливу, 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 шиберний затвор було закрито, а вентилятор і нагрівач працювали на повну потужність, через деякий час шибер було відкрито, а ще через деякий час нагрівач було вимкнено.

Результати експерименту представлені на рис. 4.2 – 4.6.

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

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 відкриванні 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).

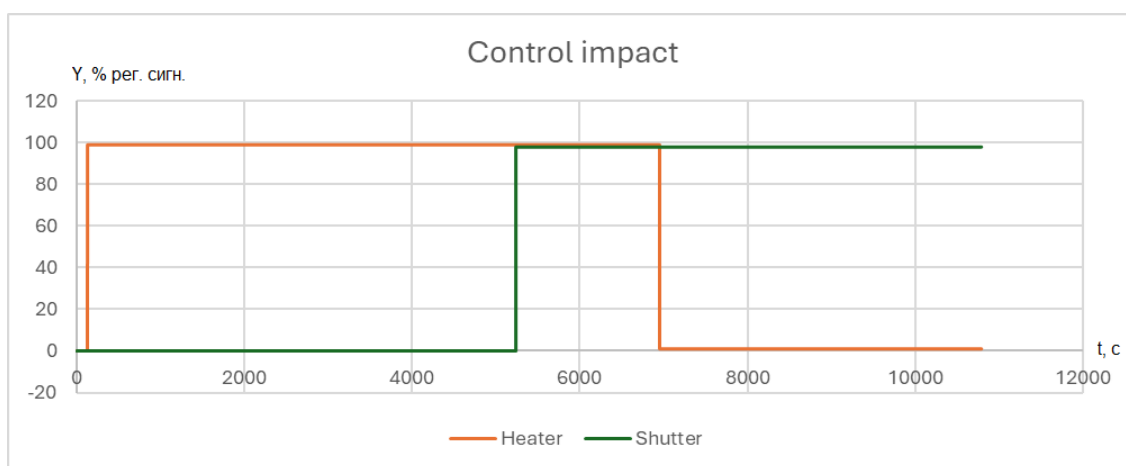


Рисунок 4.2 – Положення шибера та відносна потужність нагрівача

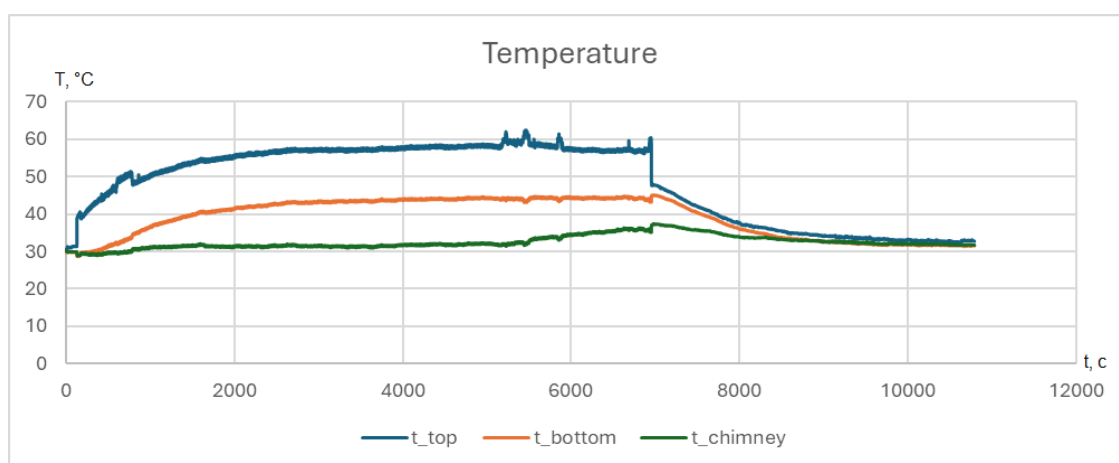


Рисунок 4.3 – Температури в верхній та нижній частині агрегату та у димовому тракті

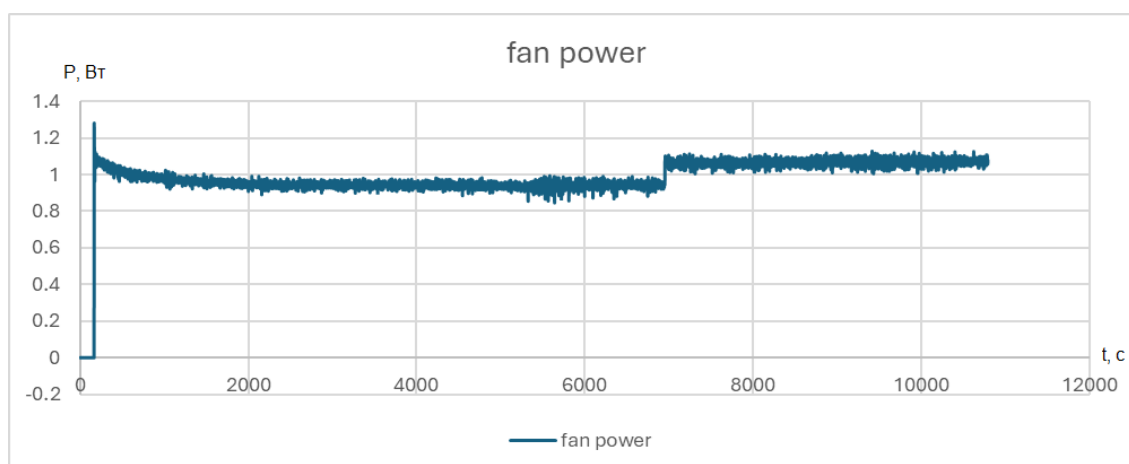


Рисунок 4.4 – Потужність вентилятора

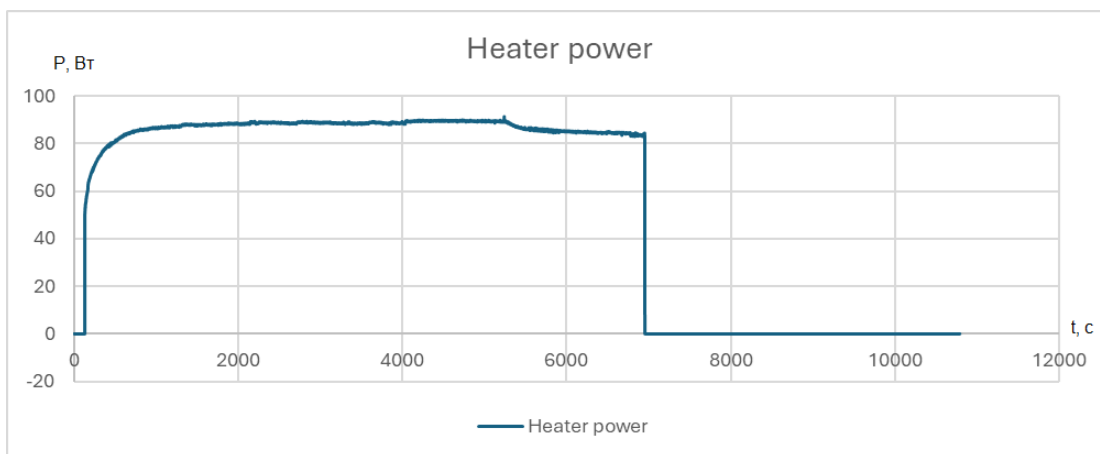


Рисунок 4.5 – Потужність нагрівача

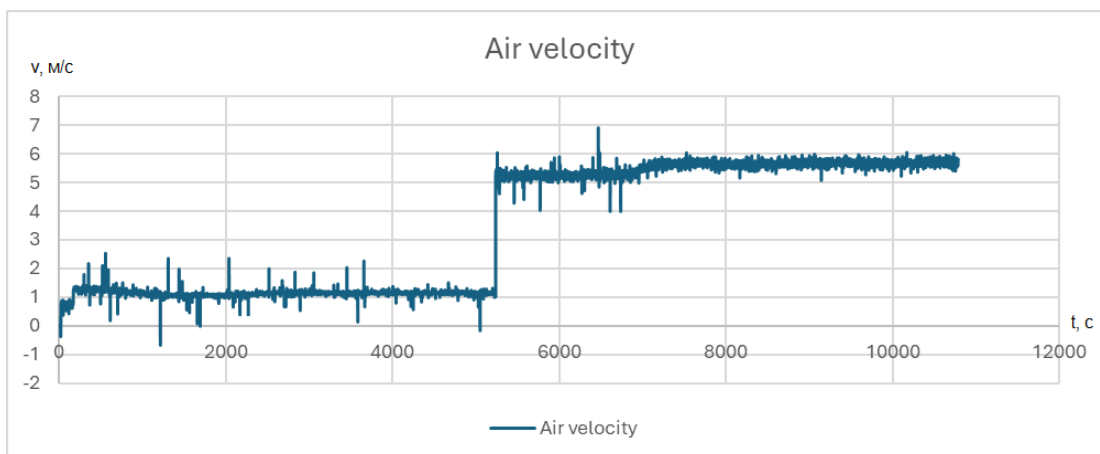


Рисунок 4.6 – Швидкість повітря на виході з димового тракту

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 шиберного затвору (рис. 4.7 – 4.9).

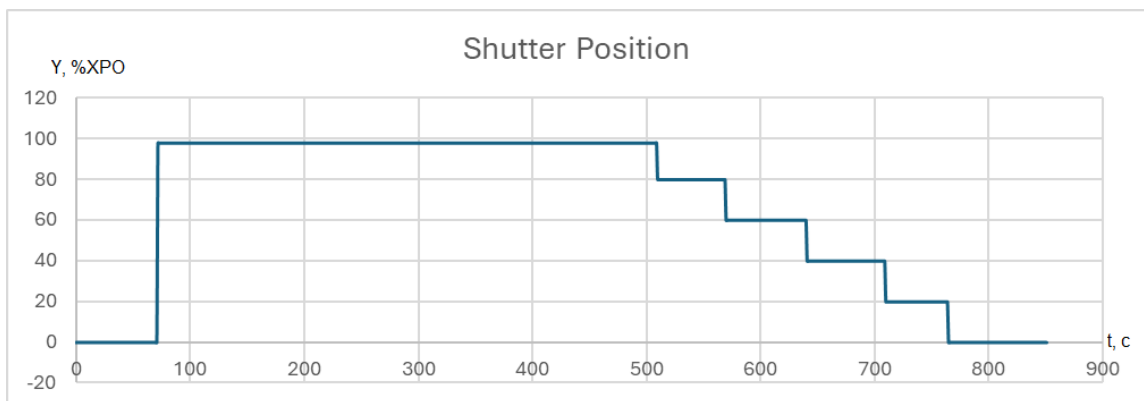


Рисунок 4.7 – Положення шиберного затвору

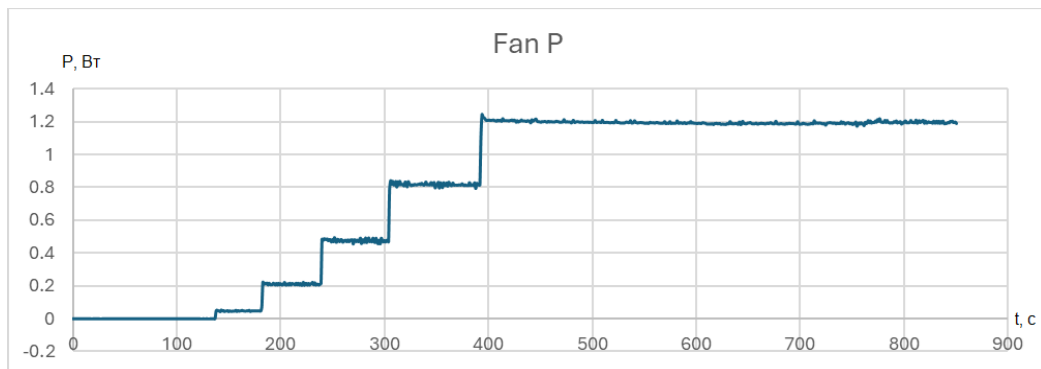


Рисунок 4.8 – Потужність вентилятора

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

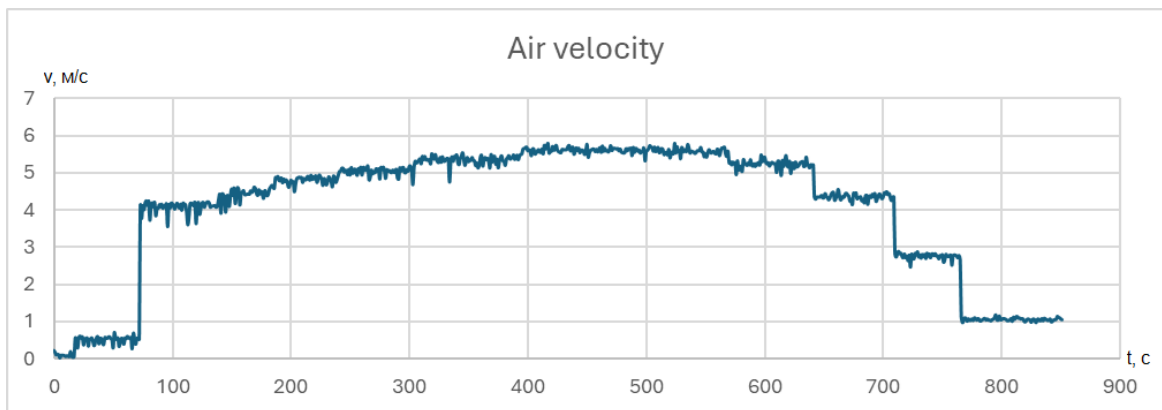


Рисунок 4.9 – Швидкість повітря на виході з димового тракту

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. Вимірювання температури та її корекція

Після багатьох спроб отримати якісь адекватні та повторювані результати за допомогою термопар, було вирішено відмовитися від них на користь платинових термометрів опору типу Pt100, які не настільки схильні до електромагнітних наведень за рахунок більш високого струму через них.

Однак, при їх використанні виявилася інша проблема. Оскільки у вимірювальній схемі окрім власне термометру опору присутні ще звичайні резистори (навіть прецизійні), опір яких також залежить від температури навколишнього середовища, показання температури були нестабільними та неточними.

Для оцінки точності вимірювання та калібрування термометрів опору у схему були додані ще цифрові датчики температури типу DS18B20, які фізично розташовані всередині агрегату біля термометрів

опору. То ж ми можемо вважати, що температури і зразкового (цифрового), і робочого (термометр опору) термометрів однакові.

Оскільки точність цифрових термометрів DS18B20 згідно з документацією, дорівнює $\pm 0,5$ °C у всьому діапазоні вимірювання (від -55 °C до 125 °C), ми можемо вважати їх зразковими у порівнянні з термометрами опору.

Після першого тестування були отримані наступні результати (рис. 4.10). На графіку представлені показання термометру опору (синій графік) та цифрового термометру (фіолетовий графік) у нижній точці агрегату (див. рис. 4.1). Температури в інших точках мають якісно схожі графіки.

За графіком (рис. 4.10) видно, що показання термометру опору дуже зашумлені, а крім того, різниця між показаннями зразкового та робочого термометру сягають 5 градусів, що не є припустимим.

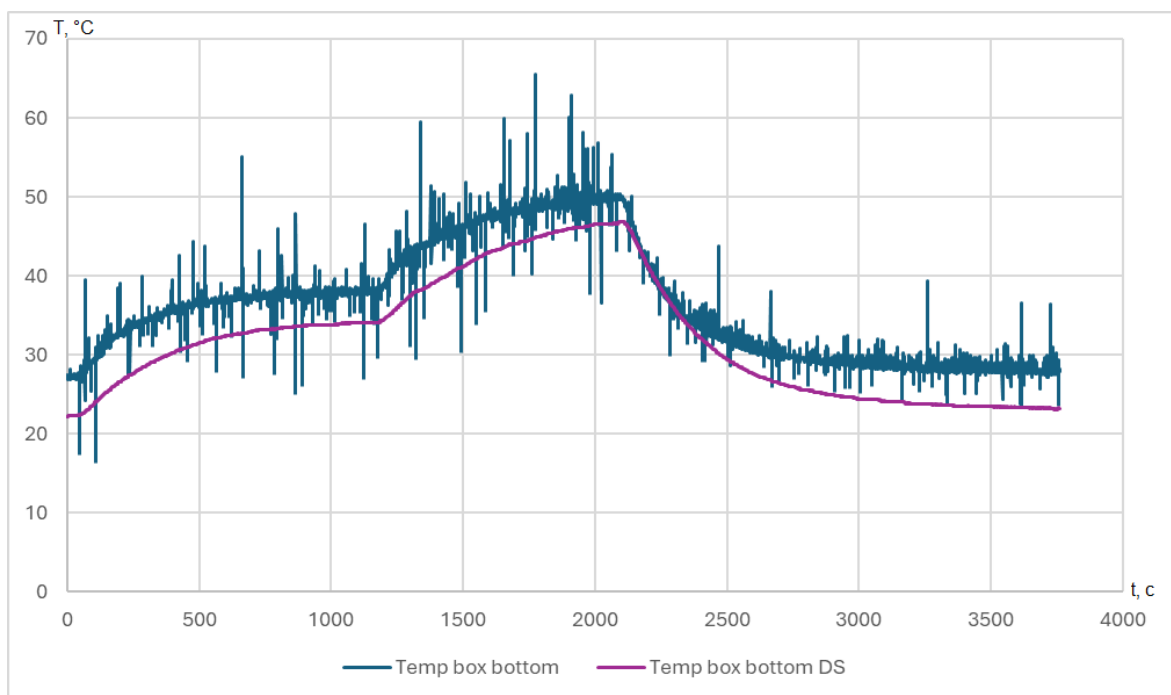


Рисунок 4.10 – Результати вимірювань після першого випробування

Очевидно, що для усунення першої проблеми треба використовувати фільтрацію вхідних даних, а для усунення другої – провести калібрування датчика.

Було проведено декілька тестів з різними фільтрами – ковзне середнє, медіанний, аперіодичний, фільтр Калмана [50]. Найкращі результати були отримані за допомогою послідовного використання медіанного фільтру, який прибирав поодинокі викиди показань, та аперіодичного фільтру з коефіцієнтом фільтрації 0.1, який згладжував залишкові коливання. Фільтр Калмана, який вважається пристосованим як раз для фільтрації таких зашумлених показань, не дав значного покращення результатів, то ж, враховуючи складність його реалізації, від нього було вирішено відмовитися. Результати застосування медіанного та аперіодичного фільтрів показані на рис. 4.11 та 4.12 відповідно.

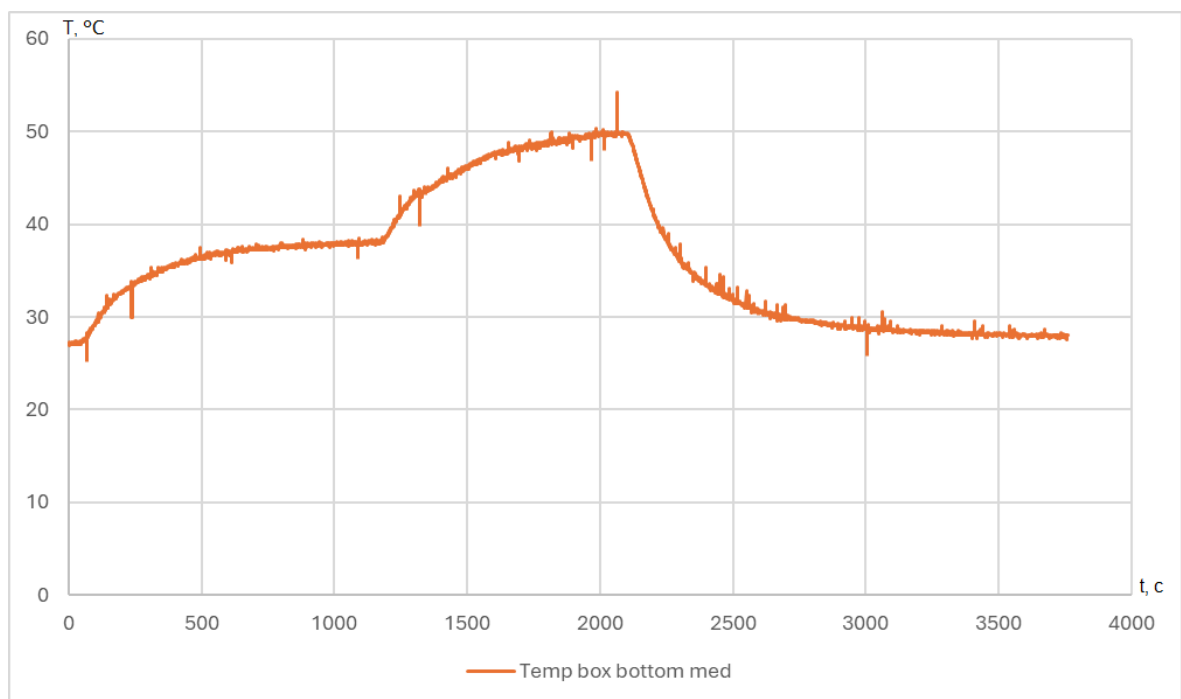


Рисунок 4.11 – Результати застосування медіанного фільтра

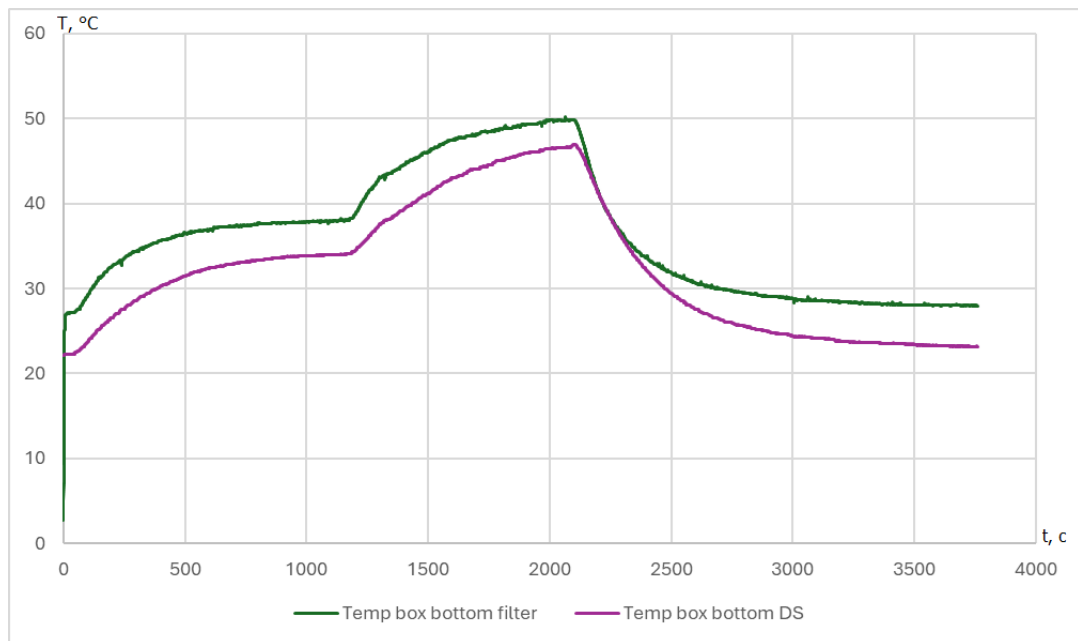


Рисунок 4.12 – Результати застосування аперіодичного фільтра

Як можна бачити з рис. 4.11, вже після медіанного фільтру результати стають набагато кращими, ніж вихідні (рис. 4.10). Аперіодичний фільтр майже повністю усуває коливання показань, роблячи їх придатними для подальшого зберігання та використання в системі індикації та регулювання.

Наступним кроком треба усунути різницю показань. Для цього треба ввести поправку на фільтровані показання термометру опору. Найпростіший варіант – це знайти різницю між показаннями зразкового та робочого термометрів у сталому стані, і віднімати її від кожного показання останнього. Графік різниці показань представлений на рис. 4.13.

Початок графіка не є інформативним, оскільки показання спочатку сильно занижені аперіодичним фільтром (це також можна бачити і на рис. 4.12).

З рис. 4.13 можна побачити, що різниця між показаннями постійно змінюється, але у сталому стані вона близька до 5 градусів. При

застосуванні такої поправки, ми отримуємо наступний результат (рис. 4.14).

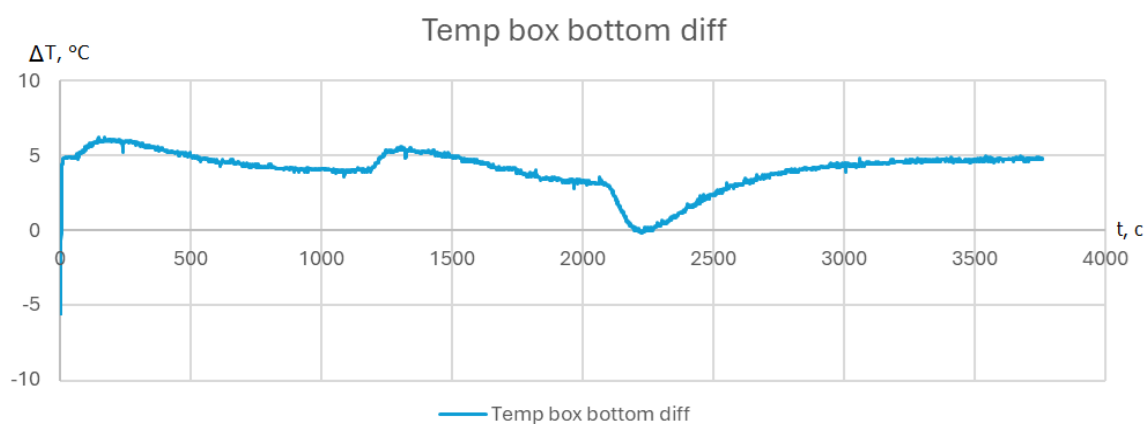


Рисунок 4.13 - Різниця показань робочого та зразкового термометра

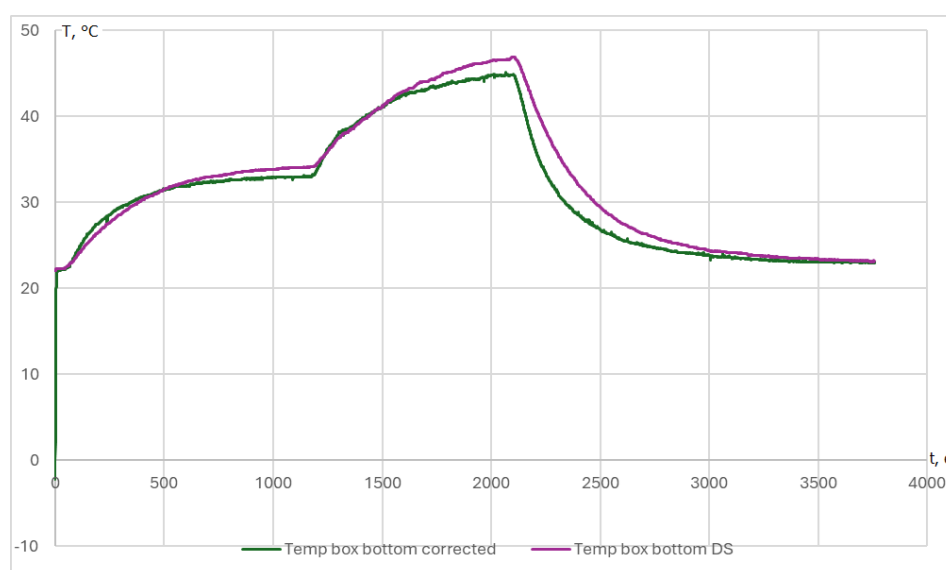


Рисунок 4.14 – Результати вимірювання після введення постійної поправки

Тепер результати збігаються з досить непоганою точністю. Але в динамічних режимах показання все ж таки досить сильно розходяться. Це пов'язано з тим, що фізично датчики мають різні геометричні розміри

і різну конструкцію, то ж прогрів самих датчиків не є однаковим. Для подальших розрахунків ми будемо вважати, що показання цифрового термометру і в статичних, і в динамічних режимах є істинними.

Для того, щоб прибрати різницю показань в динамічному режимі треба ввести так звану динамічну поправку, що залежала б від швидкості зміни температури. Цю швидкість ми будемо визначати, як різницю показань цифрового термометра за 30 секунд. Графік швидкості зміни температури представлений на рис. 4.15.

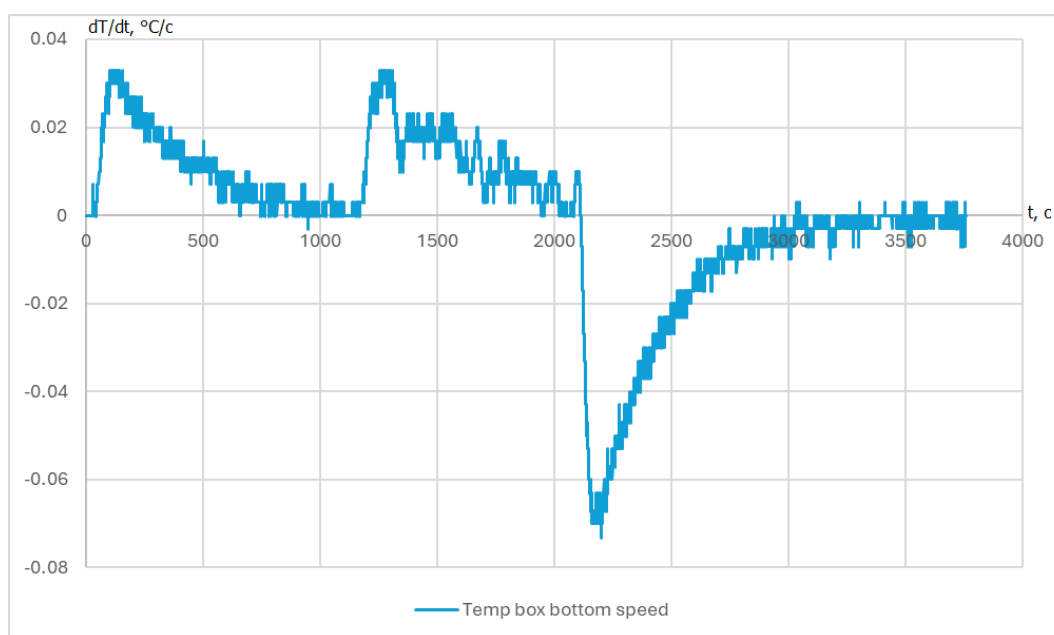


Рисунок 4.15 – Швидкість зміни температури

Наступним кроком треба побудувати графік залежності різниці показань температур робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури (рис. 4.16).

З цього графіку видно, що залежність має характер, схожий на лінійний. Побудувавши лінію тренду, ми можемо отримати математичну залежність різниці показань температур робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури, яку потім можна застосувати до фільтрованих показань термометру опору. Ця лінія тренду, а також її рівняння та коефіцієнт кореляції також показані на

рис. 4.16. З цього рівняння, до речі, можна побачити, що при швидкості $0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ поправка складає $4,06\text{ }^{\circ}\text{C}$, а не $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, як ми використовували на рис. 4.14.

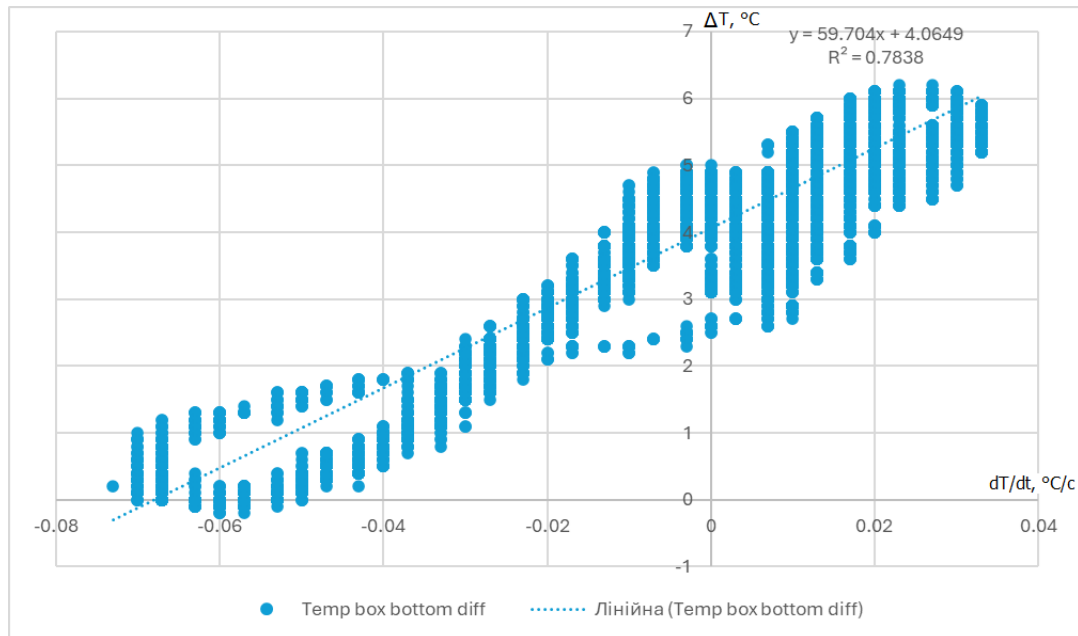


Рисунок 4.16 – Залежність різниці показань робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури

Після введення динамічної поправки замість статичної, отримаємо наступний результат (рис. 4.17).

Як можна бачити з рис. 4.17, тепер показання сходяться з точністю не гірше $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після введення поправки значення робочого термометру стали більш шумними, що викликано тим, що швидкість також є досить зашумленою (рис. 4.15), а поправка залежить від швидкості у значній мірі (див. рівняння на рис. 4.16)

Після тестування виявилось, що поправка також залежить від обертів вентилятора (рис. 4.1). Наприклад, на рис. 4.18 наведена залежність поправки від швидкості для максимальних обертів вентилятора (всі попередні результати стосувалися експерименту з мінімальними обертами).

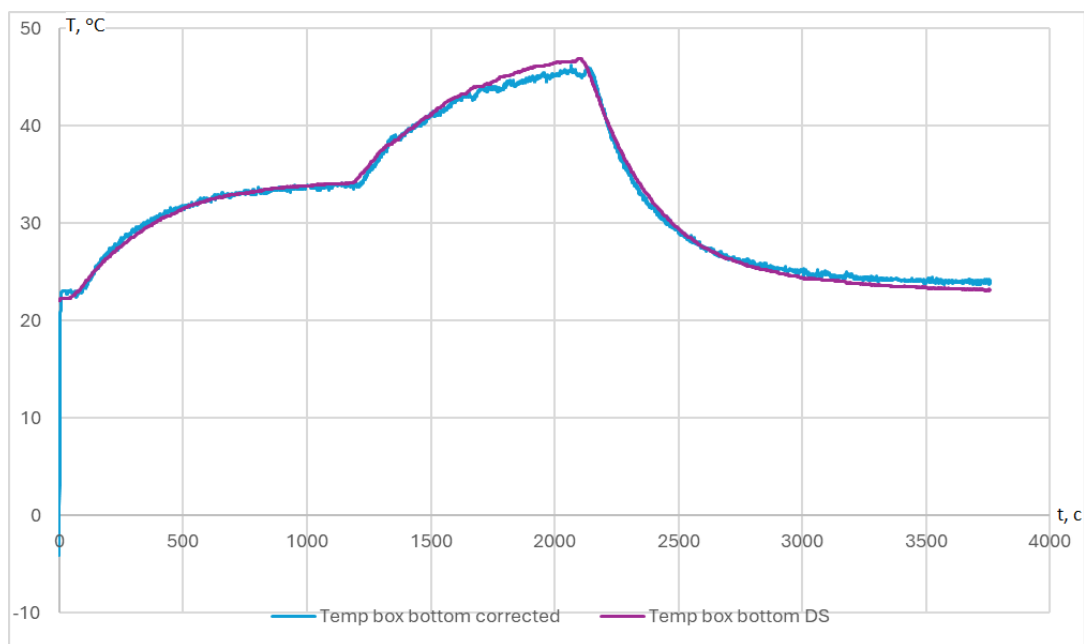


Рисунок 4.17 – Результати вимірювання після введення динамічної поправки

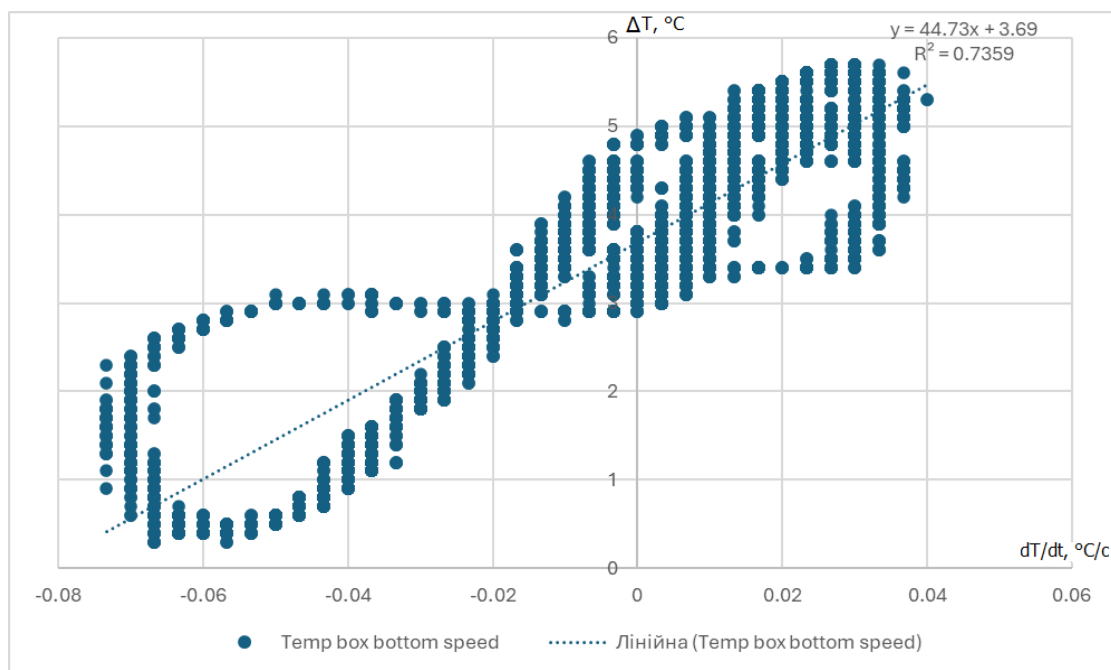


Рисунок 4.18 - Залежність різниці показань робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури при максимальних обертах вентилятора

То ж, для того, щоб врахувати ще й цей параметр, кінцеве рівняння для динамічної поправки було взято як лінійна апроксимація між рівняннями, показаними на рис. 4.16 та рис. 4.18 в залежності від обертів вентилятора.

Для інших двох термометрів були проведені аналогічні розрахунки та викладки. Результати вимірювання для температури у верхній частині агрегату та у димовому тракті показані на рис. 4.19 та 4.20, відповідно.

Як бачимо з рис. 4.17, 4.19 та 4.20, після математичної обробки показання зразкового та робочого датчиків збігаються з точністю, що не перевищує 1 °С в найгіршому випадку, а в більшості випадків – не більше 0,5 °С.

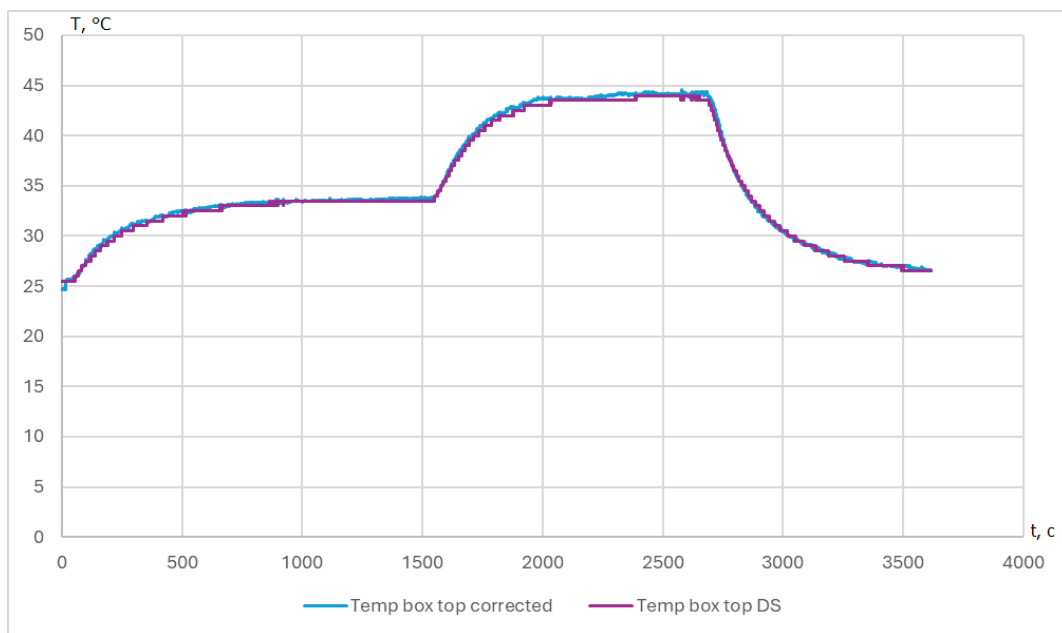


Рисунок 4.19 – Результати вимірювання температури в верхній частині агрегату після введення динамічної поправки

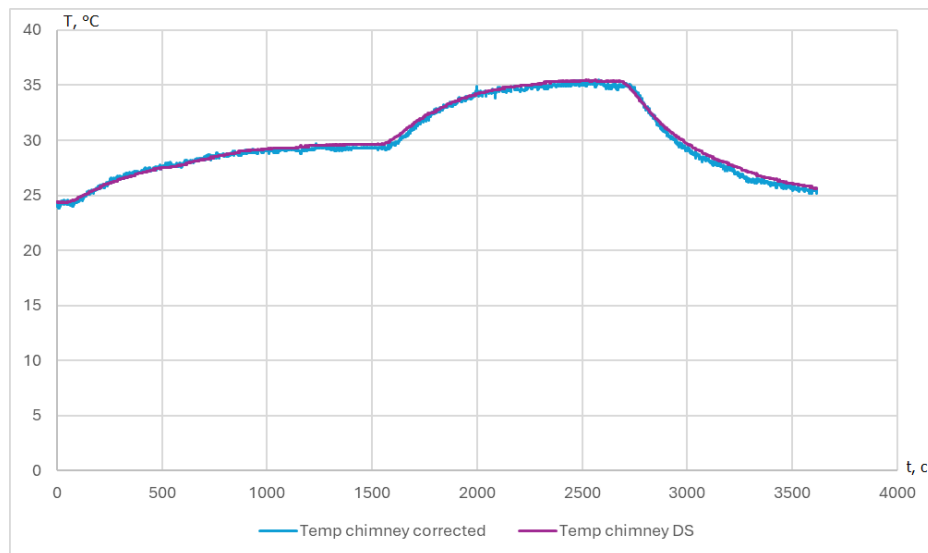


Рисунок 4.20 – Результати вимірювання температури в димовому тракті після введення динамічної поправки

Висновки:

1) для параметрів, що змінюються досить повільно (таких, як температура), за неможливості позбутися електричних та електромагнітних завад, що сильно зашумлюють показання датчиків, найкращі результати дає послідовне застосування медіанного та аперіодичного фільтрів, які майже повністю усувають коливання показань;

2) для стаціонарних процесів, де технологічний параметр змінюється дуже повільно, достатньо використовувати постійну поправку;

3) для нестационарних процесів, де параметр змінюється часто і з різною швидкістю, потрібно використовувати динамічну поправку, як б враховувала величину та знак швидкості зміни температури. Також потрібно проводити аналіз об'єкта і враховувати інші параметри, які також впливають на цю поправку.

4.5. Вимірювання швидкості повітря та її корекція

Швидкість повітря (і пов'язані з нею витрати повітря) на відміну від температури є дуже динамічно змінюваним параметром. Тому при його вимірюванні та обробці треба, з одного боку, зменшити коливання показань, а з іншого боку – не допустити надмірного уповільнення його зміни через надто сильну фільтрацію.

Оскільки для датчика швидкості повітря немає ніякої можливості перевірити правдивість його показань, будемо вважати, що вони відповідають дійсності. Для цього датчика ми будемо обирати тип фільтра, а також перевіримо, як впливає частота опитування на результати вимірювання.

Для цього зробимо вимірювання з частотами 1000, 100, 10, 6, 4 та 1 вимірювань на секунду і застосуємо до вихідних результатів медіанний, аперіодичний фільтри та фільтр Калмана.

Оскільки швидкість змінюється дуже швидко, використання медіанного фільтра не дає помітного результату, як це було для температури, тому від нього було вирішено відмовитися.

Результати вимірювання та фільтрації для різних частот та коефіцієнтів фільтрації представлені на рис. 4.21 – 4.28. Тут жовтий графік – це вхідні дані, показання датчика, червоний графік – вихід аперіодичного фільтра, фіолетовий графік – вихід фільтра Калмана. Коефіцієнт фільтрації для обох фільтрів вказаний у назві графіків.

З графіків виходить, що частота опитування досить слабо впливає на показання датчика. Якщо порівняти вхідні дані на рис. 4.21, де частота опитування 1000 раз на секунду і на рис. 4.28, де вона 1 раз на секунду, то помітної різниці між ними не видно. То ж для зменшення навантаження на мікроконтролер, що займається вимірюванням і обробкою даних, було вирішено проводити вимірювання 10 раз на секунду. Це значення було обрано тому, що ПІД регулятор, який керує

швидкістю повітря, і який буде описаний далі, працює з кроком 0,1 с, і має сенс мати на кожному кроці актуальне значення.

З іншого боку, результат дуже сильно залежить від коефіцієнта фільтрації. Якщо він недостатній, то отримані на виході фільтра значення будуть мати значні коливання (як на рис. 4.22, червоний графік), якщо ж він буде надто великим, то показання будуть сильно згладжені та не будуть відображати реальну картину зміни витрат повітря (як на рис. 4.22, фіолетовий графік). Тому треба обрати компромісне рішення, при якому коливання будуть усунені у достатній мірі, щоб регулятор міг впоратися з керуванням цим параметром, але водночас, щоб дані, що надходять на регулятор, були актуальні, а не затримані на 10-20 секунд, що є неприпустимим для такого швидкозмінного параметру.

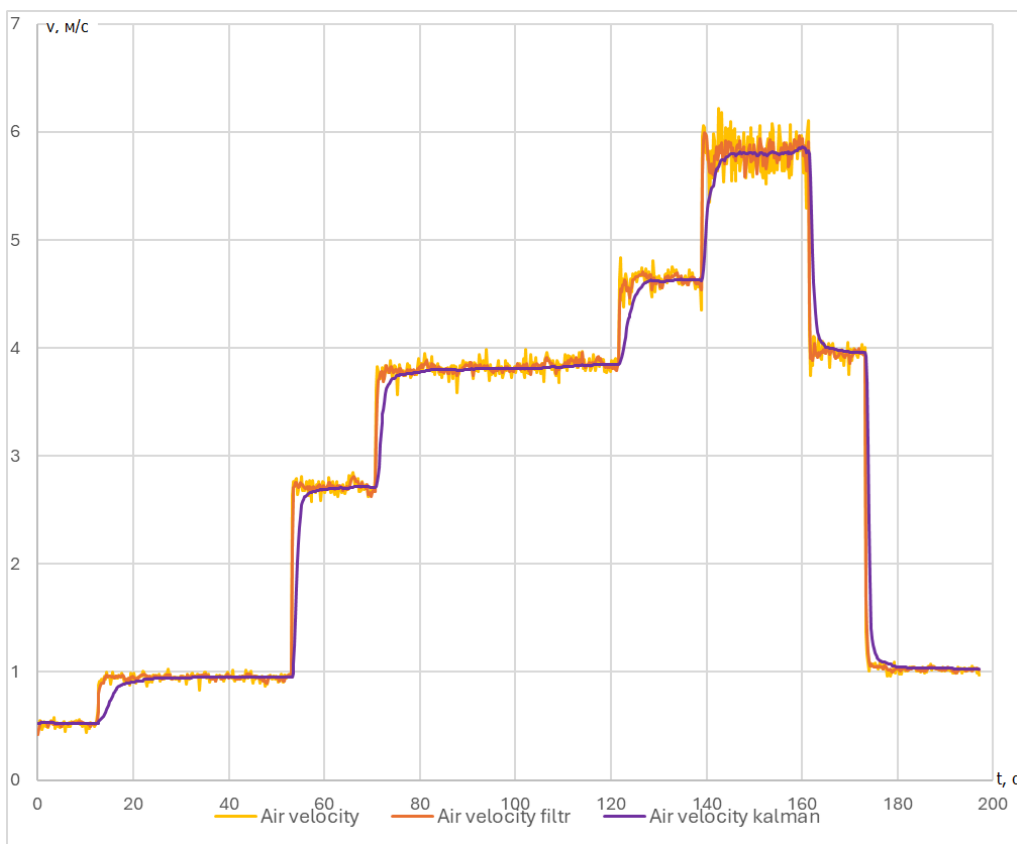


Рисунок 4.21 – Результати при частоті опитування 1000 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,005

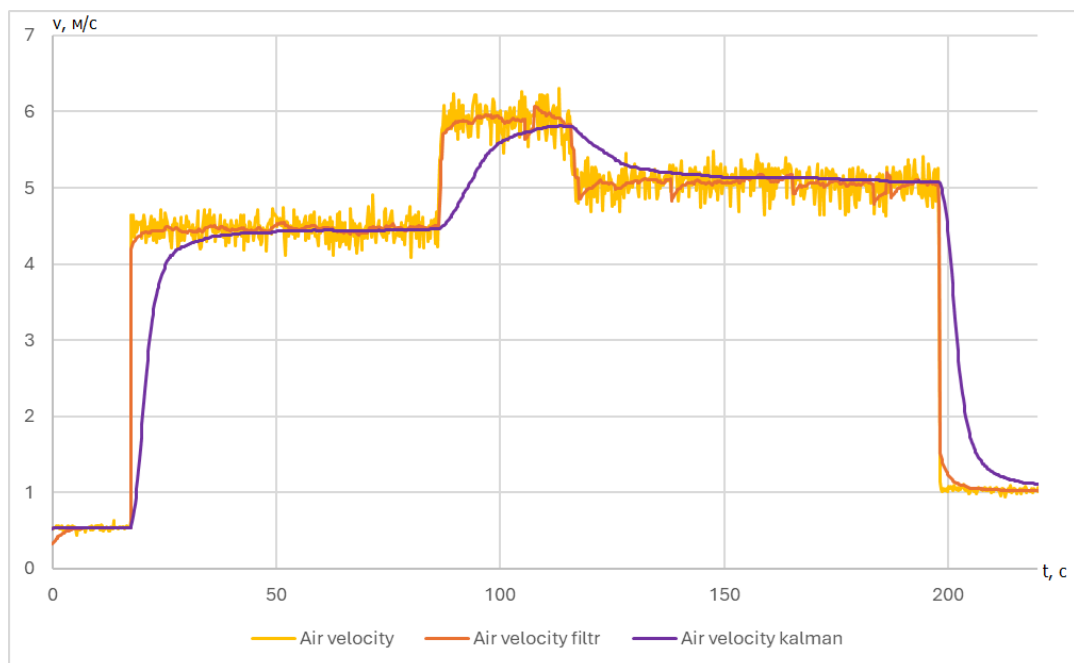


Рисунок 4.22 – Результати при частоті опитування 100 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,005

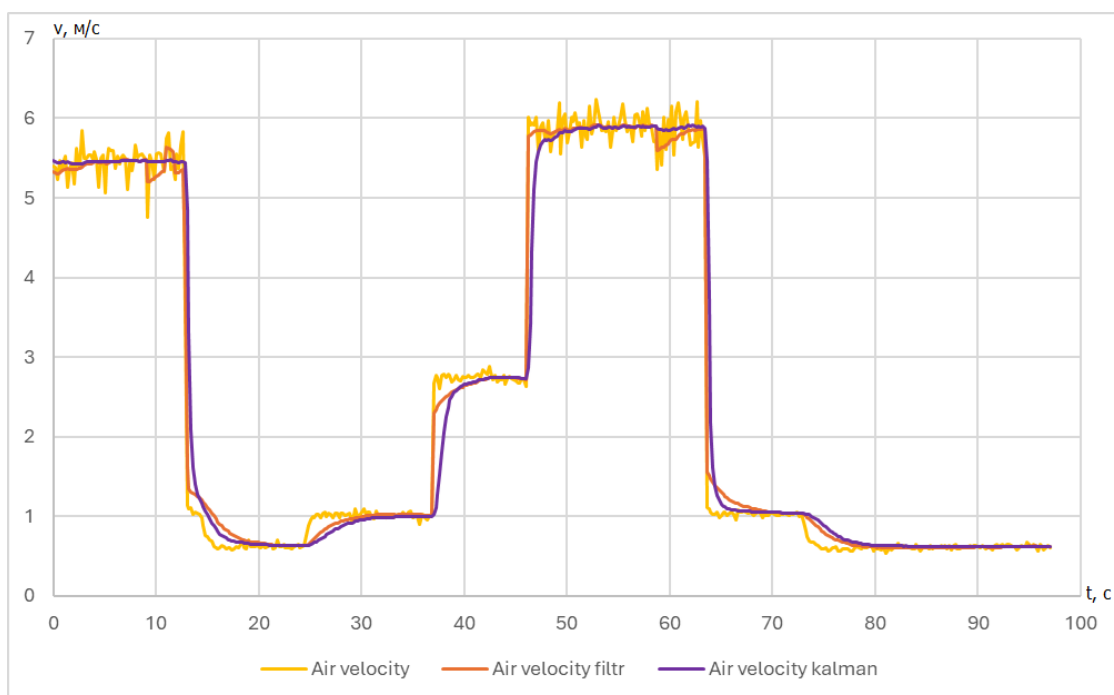


Рисунок 4.23 – Результати при частоті опитування 100 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,05

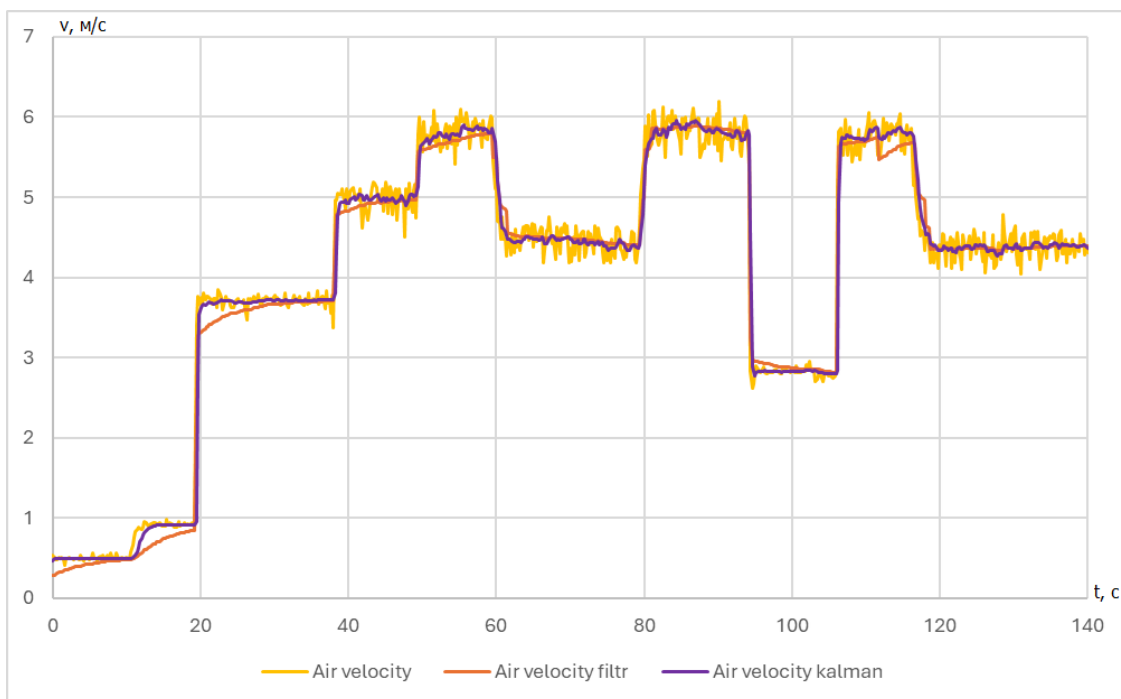


Рисунок 4.24 – Результати при частоті опитування 10 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,5

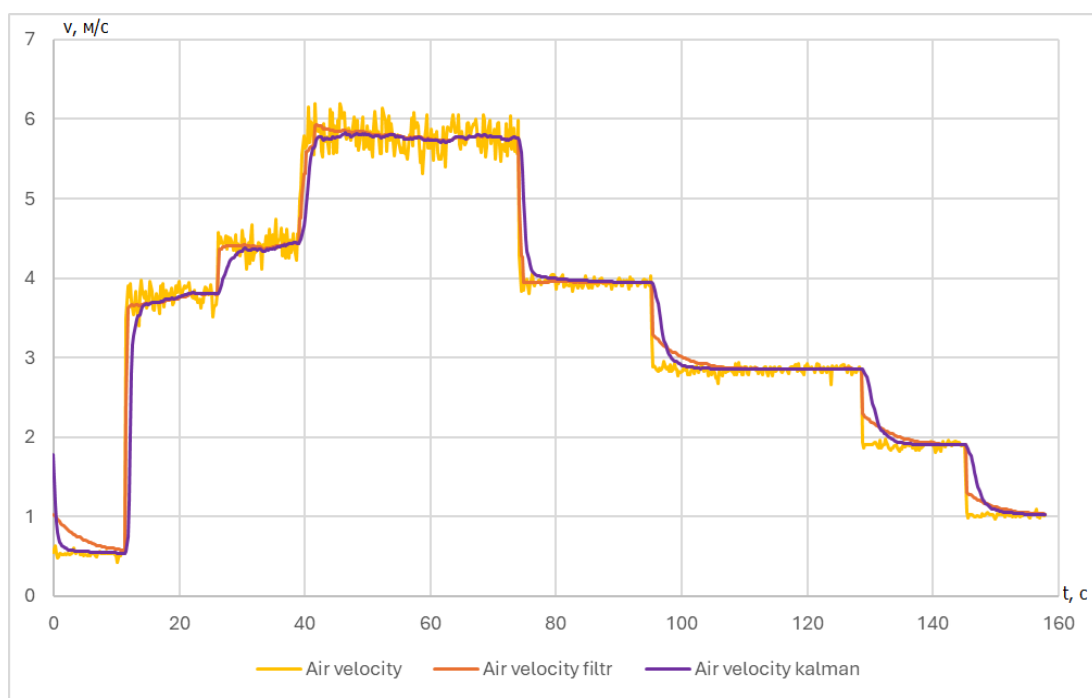


Рисунок 4.25 – Результати при частоті опитування 10 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,1

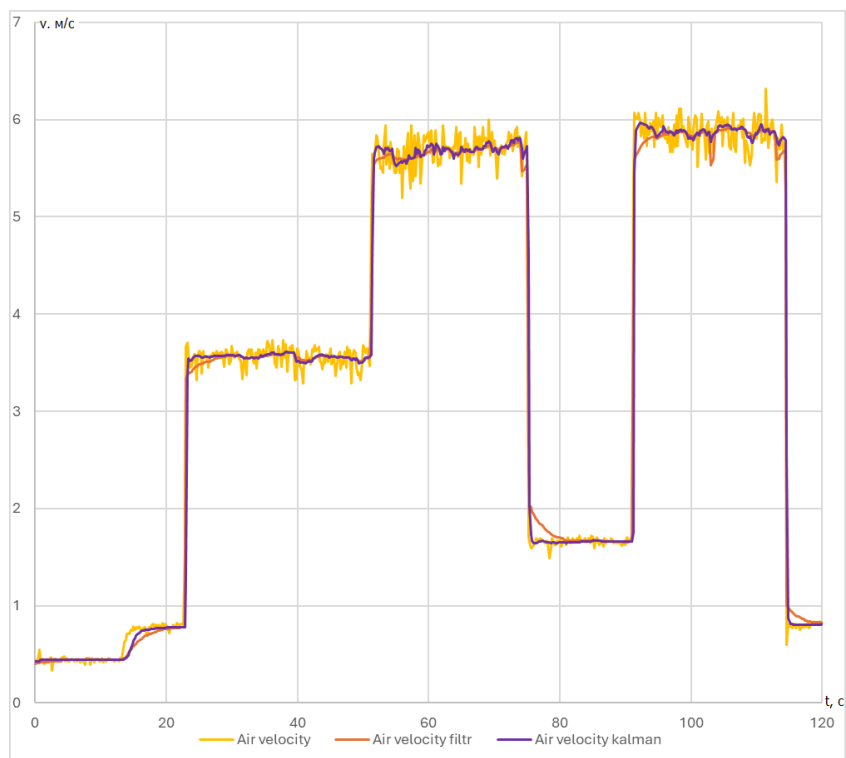


Рисунок 4.26 – Результати при частоті опитування 6 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,5

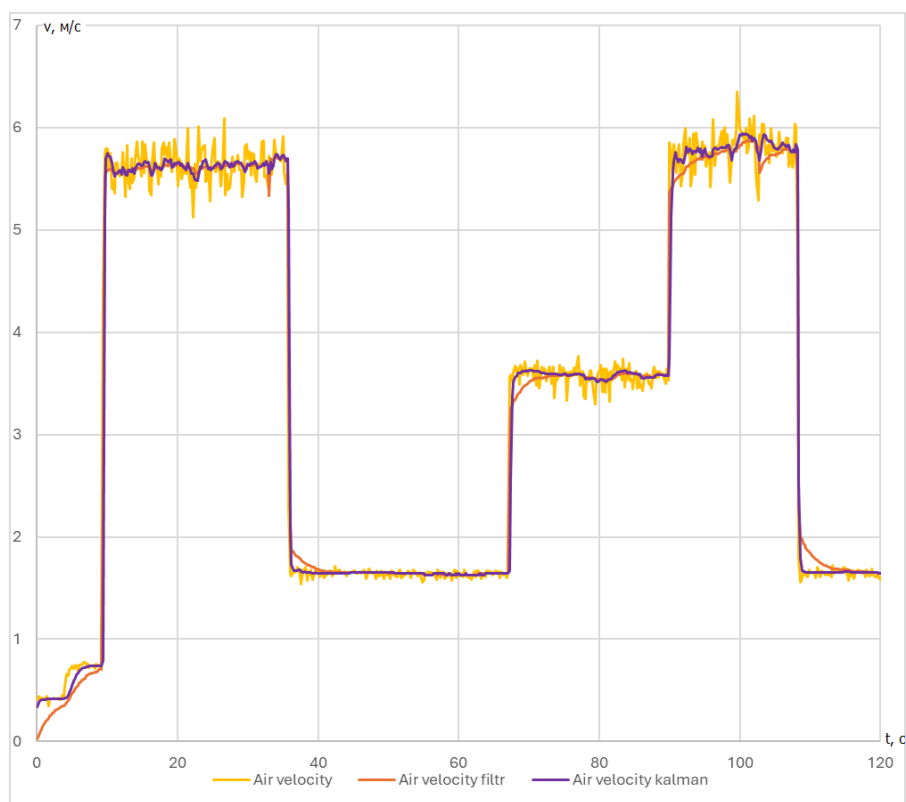


Рисунок 4.27 – Результати при частоті опитування 4 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,5

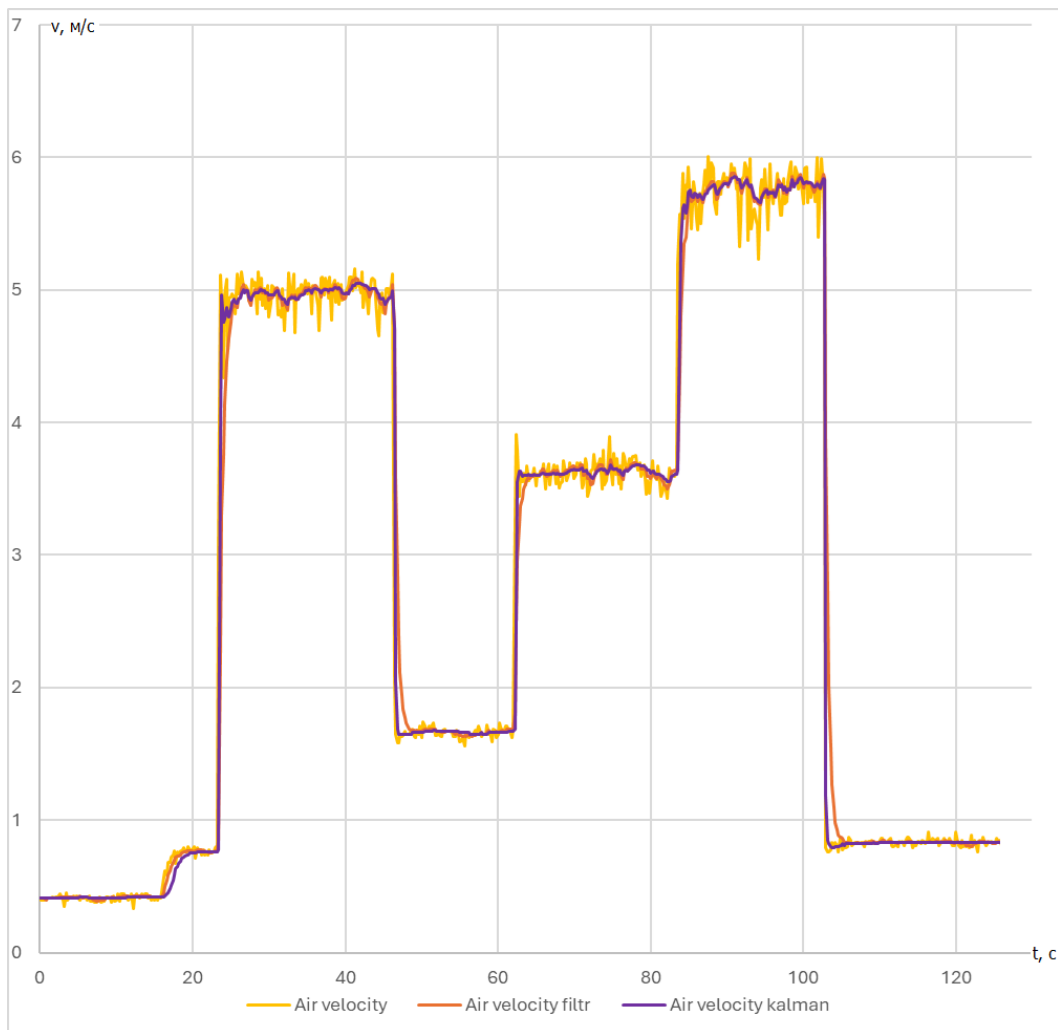


Рисунок 4.28 – Результати при частоті опитування 1 вимірювання на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,5

Серед усіх графіків найбільше відповідає цим вимогам фільтр Калмана з коефіцієнтом 0,5 при частоті опитування 10 раз на секунду (фіолетовий графік на рис. 4.24). Він реагує на швидку зміну значення параметру швидше, ніж аперіодичний фільтр, і при усталеній швидкості краще відфільтровує викиди (див. графіки на рис. 4.24).

Висновки:

1) для швидкозмінюваних параметрів (витрати, тиск, швидкість) доцільно використовувати фільтр Калмана, оскільки він при правильному налаштуванні, з одного боку, швидко реагує на значні

зміни значення параметра, а з іншого – усуває коливання при усталеному значенні параметра;

2) частота опитування майже не впливає на отримані показання, тому якщо немає нагальної потреби на надшвидке реагування на зміну параметру, можна проводити його опитування з частотою 1-10 раз на секунду.

4.6 Ідентифікація параметрів об'єкту керування

Як вже було зазначено, в якості вихідних параметрів об'єкту керування, вважатимуться температура та швидкість повітря на виході з димового тракту.

Визначимо параметри об'єкту управління методом побудовання кривих розгону для різних величин. Температура головним чином визначається електричною потужністю, що подається на нагрівач, тому побудуємо залежність температури від часу при стрибкоподібній зміні потужності нагрівача від 0% до 100% і від 100% до 0% (рис. 4.29).

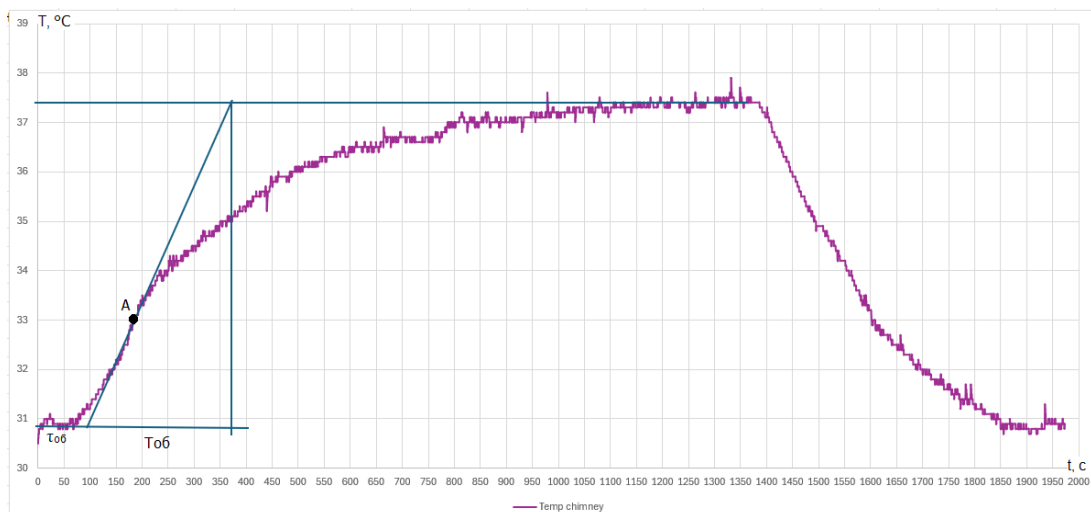


Рисунок 4.29 – Крива розгону об'єкту керування за температурою у димовому тракті

Проведемо ідентифікацію параметрів об'єкту, представивши його статичним об'єктом керування першого порядку з запізненням. Передатна функція такого об'єкту

$$W_{об}(p) = K_{об} / (1 + T_{об} p) \cdot \exp(-p \tau_{об}). \quad (4.1)$$

З рис. 4.26 можна визначити параметри об'єкту [51]:

- $K_{об} = 0,07 \text{ } ^\circ\text{C}/\%\text{ШІМ}$;
- $T_{об} = 260 \text{ с}$;
- $\tau_{об} = 100 \text{ с}$.

Що стосується швидкості повітря, то вона залежить одразу від двох параметрів: потужності вентилятора та ступеню відкриття шиберної заслінки, причому, першим параметром можна регулювати швидкість більш точно, але в більш вузькому діапазоні ($\pm 1 \text{ м/с}$), в той час, як другий параметр дозволяє змінювати швидкість у всьому діапазоні, але з меншою точністю.

Аналогічним чином побудуємо криві розгону для цього параметру за двома каналами регулюючого впливу: ступеню відкриття заслінки та потужності вентилятора (рис. 4.30).

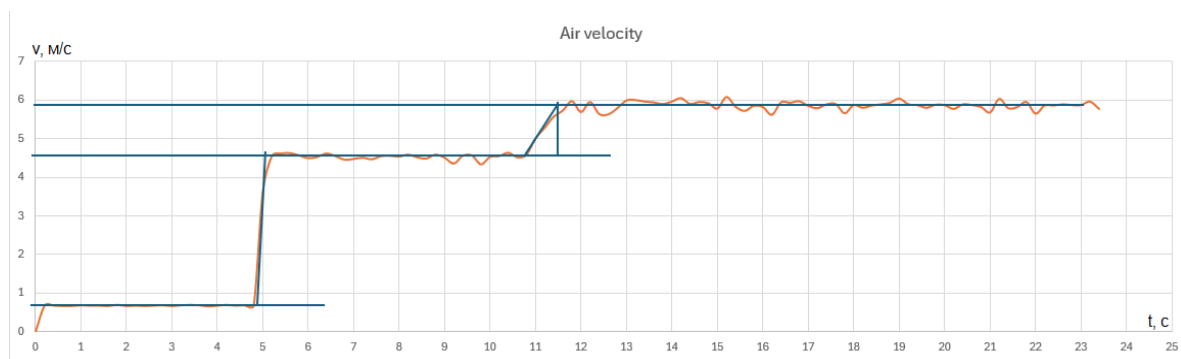


Рисунок 4.30 - Крива розгону об'єкту керування за швидкістю повітря на виході з димового тракту

На рис. 4.30 перший стрибок швидкості обумовлений зміною положення шиберної заслінки від 0% до 100%, а другий – зміною потужності вентилятора від 0% до 100%.

Як бачимо, на зміну положення шиберної заслінки швидкість реагує практично миттєво, в той час, як при зміні потужності вентилятора встановлення нового значення займає деякий час, але дуже незначний.

В даному випадку об'єкт за обома каналами керування можна вважати статичним із запізненням, і використовувати передатну функцію (4.1) тільки з наступними параметрами.

Параметри об'єкту керування при зміні положення шиберної заслінки:

- $K_{об} = 0,039 \text{ м/с/}\%ХРО$;
- $T_{об} = 0,15 \text{ с}$;
- $T_{об} = 0,01 \text{ с}$.

Параметри об'єкту керування при зміні потужності вентилятора:

- $K_{об} = 0,013 \text{ м/с/}\%ШІМ$;
- $T_{об} = 0,8 \text{ с}$;
- $T_{об} = 0,2 \text{ с}$.

Висновки:

1) канали управління температури та швидкості повітря можна представити у вигляді статичних об'єктів з запізненням;

2) для ідентифікації параметрів об'єкту можна використовувати метод побудування і обробки кривої розгону об'єкту.

4.7 Керування об'єктом за допомогою ПІД-регулятора

Знаючи параметри об'єкту управління за різними каналами керування, можна визначити параметри ПІД-регуляторів для кожного з цих каналів. Скористаємося формулами для визначення налаштувань

регулятора інженерним методом для аперіодичного перехідного процесу:

$$K_p = \frac{0,95}{K_{об} \frac{\tau_{об}}{T_{об}}}$$

$$T_i = 2,4\tau_{об} \quad (4.2)$$

$$T_d = 0,4\tau_{об}$$

Для керування температурою будемо використовувати один ПІД-регулятор з наступними параметрами:

- $K_p = 35 \text{ \%ШІМ/}^\circ\text{C}$;
- $T_i = 40 \text{ с}$;
- $T_d = 1 \text{ с}$.

Для керування швидкістю повітря будемо використовувати наступний алгоритм: керування потужністю вентилятора буде відбуватися за допомогою ПІД-регулятора. При досягненні ним крайніх положень (0% чи 100%) буде на кожному кроці відбуватися відкриття або закриття заслінки на заданий відсоток. Така система керування можлива за рахунок того, що параметри об'єкту за каналом регулювання шиберною заслінкою мають набагато меншу інерційність, ніж за каналом регулювання потужністю вентилятора. Тому перший регулятор можна замінити П-регулятором, а другий залишити ПІД, і підтримувати ним точне значення швидкості повітря. Параметри цього ПІД-регулятора наступні:

- $K_p = 300 \text{ \%ШІМ/м/с}$.
- $T_i = 0,48 \text{ с}$.
- $T_d = 0,08 \text{ с}$.

Відсоток відкриття шиберної заслінки при досягненні ПІД-регулятором крайніх положень буде підібрано експериментально, починаючи з 1%/крок.

Результати регулювання температури та швидкості з заданими параметрами представлені на рис. 4.31 – 4.34.

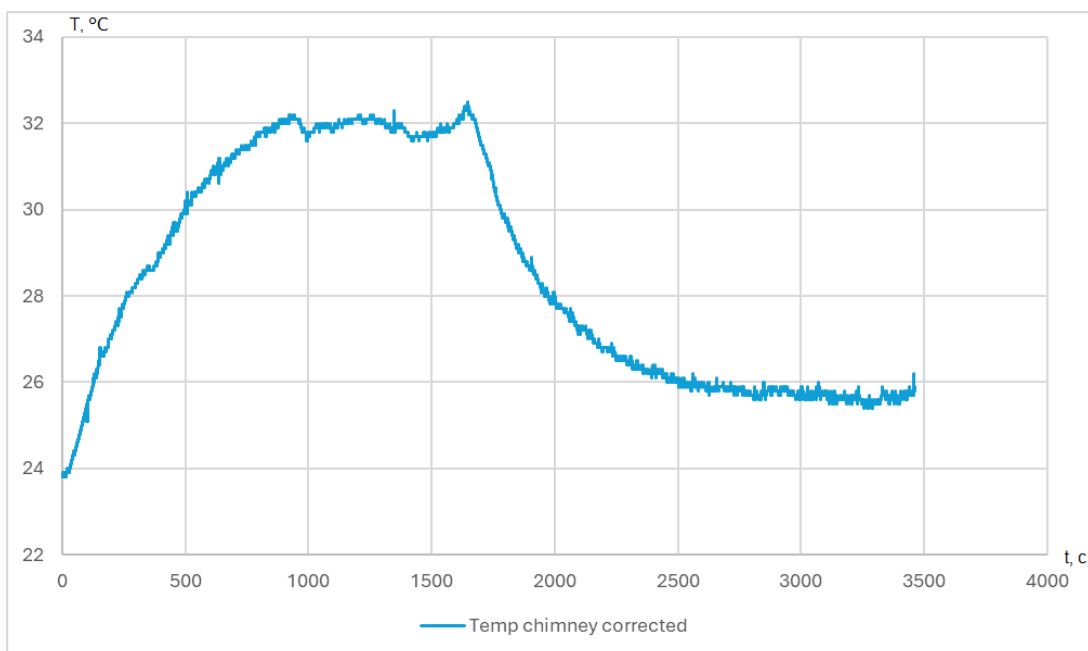


Рисунок 4.31 – Результат регулювання температури на виході з димового тракту

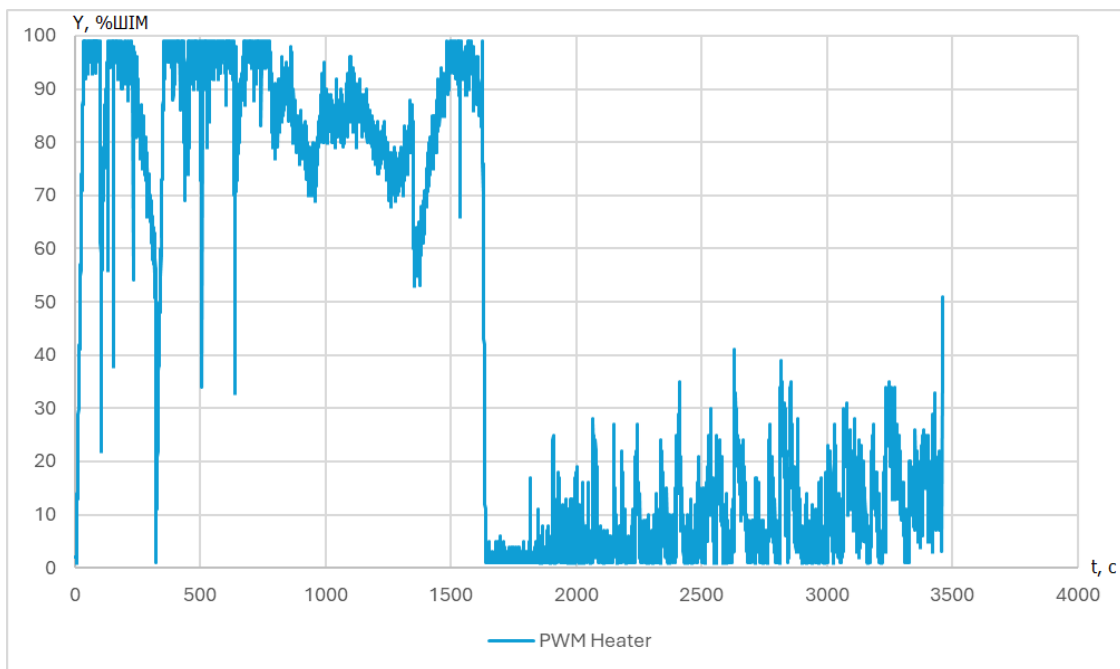


Рисунок 4.32 – Потужність нагрівача при регулюванні температури

На рис. 4.31, 4.32 показаний процес регулювання температури. Спочатку було встановлено задане значення 32 °С, а потім 25 °С. Як можна бачити, процес регулювання є коливальним, причому коливання мають місце при утриманні більш високої температури. Значення в 25 °С так і не було досягнуто бо регулятор чомусь намагався збільшити керуючий вплив (рис. 4.32).

При регулюванні швидкості повітря процес також коливальний (рис. 4.33, 4.34), при цьому на малій заданій швидкості (1 м/с) коливання стають незатухаючими. Це говорить про те, що в налаштуваннях регулятора величина T_i є недостатньо великою, і керуючий вплив змінюється швидше, ніж регульована величина, причому це стосується обох параметрів.

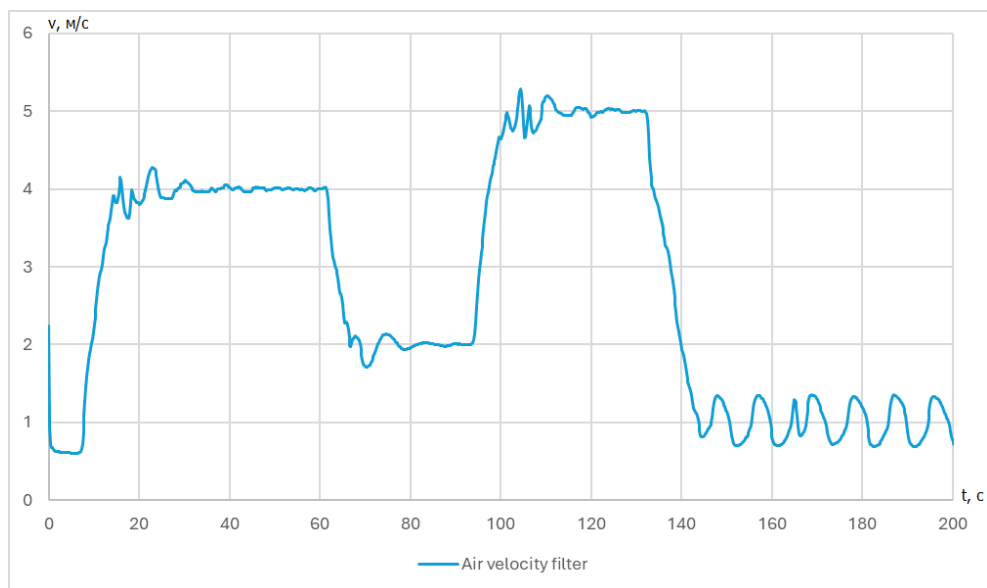


Рисунок 4.33 – Процес регулювання швидкості повітря на виході з димового тракту

Для того, щоб підібрати T_i для обох регуляторів, будемо збільшувати їхні значення з певним кроком (0,5 с для регулятора швидкості повітря і 10 с для регулятора температури) і проводити експерименти з отримання перехідних процесів. В результаті

досліджень було встановлено, що для регулятора температури найкращі результати отримуються при $T_i = 80$ с, а для регулятора швидкості повітря при $T_i = 3$ с.

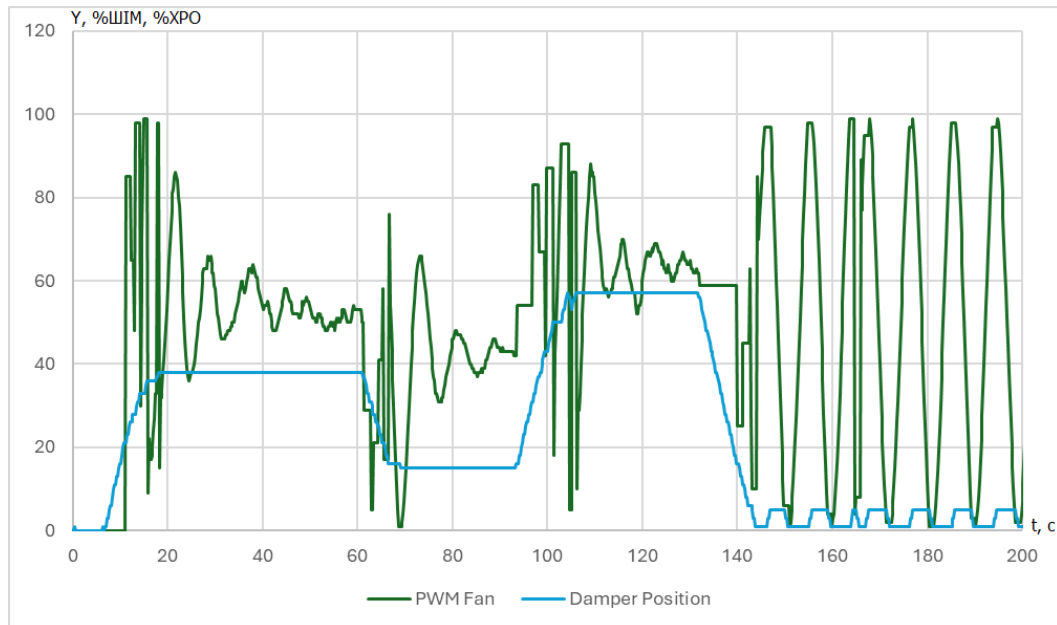


Рисунок 4.34 – Положення шиберної заслінки та потужність вентилятора при регулюванні швидкості повітря

Результати представлені на рис. 4.35, 4.36

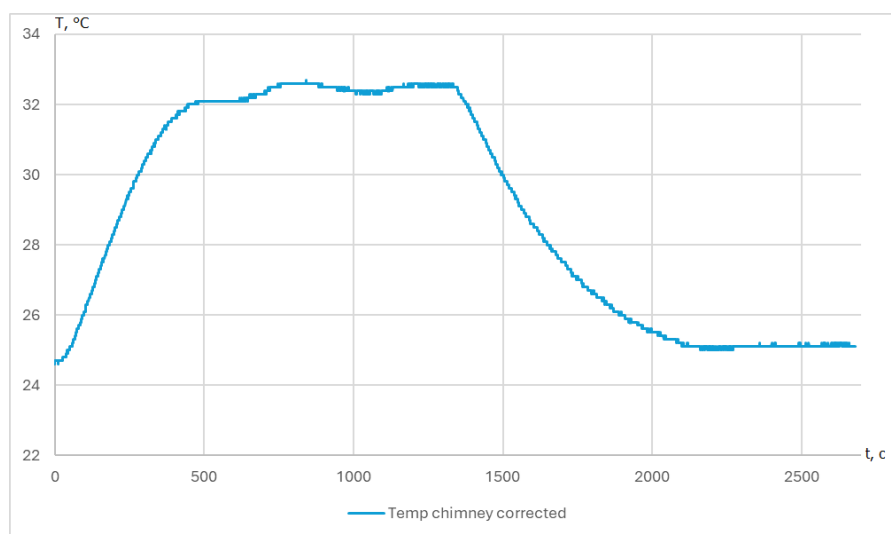


Рисунок 4.35 – Результат регулювання температури на виході з димового тракту при збільшенні часу інтегрування регулятора

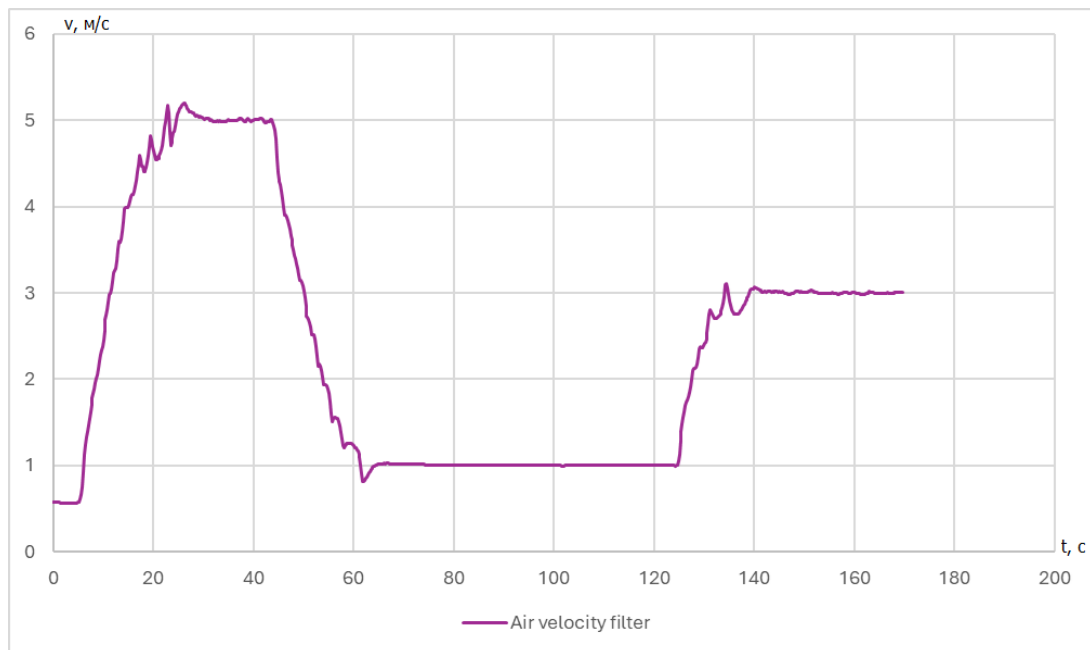


Рисунок 4.36 – Процес регулювання швидкості повітря на виході з димового тракту при збільшенні часу інтегрування регулятора

Як видно з рис. 4.35, 4.36, якість регулювання температури та швидкості повітря значно покращилися. Процеси стали значно більше схожими на аперіодичні. При регулюванні швидкості температури коливання відбуваються лише в момент активної роботи обох регуляторів, коли змінюється положення шиберної заслінки, а регулятор потужності вентилятора намагається компенсувати зміни швидкості повітря.

Висновки:

1) інженерний метод розрахунку параметрів ПІД-регулятора дає лише дуже приблизні значення, які треба додатково підлаштовувати емпіричним шляхом. Для більш точного налаштування регулятора можна використовувати більш сучасні адаптивні методи;

2) регулятор швидкості повітря є комплексним і складається з двох регуляторів – один для регулювання швидкості у широких межах за допомогою положення заслінки, і другий для точного встановлення швидкості за допомогою потужності вентилятора;

3) через високу інерційність та значну нелінійність об'єкту досить складно підібрати такі параметри регулятора температури, щоб вони давали задовільний результат у всьому діапазоні регулювання. Рекомендується використовувати ПІД-регулятор з адаптивними параметрами або інший тип регулятора, наприклад на нечіткій логіці.

4.8 Створення математичної моделі об'єкту керування

Для математичного опису об'єкту управління можна використовувати декілька підходів.

1) на основі фізичного опису процесів, що відбуваються всередині об'єкту. Такий підхід може дати високу точність, але потребує доброго розуміння аеродинаміки та теплообміну і, окрім того, визначення певної кількості емпіричних коефіцієнтів;

2) на базі спрощеної математичної моделі, представивши об'єкт як сукупність елементарних ланок. Такий підхід має меншу точність, але при правильному знаходженні параметрів ланок та механізму їх зв'язку може дати добрий результат;

3) на базі штучної нейронної мережі. В такому випадку треба зробити велику кількість вимірювань при різних значеннях регулюючих параметрів, щоб набрати достатню кількість даних для навчання мережі. Враховуючи велику інерційність об'єкту за температурою (див. розділ 4.6), це може зайняти велику кількість часу.

Автори обрали другий варіант, який є відносно простим, але дає достатню точність, то ж може слугувати добрим прикладом створення цифрового двійника об'єкта керування.

При побудові моделі для спрощення будемо вважати, що температура в об'єкті та в димовому борові здебільшого залежить від поточної потужності нагрівача, а швидкість повітря на виході залежить в рівній мірі і від положення заслінки, і від потужності вентилятора.

В розділі 4.6 були визначені параметри об'єктів при представленні їх в якості послідовного з'єднання аперіодичної ланки та ланки запізнення. Для швидкості повітря такий підхід є виправданим через невелику інерційність. А для температури треба додати ще одну аперіодичну ланку з коефіцієнтом передачі 1, але з додатковою постійною часу T_2 , щоб врахувати сильну інерційність цього параметру. Величину T_2 було знайдено емпіричним шляхом.

Таким чином, передатна функція об'єкту за каналом температури

$$W_T(p) = \frac{K_T}{T_{T1}p+1} \frac{1}{T_{T2}p+1} e^{-p\tau_T}, \quad (4.3)$$

а за каналом швидкості повітря

$$W_{\Pi}(p) = \frac{K_{\Pi3}}{T_{\Pi3}p+1} e^{-p\tau_{\Pi3}} + \frac{K_{\PiВ}}{T_{\PiВ}p+1} e^{-p\tau_{\PiВ}}, \quad (4.4)$$

де K_m , T_{m1} , T_{m2} та τ_m – відповідно, коефіцієнт передачі, постійні часу та час запізнення об'єкту за каналом потужність нагрівача – температура;

$K_{\Pi3}$, $T_{\Pi3}$, та $\tau_{\Pi3}$ – відповідно, коефіцієнт передачі, постійна часу та час запізнення об'єкту за каналом положення заслінки – швидкість повітря;

$K_{\PiВ}$, $T_{\PiВ}$, та $\tau_{\PiВ}$ – відповідно, коефіцієнт передачі, постійна часу та час запізнення об'єкту за каналом потужність вентилятора – швидкість повітря.

При підставленні значень параметрів, отриманих у розділі 4.6, отримуємо наступні результати моделювання (рис. 4.37, 4.38).

Як можна бачити з рис. 4.37 та 4.38, результати моделювання та реальні дані сильно відрізняються. Шляхом додаткових експериментів було виявлено, що параметри об'єкту є сильно нелінійними. То ж було вирішено зробити модель зі змінними параметрами. Для цього було побудовано декілька кривих розгону об'єкту за методикою, описаною в розділі 4.6, але при зміні потужності нагрівача та вентилятора і положення заслінки не з кроком 100%, а з кроком 20%.

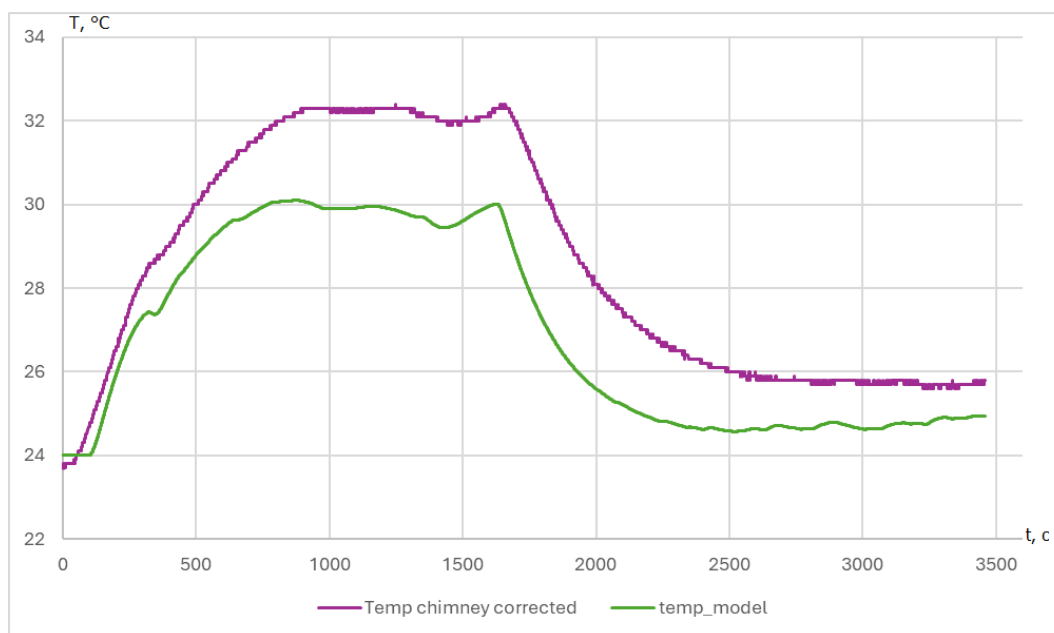


Рисунок 4.37 – Порівняння реальної температури повітря в димовому тракті з результатами моделювання

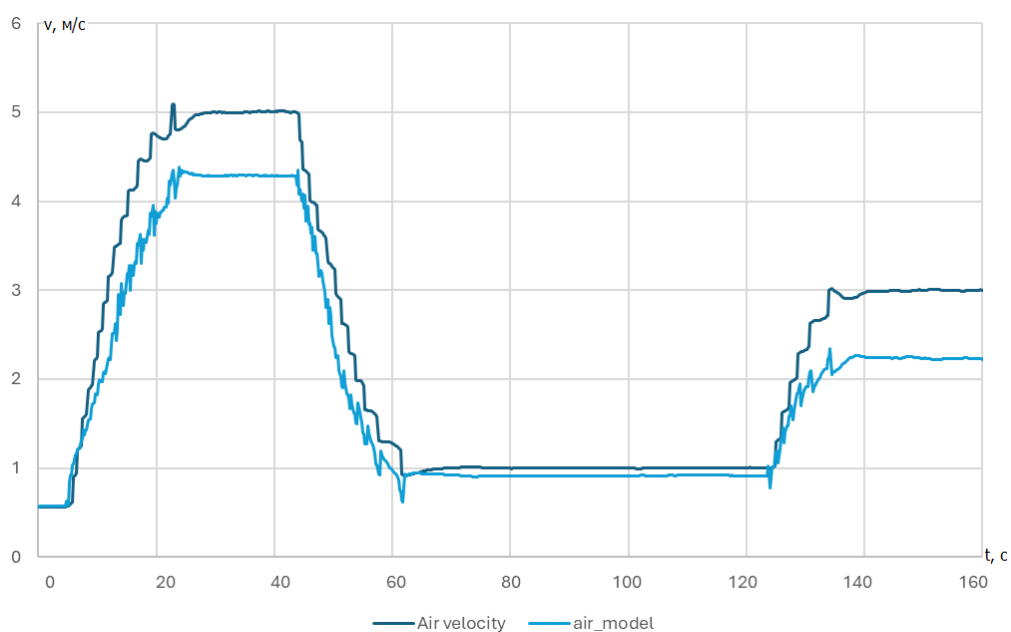


Рисунок 4.38 – Порівняння реальної швидкості повітря на виході з димового тракту з результатами моделювання

В результаті було знайдено параметри об'єктів для різних діапазонів керуючих впливів. При їх підставленні в моделі (4.3) та (4.4) було отримано наступні результати моделювання (рис. 4.39, 4.40).

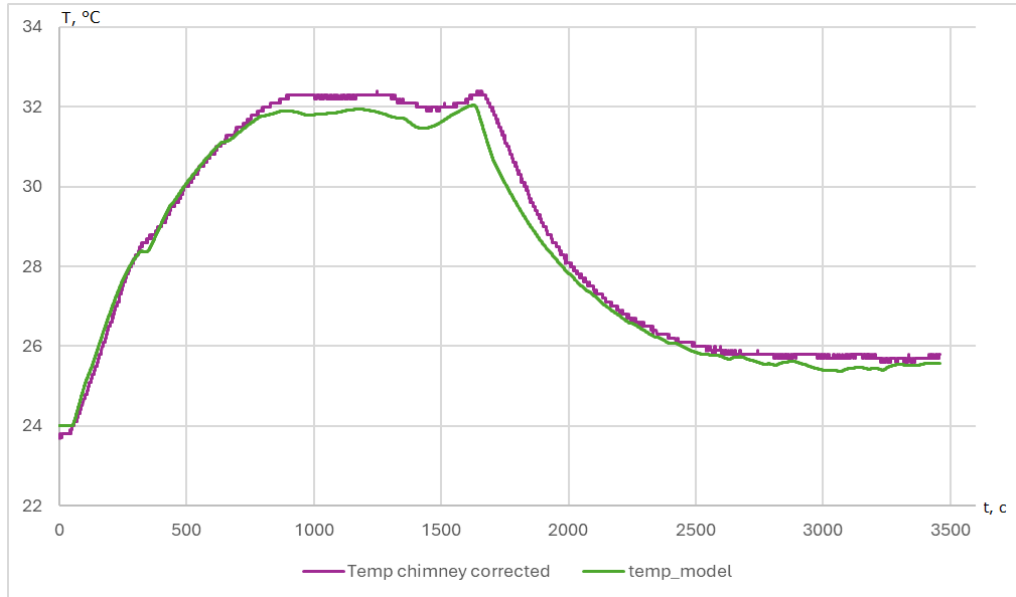


Рисунок 4.39 – Порівняння реальної температури повітря в димовому тракті з результатами моделювання при змінних параметрах об'єкту

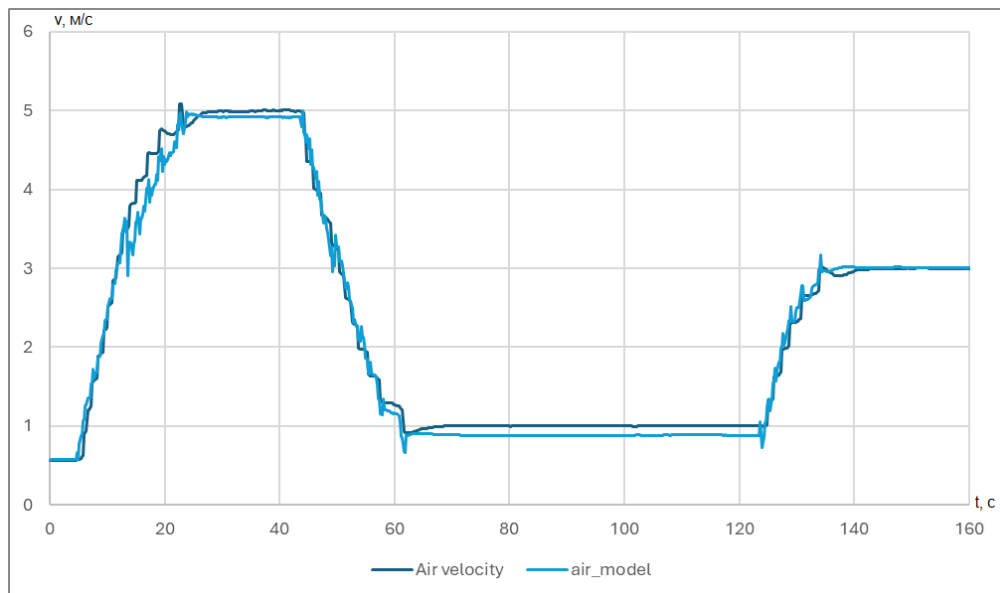


Рисунок 4.40 – Порівняння реальної швидкості повітря на виході з димового тракту з результатами моделювання при змінних параметрах об'єкту

Як видно з рис. 4.39 та 4.40, при використанні змінних параметрів об'єкту результати моделювання наближаються до реальних значень з досить високим ступенем точності. В цій спрощеній моделі використовувалися лише залежності між параметрами та найбільш впливовими керуючими впливами, але якщо додати в формули (4.3) та (4.4) всі керуючі впливи, можна отримати ще більш точне наближення результатів моделювання до реальних значень.

Висновки:

1) при створенні математичної моделі об'єкту керування можна використовувати різні підходи, але навіть відносно проста модель при представленні параметрів у вигляді сукупності елементарних ланок, дає досить точний результат при правильному налаштуванні її коефіцієнтів;

2) через значну нелінійність об'єкту управління доцільно визначити його параметри на декількох діапазонах зміни регулюючого впливу, і потім підставляти ці знайдені параметри в модель в залежності від регулюючого впливу;

3) чим більша кількість пов'язаних параметрів задіяна при створенні моделі, тим краще буде її точність. Наприклад, на швидкість повітря в незначній мірі впливає і потужність нагрівача, і температура повітря.

4.9 Висновки за розділом

В цій роботі було створено фізичну модель об'єкту управління з декількома різнорідними параметрами, що змінюються як повільно (температура повітря), так і швидко (швидкість повітря), а також взаємопов'язані між собою. При створенні фізичної моделі виникла декілька проблем пов'язаних з невірно обраними датчиками. Довелося відмовитися від вимірювання тиску, адже надлишковий тиск в об'єкті порівняний за величиною з роздільною здатністю датчиків. Також

термопари, які були спочатку використані для вимірювання температури, довелося замінити на термометри опору через значний взаємний вплив і завади.

Було розглянуто питання обробки вхідних даних для отримання результатів, придатних для подальшої передачі в систему керування. Було виявлено, що для параметрів, що змінюються досить повільно (таких, як температура), за неможливості позбутися електричних та електромагнітних завад, що сильно зашумлюють показання датчиків, найкращі результати дає послідовне застосування медіанного та аперіодичного фільтрів, які майже повністю усувають коливання показань. Крім того, для процесів, де температура змінюється часто і з різною швидкістю, потрібно використовувати динамічну поправку, яка б враховувала величину та знак швидкості її зміни. Також потрібно проводити аналіз об'єкта і враховувати інші параметри, які також впливають на цю поправку. Якщо ж сигнал є чистим, без шуму, фільтрацію можна не використовувати зовсім, або застосувати медіанний фільтр, який захистить від випадкових стрибків. Введення ж поправки є незалежним від фільтрації, і може бути застосовано за необхідності зміщення або масштабування сигналу.

Для швидкозмінюваних параметрів (витрати, тиск, швидкість) доцільно використовувати фільтр Калмана, оскільки він при правильному налаштуванні, з одного боку, швидко реагує на значні зміни значення параметра, а з іншого – усуває коливання при усталеному значенні параметра. Також було виявлено, що частота опитування майже не впливає на отримані показання, тому якщо немає нагальної потреби на надшвидке реагування на зміну параметру, можна проводити його опитування з частотою 1-10 раз на секунду. Зазвичай такі параметри змінюються дуже швидко, і навіть за використання швидкодіючого та високоточного датчика вимірювані значення будуть сильно коливатися, тому використання фільтра в цьому випадку є

обов'язковим. Введення поправки є бажаним, якщо є зразковий прилад, який дозволяє виміряти дійсне значення параметру з високою точністю. При цьому через високу швидкість перехідних процесів використання динамічної поправки є недоцільним, оскільки тривалість перехідного процесу порівняна з часом опитування датчику. Тому тут варто обмежитися лише статичною поправкою.

Було проведено ідентифікацію параметрів об'єкта керування та розрахунок параметрів регуляторів. При цьому канали управління температури та швидкості повітря були представлені як статичні об'єкти з запізненням. Для ідентифікації параметрів об'єкта був використаний метод побудування і обробки кривої розгону об'єкта. Для розрахунку параметрів ПІД-регулятора був застосований інженерний метод, але він дає лише дуже приблизні значення, які треба додатково підлаштовувати емпіричним шляхом. Окрім того, регулятор швидкості повітря є комплексним і складається з двох регуляторів – один для регулювання швидкості у широких межах за допомогою положення заслінки, і другий для точного встановлення швидкості за допомогою потужності вентилятора. Через значну нелінійність об'єкта досить складно підібрати такі параметри регуляторів, щоб вони давали задовільний результат у всьому діапазоні регулювання. Тому рекомендується використовувати ПІД-регулятори з адаптивними параметрами або інший тип регулятора, наприклад на нечіткій логіці.

Була створена математична модель об'єкта керування. Для її побудови можна використовувати різні підходи, такі як опис фізичних процесів, що відбуваються в об'єкті або використання нейронних мереж, але навіть відносно проста модель при представленні параметрів у вигляді сукупності елементарних ланок, дає досить точний результат при правильному налаштуванні її коефіцієнтів. Через значну нелінійність об'єкта управління було визначено його параметри на декількох діапазонах зміни регулюючого впливу, і потім ці параметри

використовувалися в моделі в залежності від величини регулюючого впливу. Чим більша кількість пов'язаних параметрів задіяна при створенні моделі, тим краще її точність. Наприклад, на швидкість повітря в незначній мірі впливає і потужність нагрівача, і температура повітря, то ж при їх врахуванні можна досягти високої точності роботи моделі та повторюваності результатів при різних комбінаціях технологічних параметрів.

Результати роботи опубліковані [51].

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

Загальний знос машинного парку, через ряд об'єктивних причин, може досягти такого рівня, за якого традиційна статистична база, що застосовувалася для планування планового запобіжного ремонту (ПЗР), втратить свою ефективність. У зв'язку з цим виникає потреба ухвалення рішень щодо безпечної експлуатації техніки на основі актуального технічного стану машин, визначеного за допомогою інструментальної діагностики без необхідності демонтажу вузлів.

Одним із потенційних шляхів підвищення надійності дорогого обладнання є моделювання основних вузлів і приводних систем роторних екскаваторів з урахуванням ключових динамічних навантажень, а також впровадження спеціалізованих методів технічного діагностування.

Розроблення та застосування точних моделей та ефективних методик діагностики дозволить отримати реальну картину взаємодії основних функціональних елементів роторного екскаватора, а також виявити чинники, що негативно впливають на його працездатність. Така інформація є надзвичайно важливою для інженерів і виробників нових модифікацій цього обладнання, оскільки раніше подібні дані були недоступні.

Мета дослідження – підвищення ефективності використання, подовження строку служби та зниження ризику виникнення аварій завдяки розробці й впровадженню методики технічного діагностування ключових вузлів і механізмів роторного екскаватора.

Об'єктом дослідження є роторний екскаватор ЭР-5250, термін експлуатації якого перевищує заводський норматив.

Предмет дослідження – методика технічного діагностування редукторів роторного екскаватора.

Методика досліджень. Дослідження проводились із застосуванням методів прикладної механіки, системного аналізу технічних систем; технічної діагностики.

Новизна отриманих результатів. Розроблена методика оцінки технічного стану без розбирання основних вузлів та механізмів роторного екскаватора.

Практична значущість. Запропоновано систему обслуговування основних механізмів, яка базується на аналізі фактичного технічного стану й передбачає – здійснення контролю технічного стану основних вузлів і агрегатів без демонтажу з використанням діагностичних засобів, відповідно до термінів, рекомендованих виробником. Використання систем технічної діагностики дозволить значним чином скоротити витрати на обслуговування і ремонт, а також забезпечити вищий рівень технічної експлуатації основних механізмів.

Реалізація запропонованої методики дозволить організаціям, що експлуатують техніку безперервної дії (роторні екскаватори), підвищити експлуатаційну надійність, збільшити термін служби та міжремонтний період.

5.1 Постановка задачі дослідження

Аналіз відмов редукторів свідчить, що переважна більшість несправностей (близько 80–85%) спричинена експлуатаційним зношуванням тертьових вузлів. Інші причини включають механічні пошкодження деталей, їх злам або зріз, порушення регулювань, а також дефекти фарбування тощо. Отримані результати свідчать про необхідність створення засобів безрозбірної діагностики зносу ключових компонентів редукторів роторного екскаватора.

У зв'язку з цим одним з пріоритетних напрямів підвищення ефективності технічної експлуатації є вдосконалення систем технічного обслуговування та ремонту шляхом впровадження сучасних методів діагностування. Це дозволить здійснити перехід до обслуговування й ремонту механізмів роторного екскаватора великої потужності на основі контролю їх фактичного технічного стану з урахуванням індивідуальних особливостей кожного вузла.

Суттєві відмінності в умовах експлуатації ключових механізмів роторних екскаваторів, підвищені вимоги до їхньої надійності, а також конструктивне розміщення цих механізмів зумовлюють необхідність індивідуалізованого підходу при переході на обслуговування за фактичним технічним станом.

У загальному розумінні мета технічного обслуговування полягає у забезпеченні стабільної працездатності обладнання в межах допустимих параметрів протягом усього терміну експлуатації при оптимальних витратах часу та ресурсів.

До основних функцій технічного обслуговування належать:

- а) моніторинг і контроль поточного технічного стану обладнання;
- б) визначення необхідності проведення технічного обслуговування або ремонту;
- в) виконання профілактичних та ремонтно-відновлювальних заходів;
- г) організація та управління процесами технічного обслуговування й ремонту.

Запровадження системи обслуговування основних механізмів, яка базується на аналізі фактичного технічного стану має передбачати наступне:

- здійснення контролю технічного стану основних вузлів і агрегатів без демонтажу з використанням діагностичних засобів, відповідно до термінів, рекомендованих виробником;

– встановлення потреби у проведенні технічного обслуговування або ремонту на основі результатів діагностики, а не згідно з жорстко регламентованим графіком;

– виконання профілактичних, ремонтних та відновлювальних робіт згідно з отриманими даними про технічний стан.

Зрозуміло, що використання систем технічної діагностики дозволить значним чином скоротити витрати на обслуговування і ремонт, а також забезпечити вищий рівень технічної експлуатації основних механізмів.

Структурна схема обслуговування й ремонту з урахуванням засобів діагностування (рис. 5.1) чітко демонструє переваги такого підходу до експлуатації обладнання.

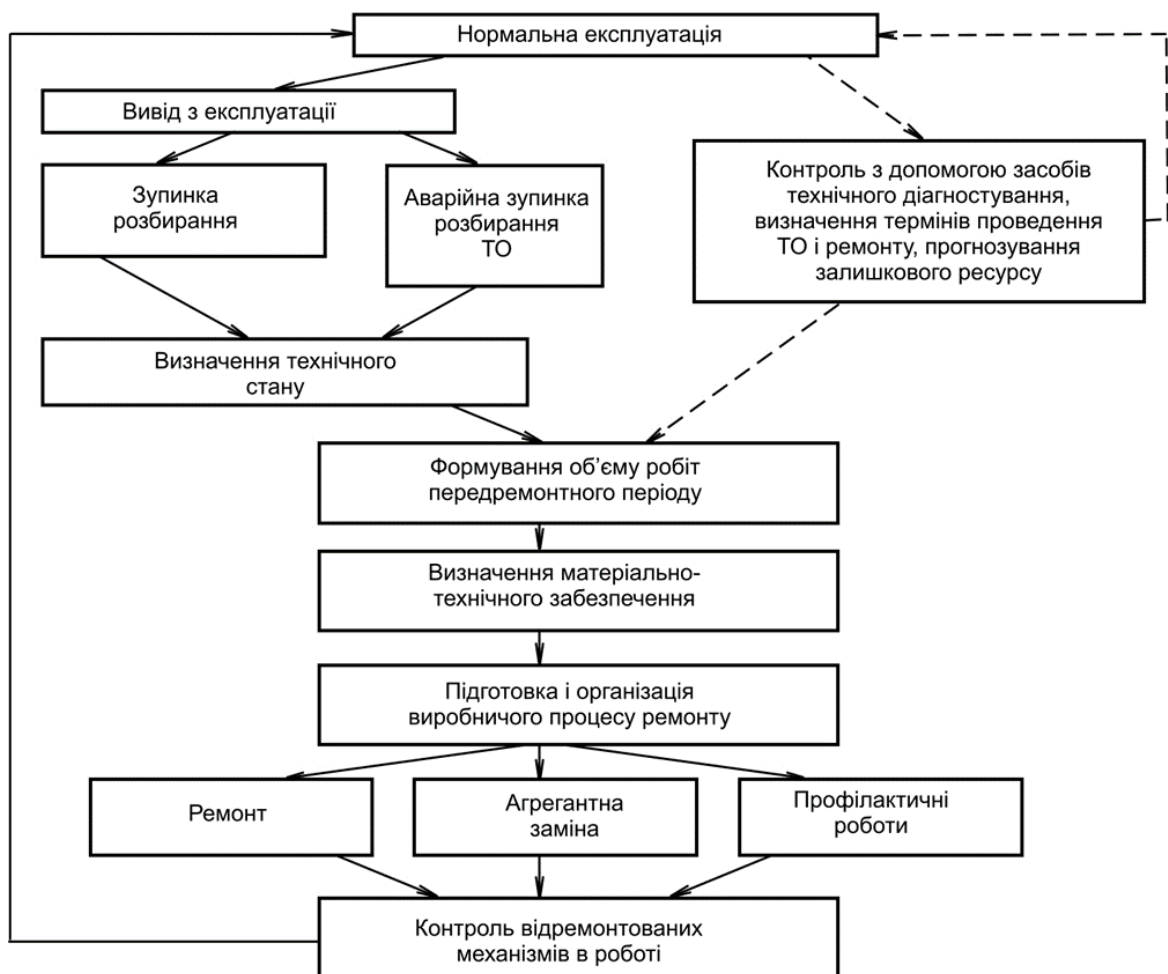


Рисунок 5.1 - Принципова схема технічного обслуговування та ремонту з використанням засобів технічного діагностування

5.2 Вибір параметрів діагностики редуктора ротора екскаватора

У процесі експлуатації редуктор роторного екскаватора зазнає впливу різноманітних енергетичних чинників, таких як механічне навантаження, температурні коливання, вібрації тощо. Ці фактори викликають у його вузлах і деталях процеси, які поступово погіршують їхні початкові характеристики. Зазвичай такі зміни пов'язані зі складними фізико-хімічними явищами, результатом яких є зношування, деформації, корозія та інші пошкодження.

До основних причин порушення нормальної роботи редуктора можна віднести знос підшипників валів та зубчастих з'єднань. Ці дефекти спричиняють зміну робочих параметрів, зокрема зменшення переданої потужності, зниження механічного ККД тощо, що безпосередньо свідчить про погіршення технічного стану механізму.

Редуктор роторного екскаватора можна розглядати як систему, яка перетворює вхідну енергію на корисну вихідну, необхідну для виконання технологічного процесу. У ході цього перетворення відбуваються немінучі втрати — механічної, теплової енергії, а також матеріальні втрати через зношування. Крім цього, на роботу редуктора впливають зовнішні збурення, зокрема вібраційні й теплові, які змінюють умови протікання процесів у його вузлах.

На рис. 5.2 представлено схему створення потоку енергії у редукторі роторного екскаватора. Схема візуально відображує основні зв'язки між вхідними та вихідними параметрами, причому ми враховуємо такий показник, як енергетичні втрати, а також вплив зовнішнього середовища.

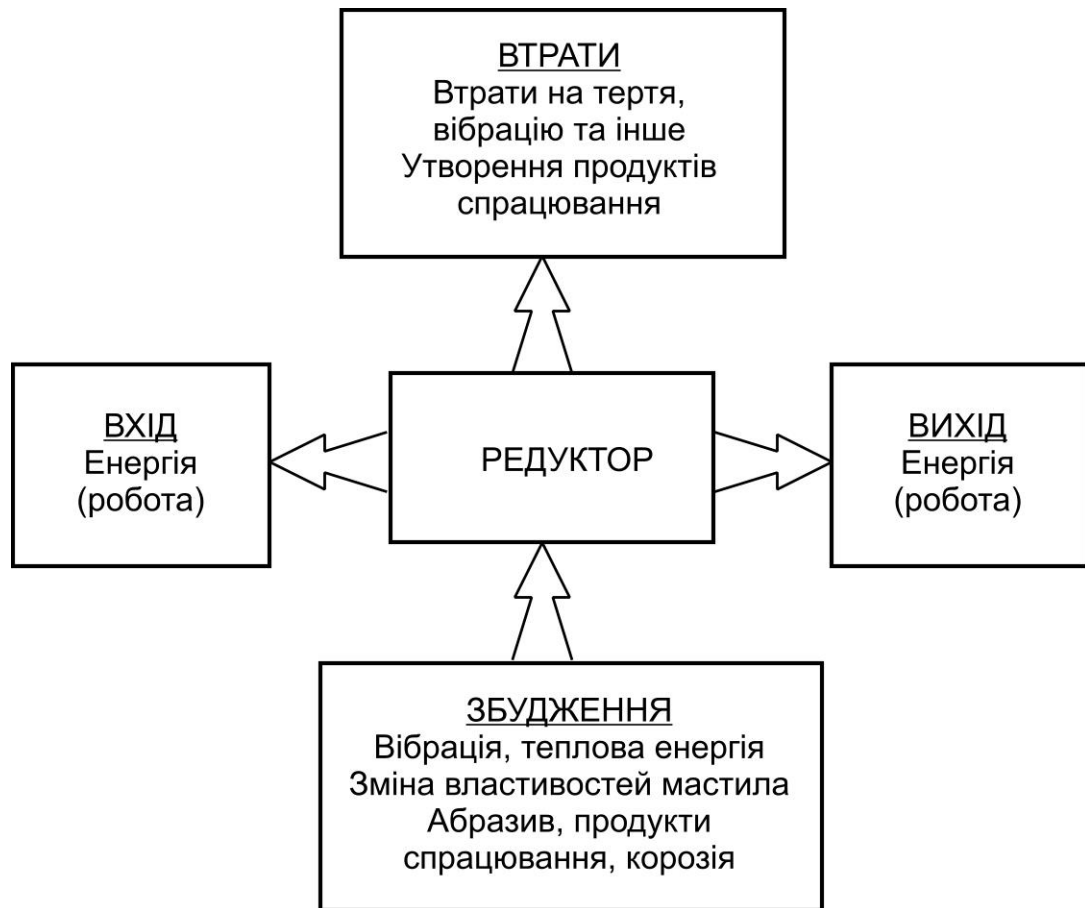


Рисунок 5.2 - Схематичне відображення потоку енергії в редукторі роторного екскаватора

Бачимо, що потік енергії крізь конструктивні елементи редуктора - це, практично, процес перенесення з деякими змінами. Зміни обумовлюються втратами.

Якщо врахувати відому теорію енергетичного обміну [52], то можна стверджувати, що пошкодження системи виникає тоді, коли кількість енергії, яку вона обмінює із зовнішнім середовищем, перевищує встановлене допустиме значення. Рівень обміну прийнято оцінювати обсягом чи швидкістю передавання енергії.

З урахуванням зазначеного, прийmemo, що фіксація втрат корисної енергії дає підстави для твердження про наявність певних пошкоджень у редукторі.

Рекомендація: використовуємо рівень втрат енергії як основний діагностичний параметр, який надає інформацію про технічний стан.

Окрім характеристик, що визначають ступінь енергетичної взаємодії з навколишнім середовищем, технічний стан редуктора можна оцінювати й за іншими параметрами. Наприклад, люфту між вихідним і вхідним валами, рівень власного електричного потенціалу, який виникає в області зачеплення зубців [52].

На основі аналізу [53, 54, 55] процесу формування діагностичних ознак та огляду літературних джерел, присвячених методам оцінювання технічного стану зубчастих передач, для контролю редуктора роторного екскаватора великої одиничної потужності доцільно використовувати такі показники: механічний ККД, рівень вібраційної активності редуктора, температурний стан його складових, концентрацію продуктів зношування в мастильному матеріалі, зазор між вихідним і вхідним валами, а також величину електричної напруги, що генерується в зоні зубчастого зачеплення.

Проте не всі зазначені діагностичні параметри однаково ефективні для контролю стану редуктора роторного екскаватора. Це пояснюється відмінностями у точності, надійності отриманих даних і складністю реалізації методів вимірювання в умовах експлуатації.

Для вибору найбільш доцільних параметрів, які б відповідали критеріям інформативності, достовірності та технологічної доцільності, необхідно здійснити дослідження їх діагностичної значущості та практичної придатності.

Щоб визначити найбільш інформативні та придатні до контролю діагностичні параметри редуктора роторного екскаватора, необхідно здійснити порівняльний аналіз відібраних показників і методів їх вимірювання за однакових умов експлуатації. Під час проведення досліджень слід враховувати, що зміна діагностичних параметрів не має однозначного зв'язку з варіацією вхідних факторів, таких як

швидкість обертання ведучого валу, навантаження на редуктор, температурні режими його елементів тощо.

Відповідно до прийнятої у гірничій промисловості методики та з урахуванням наявних засобів технічної діагностики, встановлених на редукторі, була побудована структурна схема (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Послідовність визначення контролепридатності діагностичних параметрів редуктора

Програма випробувань передбачає моніторинг змін діагностичних показників під час роботи редуктора в межах навантажень від 20 до 120%, із тривалістю роботи на кожному режимі не менше 150 годин.

Окрім цього, здійснюється контроль параметрів у разі встановлення навмисно зношеного підшипника з радіальним зазором, що перевищує допустимі норми. У ході досліджень було протестовано методи та технічні засоби діагностики, які можуть бути рекомендовані до впровадження на підприємствах гірничодобувної галузі.

5.3 Діагностика редуктора за концентрацією продуктів зношування в мастильному матеріалі

У процесі експлуатації редуктора внаслідок тертя та зношування у вузлах виникає втрата металу з контактуючих поверхонь. Ці продукти зношування виводяться із зони тертя разом із мастилом, яке циркулює через відповідні ділянки механізму [56].

У наукових джерелах [56, 57] наведено результати експериментальних досліджень, присвячених вивченню механізмів утворення частинок зношування. Зокрема, встановлено залежність між розмірами цих частинок і основними характеристиками процесів тертя та зношування. Отримані дані свідчать про те, що аналіз складу і розміру частинок зношування в мастилі може слугувати інформативним показником для оцінки технічного стану вузлів редуктора, які працюють у режимах тертя.

Особливості конструкції редукторів роторного екскаватора полягають у застосуванні картерної системи змащування, коли мастильна рідина подається до вузлів шляхом занурення і розбризкування масла, що міститься в картері. У такій системі продукти зношування накопичуються безпосередньо в основному об'ємі мастила, що циркулює всередині корпусу редуктора.

Інтенсивність процесу зношування деталей може бути оцінена за швидкістю накопичення твердих частинок у мастильному середовищі.

На сьогодні для визначення вмісту продуктів зношування в мастилі використовують низку аналітичних методів, серед яких:

- спектральний аналіз мастила;
- ферографія (ферографічний метод);
- рентгеноспектральний аналіз мастильних зразків тощо.

Однак, попри широкий спектр наявних методик, їх практичне застосування для контролю технічного стану основних вузлів роторних екскаваторів пов'язане з низкою труднощів.

Серед основних труднощів, що виникають при використанні методів аналізу мастильних матеріалів у редукторах з картерною системою змащування, слід виокремити такі:

- складність отримання репрезентативної проби мастила, що значно впливає на точність результатів досліджень;
- висока трудомісткість процедур, пов'язаних із відбором, підготовкою та аналізом зразків;
- істотний вплив витоків і доливання мастила на об'єктивність діагностичних висновків;
- складність експлуатації та висока вартість сучасного діагностичного обладнання для аналізу мастила.

Перелічені недоліки ставлять під сумнів ефективність використання традиційних методів аналізу продуктів зношування для діагностики вузлів роторного екскаватора. Крім того, практичне впровадження цих методик нині обмежується відсутністю належного теоретичного обґрунтування та недостатньою методичною підтримкою [57].

Схематичне зображення процесу накопичення продуктів зношування в мастильному середовищі редуктора роторного екскаватора наведено на рис. 5.4. Оскільки основні механізми екскаватора функціонують переважно в повторно-короткочасному режимі, процеси надходження твердих частинок до мастила, а також їх осідання в картері мають нестабільний характер. Це призводить до

коливань концентрації продуктів зношування в мастилі протягом експлуатації.

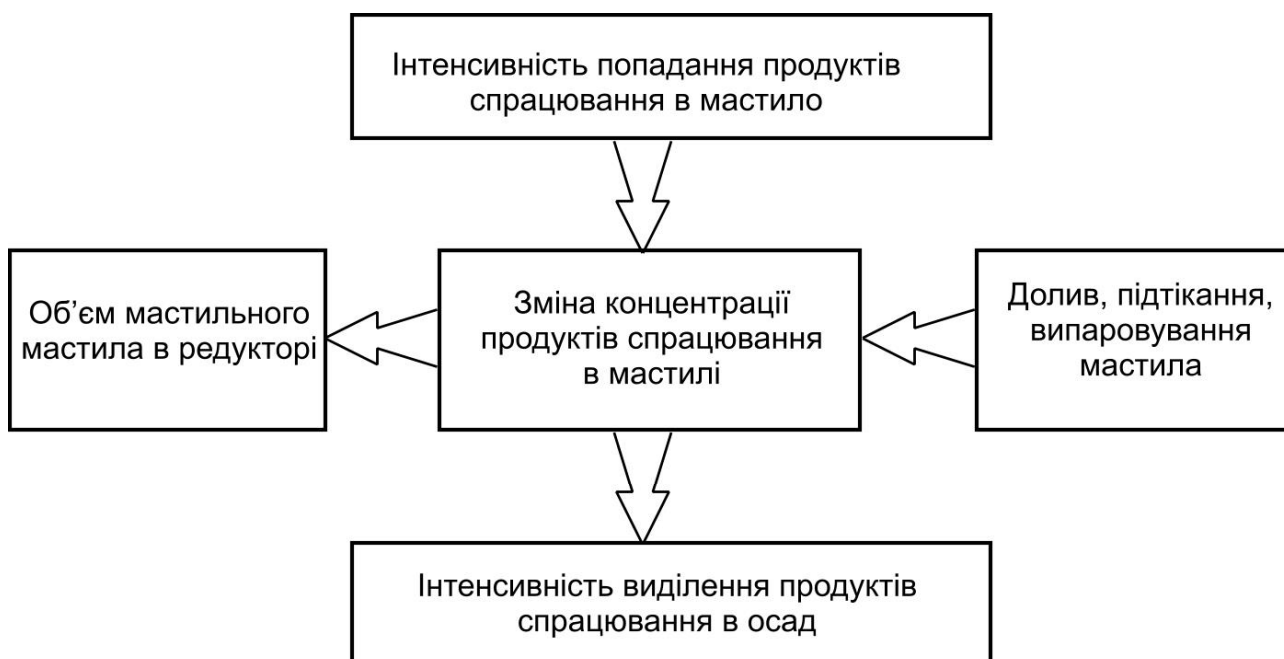


Рисунок 5.4 - Пояснення до процесу накопичення продуктів зношування в мастилі редуктора

У загальному вигляді процес накопичення твердих частинок зношування в мастильному об'ємі редуктора можна описати наступним чином: на частинки зношування, що потрапляють у мастило, діє комплекс сил, показаних на рис. 5.5.

Розглянемо сили, які діють на елемент зношування (частку).

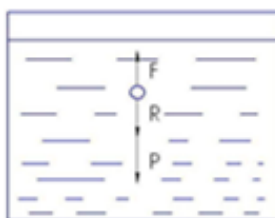


Рисунок 5.5.- Сили, які діють на елемент зношування (частку)

Сила ваги:

$$G = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g \quad (5.1)$$

де r – радіус частки;

ρ_1, ρ_2 – щільність матеріалу частки та мастила відповідно;

g – прискорення вільного падіння.

Сила тертя рідинного:

$$P_{\text{рід}} = 6\pi \cdot r \cdot \eta \cdot V \quad (5.2)$$

де η – коефіцієнт в'язкості;

V – швидкість частки.

Ці сили, а саме їхня рівнодійна буде визначати характер поведінки часток. За умови, що R (рівнодійна, яка визначиться: $R = G - P_{\text{рід}}$), буде додатньою, тобто $R > 0$, частки ляжуть на дно корпусу редуктора, а за умови, що $R \rightarrow 0$ вони будуть плавати в мастилі.

Основним показником, що відображає інтенсивність зношування деталей редуктора роторного екскаватора, є швидкість надходження продуктів зношування у мастило.

Контролювати даний показник будемо датчиком [57] (рис. 5.6), який, встановлений у картері редуктора. Датчик здатен забезпечити безперервний або періодичний моніторинг інтенсивності надходження частинок зношування при підключенні до відповідного реєструючого обладнання. Отримуємо показник зношування деталей редуктора за фіксований проміжок часу.

Схематично конструкція датчика подана на рис. 5.6. Корпус датчика (позначений як 1) виготовлений із немагнітного матеріалу — ебоніту. Усередині корпусу розміщений сердечник (2), який виконаний у вигляді постійного магніту. На зовнішній поверхні корпусу розташований чутливий елемент у вигляді плоского розгорнутого конденсатора. Для

підключення до реєструючого приладу (6) використовується електричний роз'єм (4).

Сам датчик монтується в корпусі редуктора (7) за допомогою різьбового з'єднання (8) і розміщується нижче рівня мастильного середовища (5) у картері редуктора.

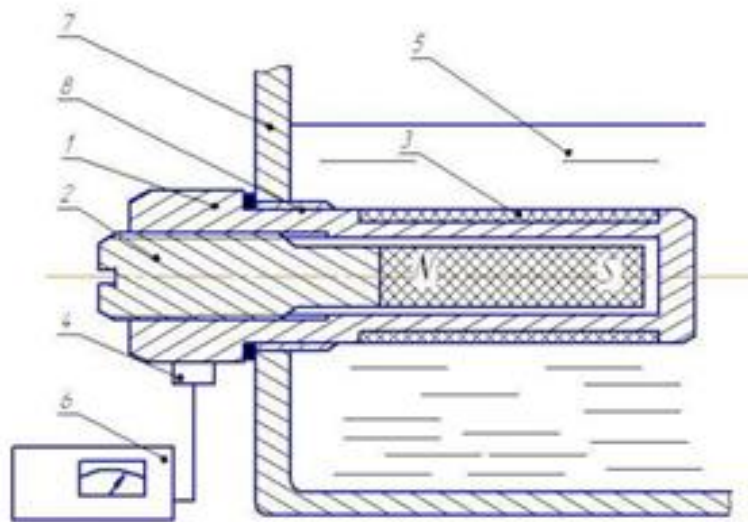


Рисунок 5.6 – Датчик: 1 – корпус датчика; 2 – магнітний сердечник; 3 – чутливий елемент; 4 – електричний роз'єм; 5 – мастило; 6 – реєструючий прилад; 7 – корпус редуктора; 8 – різьбове з'єднання [57]

Принцип роботи датчика ґрунтується на тому, що магнітне поле сердечника притягує до себе продукти зношування.

Після розміщення датчика в картері редуктора на чутливому елементі осідають частки, що утворились при зношуванні елементів редуктора. За умови накопичення часток, фіксується зміна частоти вихідного сигналу, пропорційну масі накопичених продуктів зношування. Кількісне значення вмісту продуктів зношування в мастильному середовищі редуктора визначається за показаннями стрілочного індикатора.

5.4 Результати діагностики роторного редуктора екскаватора

Для отримання числових показників у картер редуктора встановлено було за допомогою різьбових з'єднань.

Видалення продуктів зношування з датчика здійснювалося наступним чином: чутливий елемент занурювали в ємність, наповнену очищеним бензином. Після цього з корпусу датчика виймали магнітний сердечник, а накопичені частинки зношування ретельно змивали з поверхні чутливого елемента тим самим очищеним бензином.

Результати досліджень, отримані під час випробувань, наведені на рис. 5.7.

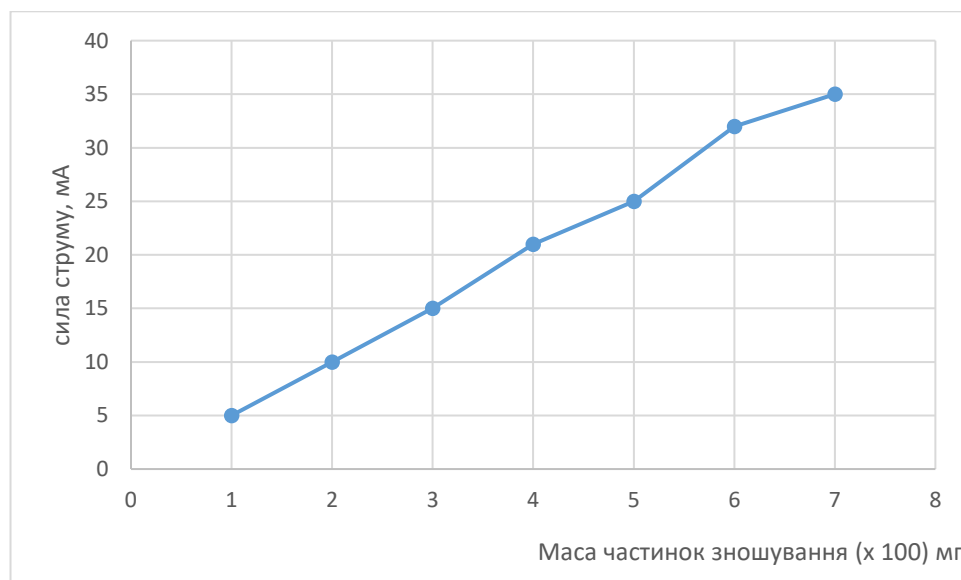


Рисунок 5.7 – Залежність вихідного параметру від маси продуктів зносу

Результати експериментальних випробувань засвідчили ефективність роботи датчика. Пристрій забезпечує можливість контролювати інтенсивність надходження продуктів зношування до мастила редуктора безпосередньо під час його експлуатації. Це, у свою чергу, дозволяє оперативно оцінювати технічний стан ключових

елементів редуктора, зокрема зубчастих передач і підшипників опорних валів.

5.5 Рекомендації щодо використання методу технічного діагностування редуктора роторного екскаватора

Основні завдання технічного діагностування редуктора роторного екскаватора включають:

- 1) встановлення поточного технічного стану редуктора;
- 2) прогнозування залишкового ресурсу, тобто визначення періоду безвідмовної роботи на основі результатів діагностичного контролю;
- 3) розробка методики оцінки технічного стану редуктора без демонтажу основних вузлів і механізмів, особливо в умовах закінчення нормативного строку експлуатації.

5.6 Висновки

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.

Інформація про інтенсивність надходження продуктів зношування до мастила, отримана за допомогою датчика, є точнішою порівняно з результатами традиційних методів, що базуються на аналізі відібраних проб. Це пояснюється тим, що при стандартному відборі проб практично не враховується частина частинок, які осідають на дно. Запропонований

метод також дає змогу оцінювати інтенсивність зношування немагнітних елементів, які працюють у парі з феромагнітними деталями.

Випробування інтегрального методу діагностування редуктора роторного екскаватора за кількістю продуктів зношування, що надійшли в мастило, показали можливість безрозбірного контролю інтенсивності зношування елементів редуктора за допомогою датчика.

Результати роботи опубліковані [58-60].

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 дугової сталеплавильної печі (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 роботу без навантаження (простій) технологічного обладнання при технічній реалізації АСУ ТРП. З метою реалізації цієї ідеї необхідно виконати такі вимоги [61, 62]:

- 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:

- виконати побудову 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 «ПІЧ–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 [63] 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 «сипких».

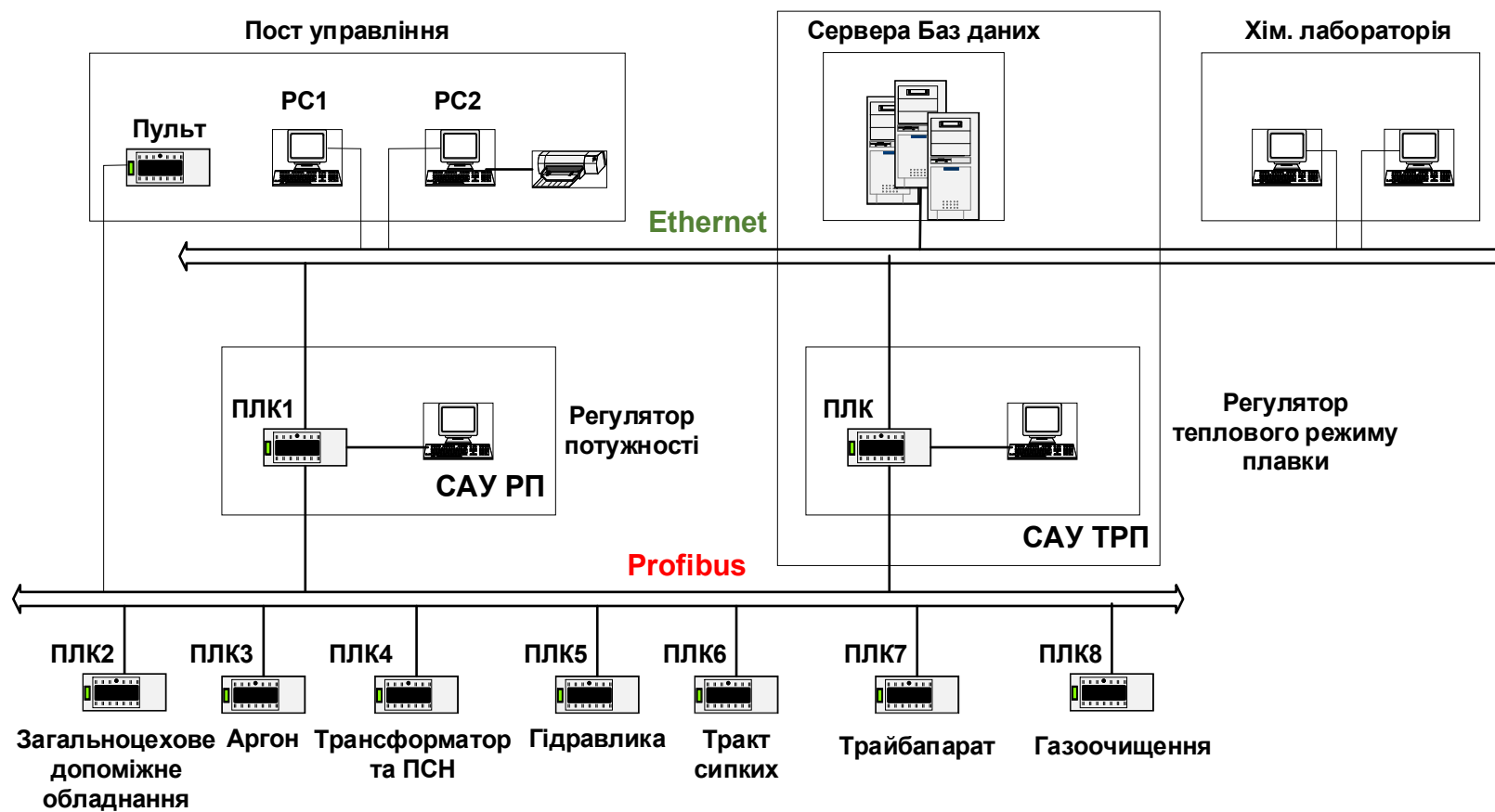


Рисунок 6.1 - Структурна схема базової АСУ технологічним комплексом «ПІЧ-КІВШ» з інтегрованою АСУ ТРП

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 дузі 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 сумішей. 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 не спостереження, 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.

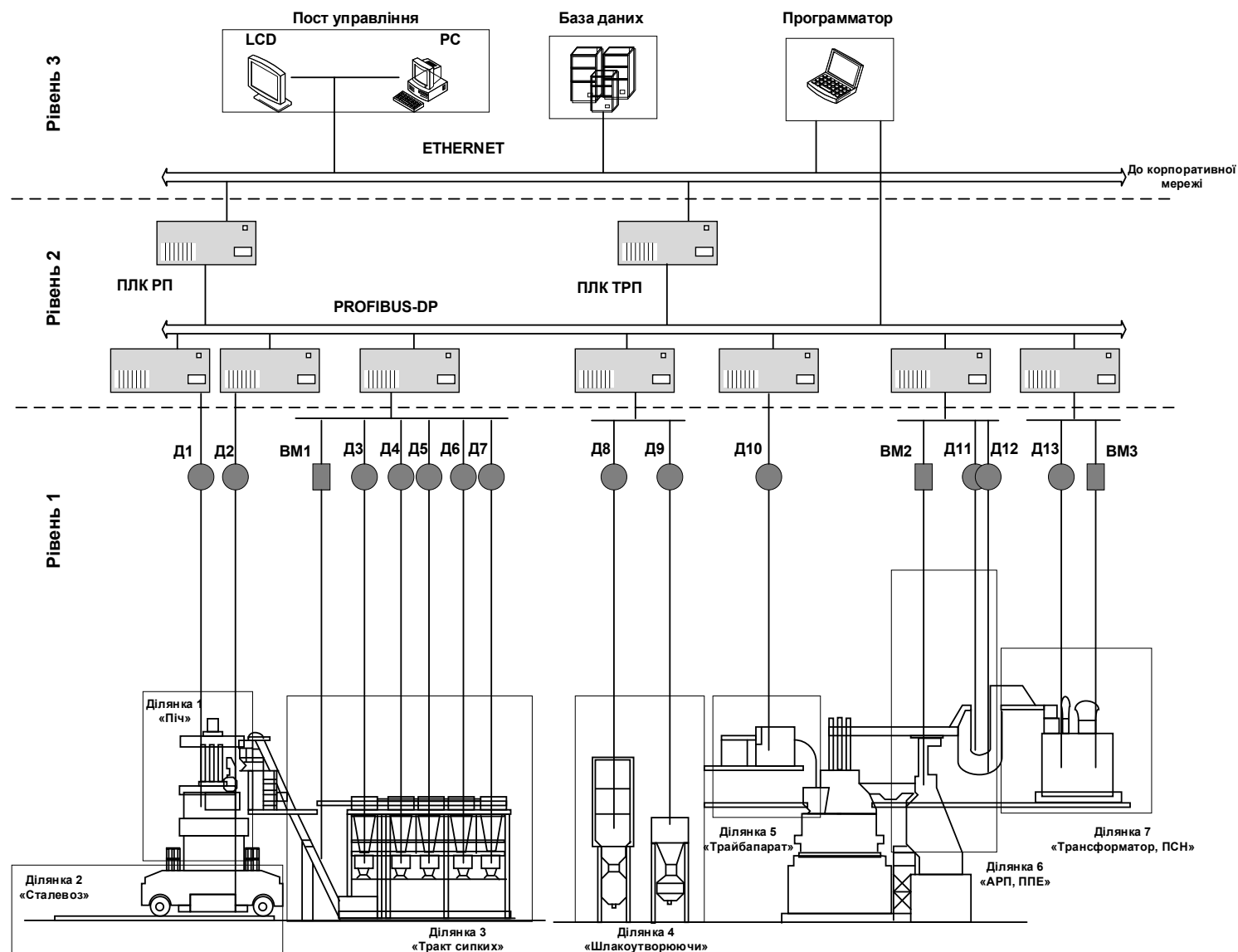


Рисунок 6.2 - Структурна схема розподіленої АСУ ТРП

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.

Загальна схема Profibus-мережі представлена на рисунку 6.3.

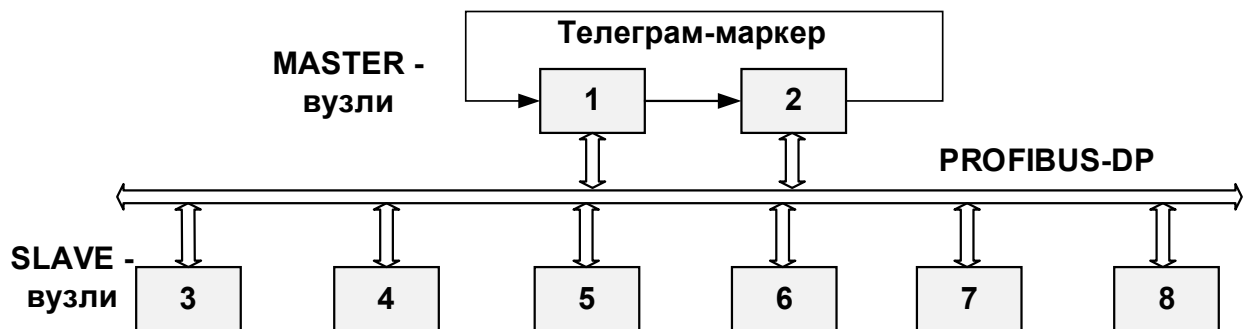


Рисунок 6.3 - Принцип роботи польової шини Profibus [63]

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 [64, 65].

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 [65]. Інтерфейси реалізовані як спеціалізованих мікросхем (ASIC).

Залежно від програми існує три основні варіанти Profibus [63]:

- 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.

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:

а) достатність тривалості опитування вимірювальних перетворювачів для виконання обміну інформацією та необхідних обчислень;

б) 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 проєктованій 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 [66, 67]. 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.

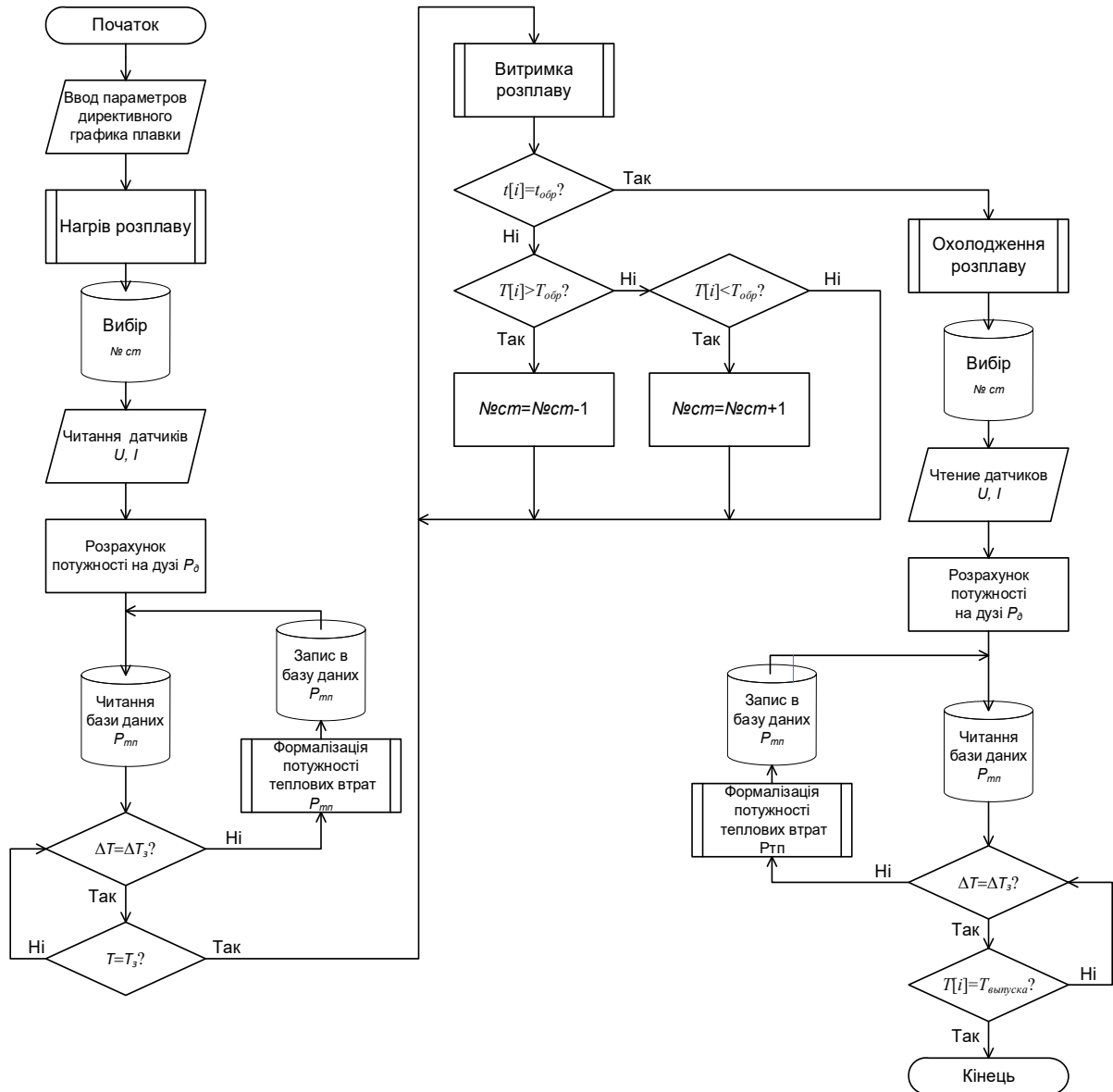


Рисунок 6.4. Блок-схема алгоритму роботи АСУ ТРП

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 ($P \cap T = \emptyset$) [66-68].

$I: P \rightarrow P^{\infty}$ є вхідною функцією – відображенням із переходів у комплекти позицій. $O: P \rightarrow P^{\infty}$ є вихідна функція – відображення переходів у комплекти позицій [66-68].

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 , $j=1, \dots, m$ [66-68].

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 комплектах переходів, а також їх можна використовувати для відображення переходів у комплектах 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 це 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 або $v_j \in P$ и $v_k \in T$, або $v_j \in T$ и $v_k \in P$.

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

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

$G = (V,A)$ 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 таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Функції комунікативності

Вхідна функція	Вихідна функція
1	2
$I(p_1) = \{t_0\};$	$O(p_1) = \{t_1\};$
$I(p_2) = \{t_1\};$	$O(p_2) = \{t_2\};$
$I(p_3) = \{t_2\};$	$O(p_3) = \{t_3\};$
$I(p_4) = \{t_3, t_{23}\};$	$O(p_4) = \{t_4\};$
$I(p_5) = \{t_4\};$	$O(p_5) = \{t_5, t_{23}\};$
$I(p_6) = \{t_5, t_{16}, t_{17}, t_{18}\};$	$O(p_6) = \{t_6\};$
$I(p_7) = \{t_6\};$	$O(p_7) = \{t_7, t_{12}\};$
$I(p_8) = \{t_7\};$	$O(p_8) = \{t_8\};$

Продовження таблиці 6.1

1	2
$I(p_9) = \{t_8, t_{10}\};$	$O(p_9) = \{t_9\};$
$I(p_{10}) = \{t_9\};$	$O(p_{10}) = \{t_{10}, t_{11}\};$
$I(p_{11}) = \{t_{11}\};$	$O(p_{11}) = \{t_{12}\};$
$I(p_{12}) = \{t_{12}\};$	$O(p_{12}) = \{t_{13}, t_{15}\};$
$I(p_{13}) = \{t_{13}\};$	$O(p_{13}) = \{t_{14}, t_{17}\};$
$I(p_{14}) = \{t_{14}\};$	$O(p_{14}) = \{t_{18}\};$
$I(p_{15}) = \{t_{15}\};$	$O(p_{15}) = \{t_{16}\};$
$I(p_{16}) = \{t_{20}\}$	$O(p_{16}) = \{t_{19}\};$
$I(p_{17}) = \{t_{19}\};$	$O(p_{17}) = \{t_{20}\};$
$I(p_{18}) = \{t_{22}\};$	$O(p_{18}) = \{t_{21}\};$
$I(p_{19}) = \{t_{21}\}.$	$O(p_{19}) = \{t_{22}\}.$

Графічне уявлення мережі Петрі показано на рис 6.5. Подальший аналіз процесів управління АСУ ТРП «ПІЧ-КОВШ» з допомогою побудованої мережі Петрі проводиться у термінах маркування, виконання, простору станів, і навіть дерева досяжності мережі Петри (рис. 6.6). Аналізуючи отримане дерево, можна сказати, що розроблена мережа Петрі обмежена на підставі таких висновків. Позиція $p_i \in P$ мережі Петри $S=(P, T, I, O)$ 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.

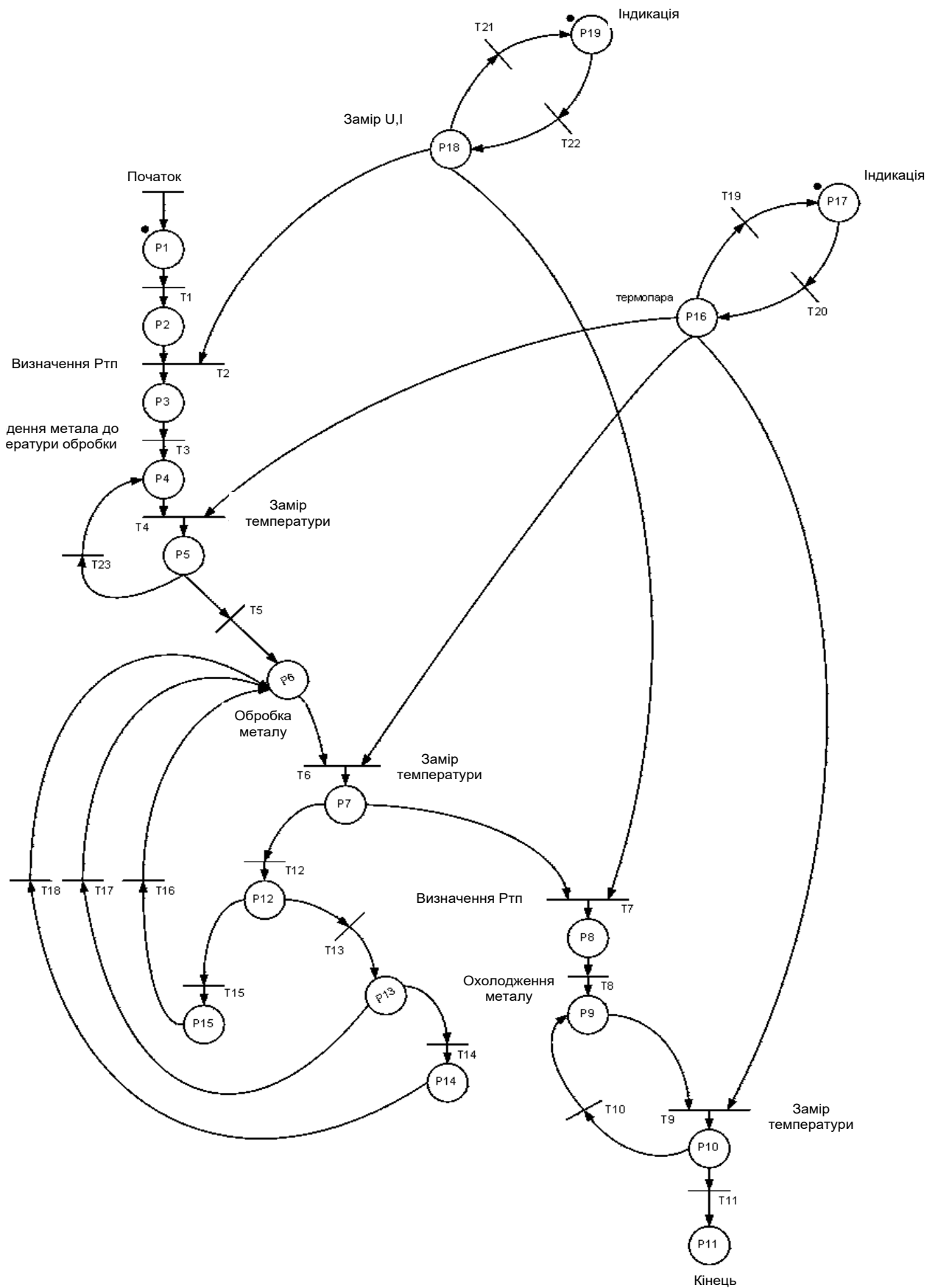


Рисунок 6.5 - Мережа Петрі для моделювання взаємодії АСУ ТРП та базової АСУ

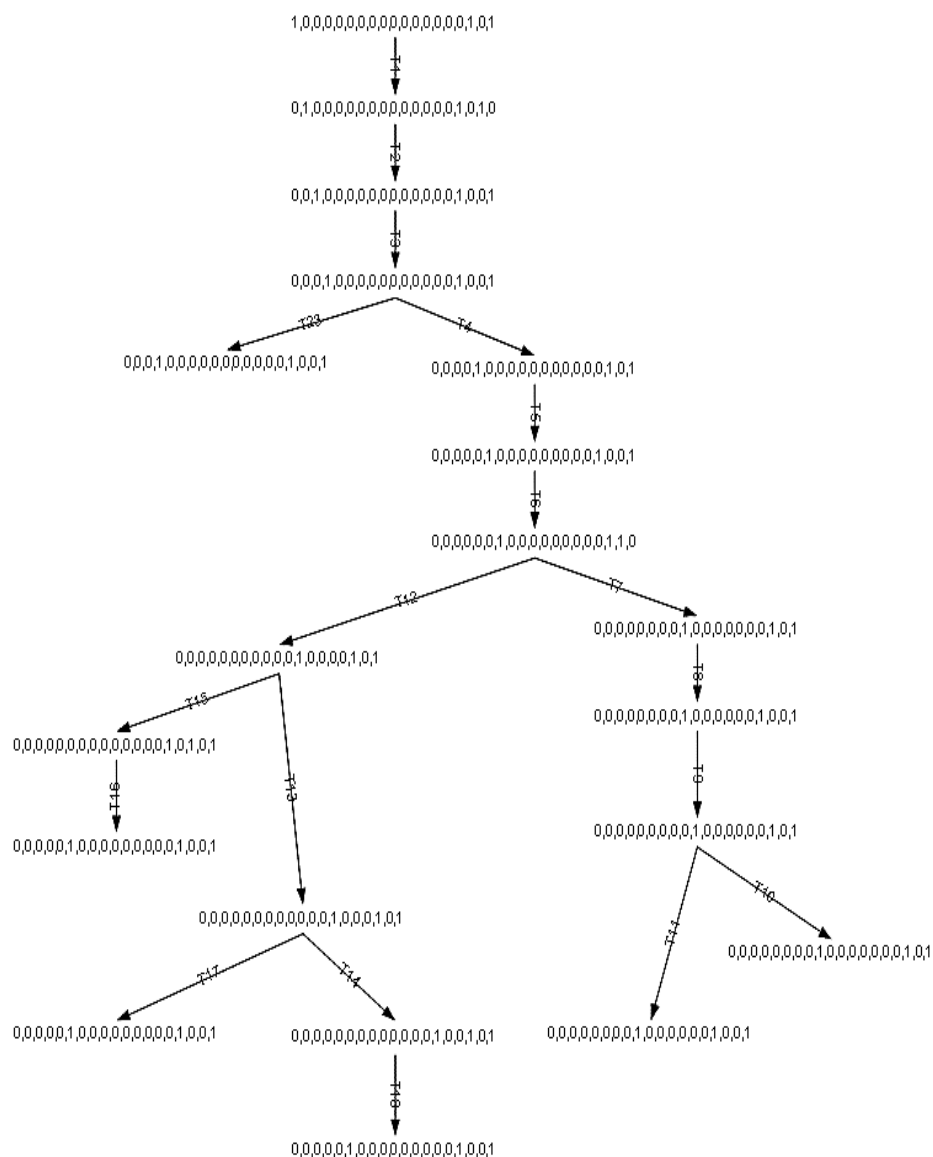


Рисунок 6.6 - Дерево досяжності мережі Петрі

Отримана мережа Петрі є такою, що не зберігає з таких міркувань: мережа Петрі $S=(P,T,I,O)$ з початковим маркуванням μ є суворо зберігає, якщо для всіх $\mu' \in R(S,\mu)$ виконується рівність [66, 67]

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

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.

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 S є потенційно запуслимим 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 (рис. 6.7).

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.

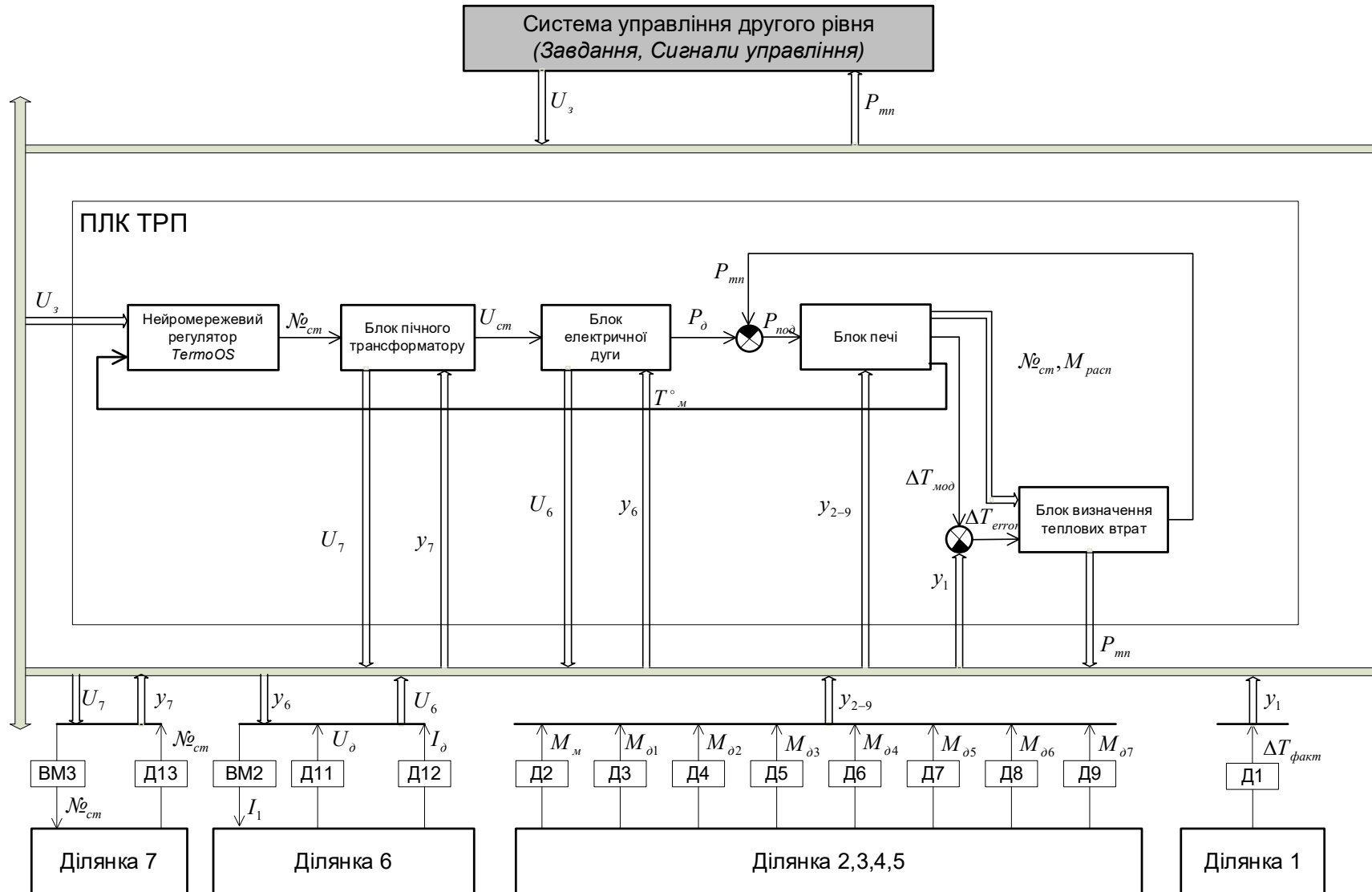


Рисунок 6.7 - Двохрівнева АСУ ТП технологічного комплексу «ПІЧ-КІВШ» на базі технології Profibus

6.3 Модель взаємодії елементів автоматизованої системи керування тепловим режимом плавлення

Завдання режимів роботи різних типів Profibus DP-пристроїв (ПЛК, DP-датчиків) та їх взаємодія відбувається за допомогою інтерфейсу користувача. Для проведення моделювання процесів, що визначають взаємодію елементів розподіленої АСУ ТРП, необхідно розробити модель апаратної реалізації систем управління, що інтегруються, з урахуванням особливості архітектури та організації каналного рівня шини Profibus.

Розглянемо архітектуру протоколу Profibus DP (рис. 6.8). Стандарт Profibus базується на безлічі існуючих національних та міжнародних стандартів. Для рівнів 1 та 2 (рис. 6.8) прийнято стандарт EIA (Electronic Industries Association) RS-485, міжнародні норми IEC 870-5-1 (Telecontrol Equipment and System) та EN 60870-5-1.

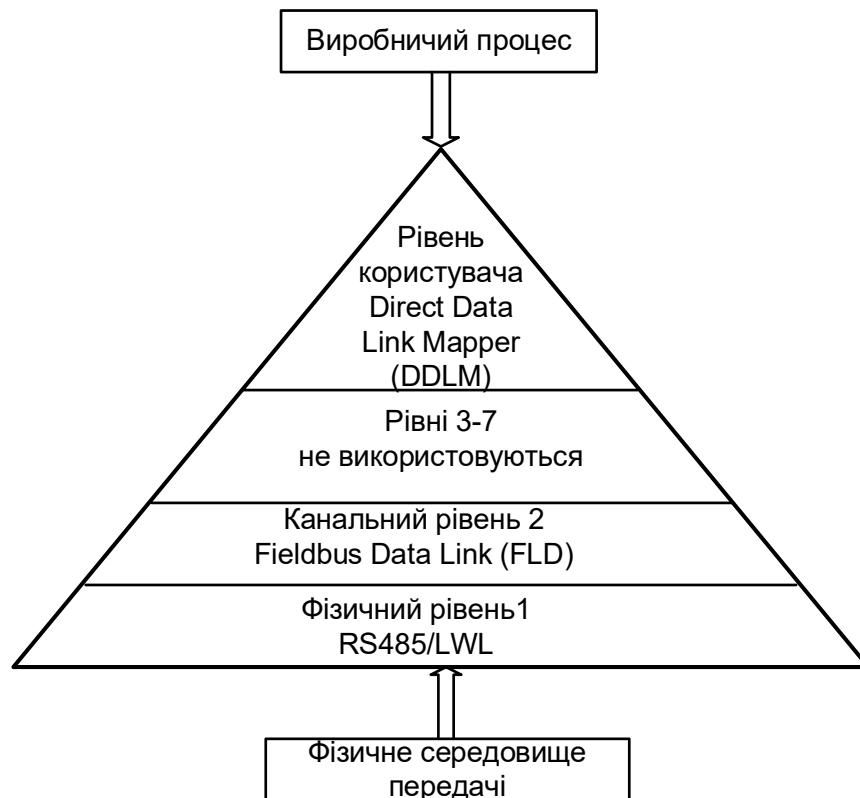


Рисунок 6.8 – Архітектура протоколу Profibus

Для методу доступу до мережі, служб передачі та керування даними використовується DIN 19241, частини 1-3 та норми IEC 955 Process Data Highway/Type C. Функції керування (FMA7) орієнтовані на ISO DIS 7498-4 (Management Framework). З погляду користувача Profibus поділяється на 3 профілю протоколу: DP, FMS та PA [63, 65].

Profibus-DP застосовує рівні 1 і 2, а також інтерфейс користувача. Рівні з 3 до 7 не використовуються. Завдяки такій архітектурі досягається швидка передача даних. Direct Data Link Mapper (DDLМ) організує доступ до рівня 2. В основу користувальницького інтерфейсу покладені необхідні функції користувача, а також системні та апаратно-залежні функції різних типів Profibus-DP-приладів.

Цей профіль протоколу Profibus оптимізовано для швидкого обміну даними спеціально для комунікацій між системами автоматизації та децентралізованою ІО периферією на польовому рівні.

Таким чином, для побудови моделі взаємодії елементів розподіленої системи управління на базі шини Profibus при реалізації АСУ ТРП необхідно розглянути принципи організації канального рівня моделі OSI, а також функції користувача DDLМ. Для вирішення цього завдання необхідно скласти модель взаємодії елементів розподіленої системи керування.

Канальний рівень 2 еталонної моделі OSI забезпечує функції управління доступом до передаючого середовища (Medium Access Control) та підтримки цілісності інформації, а також виконання протоколів передачі повідомлень [63]. У протоколі Profibus рівень 2 позначається як Канал даних Fieldbus - FDL (Fieldbus Data Link). Функція Керування Доступом до Передавальної Середині - MAC (Medium Access Control) визначає, коли станція може передавати дані. Функція MAC повинна гарантувати, що у будь-який час право передачі інформації належить лише однієї станції.

Для управління доступом до передавального середовища в

протоколі Profibus враховано дві важливі вимоги. У разі взаємодії між складними компонентами автоматизації з рівними правами доступу до шини (провідними пристроями) має бути гарантія того, що кожна з цих станцій отримує необхідний доступ до шини протягом точно заданого часового інтервалу. Взаємодія між складними пристроями автоматизації та простими периферійними пристроями (відомими) періодичний обмін інформацією необхідно здійснювати у реальному масштабі часу. Для взаємодії між складними станціями (провідними) протокол доступу до передавального середовища Profibus включає метод передачі маркера, а для взаємодії між складними станціями та простими периферійними пристроями (відомими) – метод ведучий-відомий. Цей комбінований метод називається гібридним доступом до передавального середовища.

Передача маркера забезпечується маркерним кільцем, який є організаційним ланцюгом активних станцій, що утворюють логічне кільце з адресами станцій, що входять до нього. У цьому кільці в заданій послідовності зростаючих адрес циркулює маркер - право доступу до середовища. У стартовій фазі такої шинної системи завдання управління доступом до передавального середовища (MAC), що працює в активних станціях, має виявити це логічне призначення та встановити маркерне кільце. У робочій фазі несправні або вимкнені (активні) станції повинні з кільця видалятися, а нові активні станції - до нього включатися. Крім того, програма керування доступом до передаючого середовища Profibus (MAC) повинна: розпізнавати несправності в передавальному середовищі або передавачах; виявляти помилки в адресації станцій (наприклад, одночасне звернення до кількох станцій); виявляти помилки передачі маркера (наприклад, множення маркера чи його втрату). Формат маркера рівня 2 (див. рис. 6.9) сприяє більшій безпеці передачі.

Маркер, що викликає, має відстань Хеммінга HD (Hamming

Distance) рівну 4. При HD = 4 може бути розпізнано до 3-х одночасних помилок у фальсифікованих бітах телеграми даних. Це досягається завдяки застосуванню спеціальних стартового та завершального знаків маркера, постійно ковзаючої синхронізації, біту парності та контрольному байту.

При цьому можуть бути розпізнані такі помилки:

- помилка символного формату (парність, переповнення);
- помилки протоколу;
- помилки роздільників початку та закінчення;
- помилки байта перевірки кадру;
- помилки довжини телеграми.

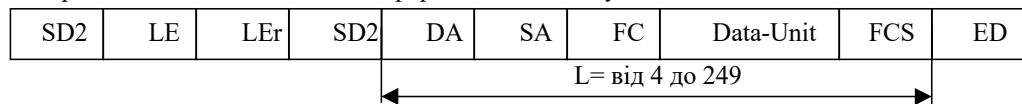
Формат із постійною довжиною інформаційного поля



Формат с постоянной длиной информационного блока с данными



Формат із змінною довжиною інформаційного блоку



Коротке квітування



Телеграма-токен (маркер)



Рисунок 6.9 - Формат Profibus-маркера

На рисунку 6.9:

L - Довжина інформаційного поля;

SC (Single Character) – окремий символ, що використовується лише для квітування (SC=E5h);

SD1-SD4 (Start Delimiter) – стартовий байт для відмінності різних форматів телеграм (SD1=10h, SD2=68h, SD3=A2h, SD4=DCh);

LE / LEr (LEngth) - байт довжини, що вказує довжину інформаційних полів у телеграм зі змінною довжиною;

DA (Destination Adress) - байт адреси мети, містить інформацію про приймач;

SA (Source Adress) – байт адреси джерела, містить інформацію про передавачі;

FC (Frame Control) – контрольний байт містить інформацію про службу для цього повідомлення та пріоритет повідомлення;

Data Unit – поле даних, може також містити можливі розширення адреси телеграми даних користувача;

FCS (Frame Check Sequence) – перевірочний байт, містить контрольну суму телеграми, яка утворюється операцією “1” без біта переповнення ED (End Delimiter) – кінцевий байт, що вказує на кінець телеграми (ED=16h).

Маркер, у якого розпізнана помилка, повторюється принаймні один раз. Можна повторювати маркери, що проходять за рівнем 2 до 8 разів (шинний параметр “Retry”). Рівень 2 може здійснювати поруч із передачею даних “точка до точки”, і навіть комунікації у багато точок – Broadcast і Multicast [63]. При комунікаціях Broadcast активний учасник надсилає повідомлення всім іншим учасникам (Master'ам та Slave'ам). Прийом даних не квітується. У комунікаціях Multicast активний учасник надсилає повідомлення групі учасників (Master'ам та Slave'ам). Прийом даних не квітується.

У Profibus-DP застосовується, відповідно, підмножина служб рівня 2. Так, наприклад, Profibus-DP використовує лише служби SRD (надсилання та прийому даних з квітування) і SDN (надсилання даних без квітування). Служби викликаються через точки доступу до служби, SAP (Service Access Point), рівня 2 з вище рівня. У Profibus-DP точки

доступу, що застосовуються, суворо впорядковані. У всіх активних і пасивних учасників можна використовувати паралельно кілька точок доступу, забезпечуючи тим самим гібридний метод доступу до середовища.

Гібридний метод передачі даних можна застосувати:

- у системі, у якій застосовується схема провідний ПЛК ТРП – ведені ПЛК технологічних ділянок 1-7;
- у системі, у якій застосовується схема провідний ПЛК ТРП - провідний ПЛК РМ (з передачею маркера);
- у системі, в якій застосовується комбінація цих методів.

На рис. 6.10 показано структуру Profibus з двома активними провідними пристроями (ПЛК ТРП та РС), що належать АСУ ТРП та сімома пасивними веденими станціями (ПЛК підсистем управління ПТК), що відображає структуру розподіленої АСУ ТРП технологічним комплексом «ПІЧ-КІВШ».

Два провідні пристрої утворюють логічне маркерне кільце. Після того, як активна станція отримує маркер, їй на певний час надається дозвіл виконувати на шині функції провідного пристрою [69]. Вона може взаємодіяти з усіма провідними станціями за методом ведучий-відомий та з усіма провідними станціями, що беруть участь у взаємовідносинах за методом ведучий-ведучий. Взаємодія за методом ведучий – ведучий необхідний для апаратної реалізації впровадження АСУ ТРП у базу.

Модель взаємодії елементів АСУ ТРП полягає у реалізації обміну інформацією між провідними та веденими ПЛК відповідно до алгоритму роботи АСУ ТРП (див. рис. 6.4) та структурної схеми, що реалізує цей алгоритм (див. рис. 6.2). Модель взаємодії компонентів автоматизованої системи керування тепловим режимом плавки представлена на рис. 6.11.

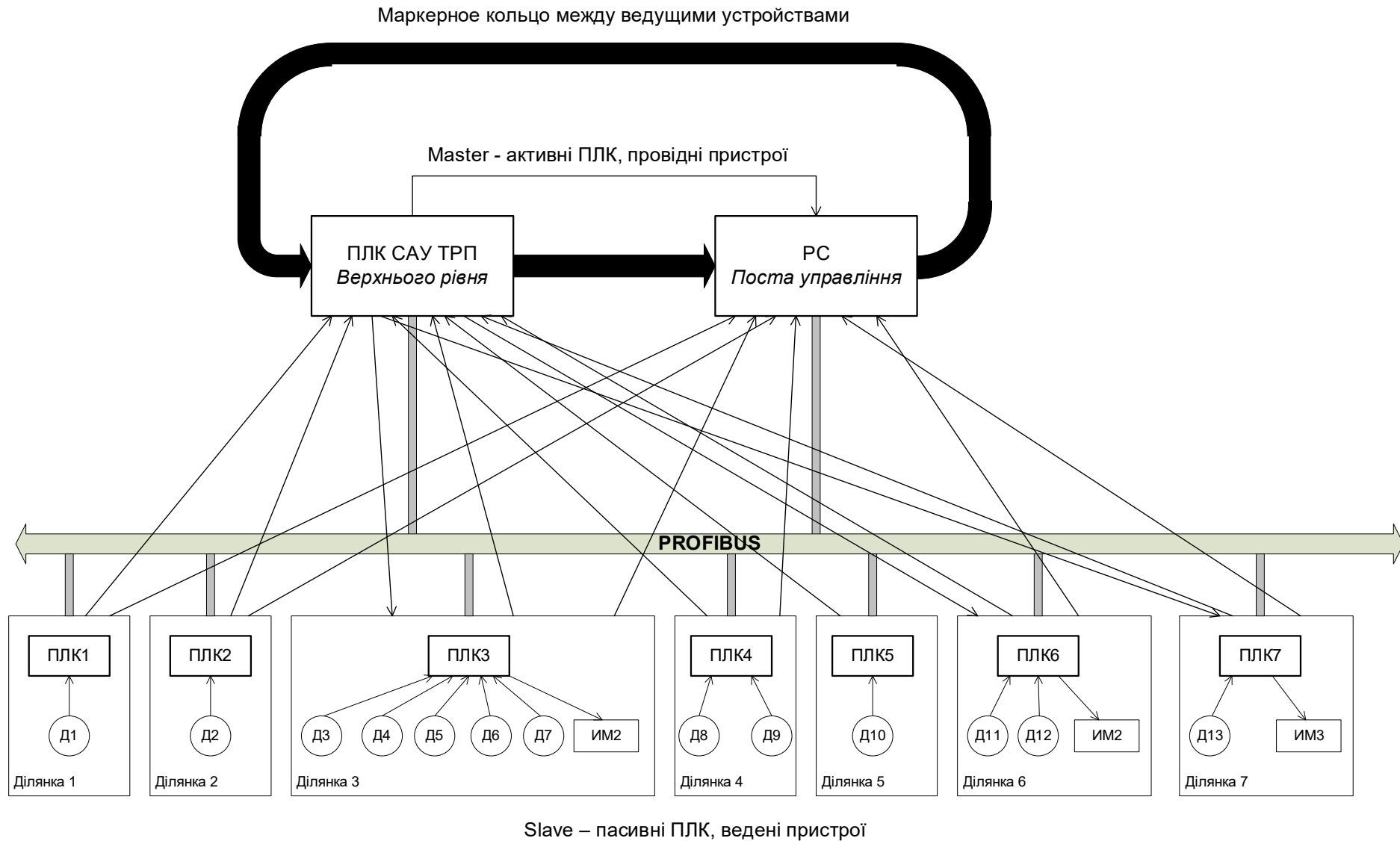


Рисунок 6.10 – Гібридний метод управління доступом у розподіленій АСУ ТРП

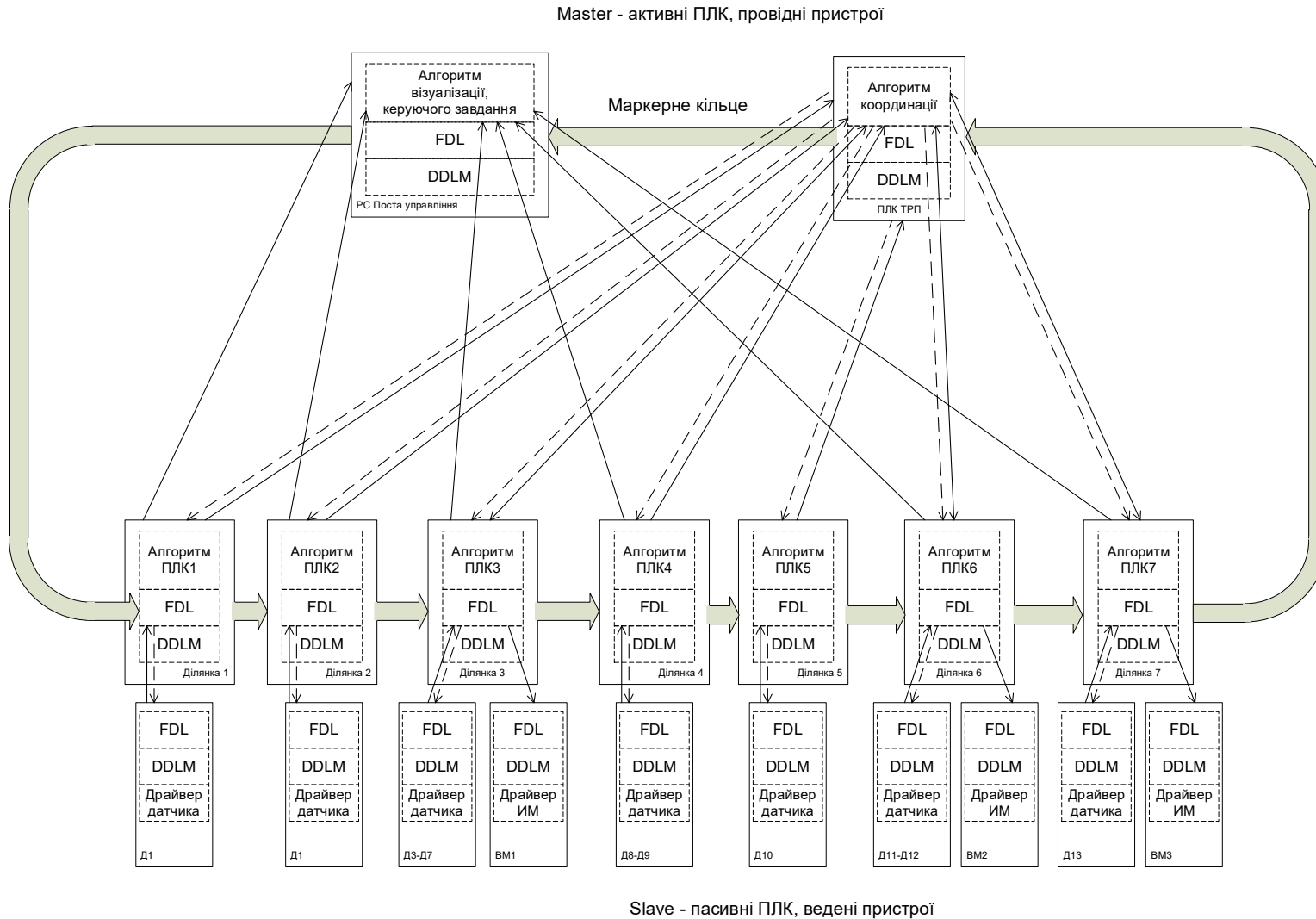


Рисунок 6.11 – Структурна схема моделі взаємодії компонентів АСУ ТРП за допомогою шини Profibus

Модель взаємодії компонентів систем автоматизації обміну інформацією відбувається за наступним принципом:

- провідними пристроями є ПЛК ТРП другого рівня та РС посту управління. Ведені пристрої це ПЛК ділянок 1-7 з розподіленими пристроями введення/введення інформації від датчиків та виконавчих пристроїв технологічних модулів;

- прохід маркера здійснюється послідовно по ланцюжку провідних пристроїв системи керування другого рівня ПЛК ТРП → РС. Опитування датчиків відбувається через ведені ПЛК1 - ПЛК7 на запит ПЛК ТРП

Дані з цього запиту отримують все ПЛК і РС поста управління. ПЛК ТРП на основі інформації від датчиків здійснює обчислення у відповідність до алгоритму функціонування та видає повідомлення типу ведучий-провідний для всіх ПЛК нижнього рівня. ПЛК ділянок проводять обчислення у відповідність до закладених алгоритмів і видають керуючі команди виконавчим органам при захопленні маркера.

6.4 Оцінка часових характеристик взаємодії елементів АСУ тепловим режимом плавлення

Оцінку параметрів часових процесів передачі даних по шині Profibus між усіма станціями розподіленої АСУ ТРП технологічним комплексом «ПІЧ-КІВШ» виконано для двох циклів функціонування:

- вимір температури розплаву;
- управління тепловим режимом плавки.

Тимчасові діаграми функціонування системи управління на каналному рівні протоколу Profibus представлені на рис. 6.12. Тимчасова діаграма ілюструє сутність тимчасових затримок, зумовлених як алгоритмом роботи АСУ ТРП, і алгоритмом функціонування каналного рівня протоколу Profibus, пояснюється з тимчасової діаграми.

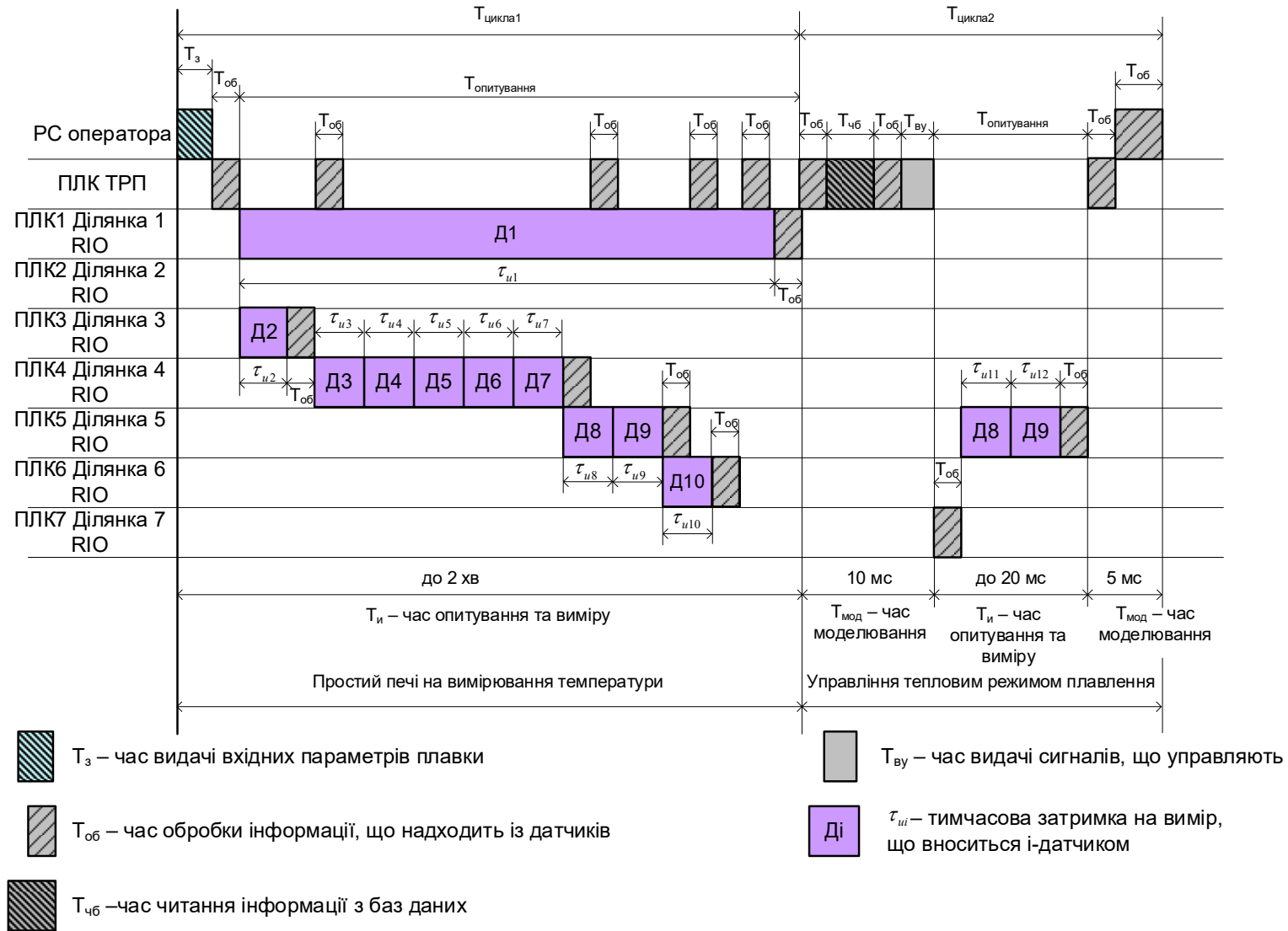


Рисунок 6.12 – Тимчасова діаграма роботи АСУ ТРП

Для підтримки продуктивності та успішного функціонування шини необхідно, щоб час обходу маркером всіх розподілених пристроїв був не меншим за найкоротший режим функціонування АСУ ТРП. Отже, має виконуватися нерівність:

$$T_{MC} \geq T_{цикла}^{min}, \quad (6.3)$$

де T_{MC} – час циклу передачі повідомлення з шині.

З аналізу часової діаграми, представленої на рис. 6.12 найменший цикл спостерігається при керуванні тепловим режимом плавки та становить 35 мс.

Відповідно до табличних даних, наведених у [66] рекомендована швидкість передачі для $T_{цикла}^{min} = 35$ мс складає 187,5 Кбит/с.

Для оцінки часу циклу передачі повідомлення по шині виконано розрахунок тимчасових параметрів канального рівня шини Profibus за такою методикою [63].

Час циклу передачі повідомлення T_{MC} :

$$T_{MC} = (T_{SYN} + T_{ID} + T_{SDR} + T_{DS}) \cdot n_S, \quad (6.4)$$

де $T_{DS} = 148t_{BIT}$ - час, необхідний передачі службової інформації;

$t_{BIT} = 1/V_{П}$ - час, при передачі одного біта (зворотна швидкість передачі); n_S - кількість відомих пристроїв у цій мережі;

$T_{SYN} = 33 t_{BIT}$ – час синхронізації;

$T_{SDR} = 11 t_{BIT}$ – час затримки станції-відповідача;

T_{ID} - час простою на стороні ініціатора, що проходить з моменту прийому останнього біта кадру до моменту посилки першого біта наступного кадру.

Время простою T_{ID} визначається наступним чином: $T_{ID} = T_{SM} + T_{SYN}$. Типове значення цієї величини становить $75t_{BIT}$.

Складові часу простою (затримок) визначаються за такими виразами.

Коефіцієнт безпеки T_{SM} :

$$T_{SM} = 2t_{BIT} + 2T_{SET} + T_{QUI}, \quad (6.5)$$

де T_{SET} - час, що минає з моменту виникнення події (посланий останній октет) до реагування на цю подію, $T_{SET} = 30t_{BIT}$, T_{QUI} – час «тиші».

Час «тиші» складається з наступних часів:

- час затримки фізичного середовища передачі T_{TD} - максимальне час, що проходить під час передачі кадру по кабелю. При довжині лінії 1000 метрів без повторювачів T_{TD} складає 1 мкс [66];
- час очікування T_{SL} - максимальний час, протягом якого ініціатор чекає на підтвердження (першого байта кадру) від віддаленої станції, після передачі останнього біта активного кадру:

$$T_{SL} = 2T_{TD} + 2T_{SDX} + 11t_{BIT} + T_{SM}; \quad (6.6)$$

- час затримки станції (Station Delay Time) T_{SDX} - це період часу, який може проходити між передачею або прийомом останнього біта кадру і передачею або прийомом першого біта наступного кадру.

Затримки станції:

- час затримки станції-ініціатора T_{SDI} ;
 - час затримки станції-відповідача T_{SDR} (як, правило $11t_{BIT}$).
- Необхідно враховувати час спаду імпульсу при вимиканні передавача на стороні, що передає, якщо цей час більше ніж T_{SDR} . У межах цього часу «тиші» T_{QUI} передача та прийом кадрів заборонені: $T_{QUI} < T_{SDR}$.

Для задоволення цієї умови іноді виникає потреба у збільшенні T_{SDR} . Час готовності T_{RDY} - проміжок часу, протягом якого провідна станція має бути готовою отримати підтвердження або відповідь після

передачі запиту: $T_{RDY} < T_{SDR}$, $T_{QUI} < T_{RDY}$.

Для задоволення останньої умови іноді виникає потреба у збільшенні часу T_{RDY} та відповідно T_{SDR} .

Для рекомендованої швидкості визначено такі часові показники: $T_i = 20$ мс; $T_{BY} = 10$ мс; $T_y = 35$ мс. Аналіз результатів моделювання показує, що тимчасові затримки, що вносяться в систему управління, дозволяють виконати всі необхідні обчислення та обмін інформацією, що наказуються алгоритмом управління: час циклу управління менше часу управління $T_y > T_{\text{цикла}}$.

В АСУ ТРП, побудованої на основі промислової шини, присутні затримки, що визначаються алгоритмом взаємодії елементів системи управління та часом передачі між ними. Затримки по виходу в польовій шині визначаються часом зчитування даних із датчиків та передачі їх по шині (затримки каналами вимірювання); затримки входу – пов'язані з часом обробки інформації та вироблених обчислень ПЛК, і навіть часом видачі керуючих впливів на виконавчі устрою (затримки каналами управління). Як видно з діаграми (див. рис. 6.12), тривалість затримок по каналах вимірювання більша за тривалість затримок по каналах управління. Таким чином, основні затримки, що вносяться шиною, - це затримки на вході системи, які викликані інерційністю вимірювальних перетворювачів (температури, ваги).

6.5 Висновки

Розроблено структуру технічної реалізації та обґрунтовано можливість організації АСУ ТРП шляхом інтеграції в існуючі дворівневі розподілені системи управління технологічним комплексом «ПІЧ-КІВШ» з використанням мережевих промислових технологій Profibus та Industrial Ethernet.

Подальший розвиток отримав алгоритм спільного керування та

структуру системи керування електричними та тепловими параметрами, яка не потребує конструктивних змін існуючих систем керування енергетичними параметрами плавки ДСП при інтеграції АСУ ТРП. Проведено аналіз процесів керування в системі автоматизації за допомогою мереж Петрі, отримано алгоритми керування переходами станів у ході плавки.

Запропоновано структуру та алгоритм реалізації розподілу завдань управління, контролю та візуалізації АСУ ТРП між окремими компонентами системи управління нижнього та верхнього рівнів.

Розроблено модель взаємодії компонентів АСУ ТРП на основі гібридного методу управління доступом на каналному та користувальницькому рівні протоколу Profibus та специфікацій обладнання Master та Slave шини Profibus-DP, що відрізняється тим, що враховує тимчасові параметри промислової шини та розподіл завдань управління між системами автоматизації.

Результати роботи опубліковані [61, 62, 66, 69, 70].

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 тепlopостачання – 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 (розрядженість 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 [71].

Аналізу режимів електроспоживання та їх ефективності загалом для вугільних шахт та її окремих технологічних процесів присвячені певні цикли наукових робіт. Так, у роботі [72] розглядається багатофакторне прогнозування електроспоживання вугільної шахти за допомогою нейронної мережі в розрізі річного інтервалу часу. Роботи [73, 74] 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 [75, 76]. Можливі заходи щодо підвищення ефективності електроспоживання головної водовідливної установки вугільної шахти запропоновані у роботах [77, 78]. Безпосередньо фактичні режими електроспоживання головних та допоміжних підйомних установок шахти всебічно аналізуються у роботах [79, 80]. 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.

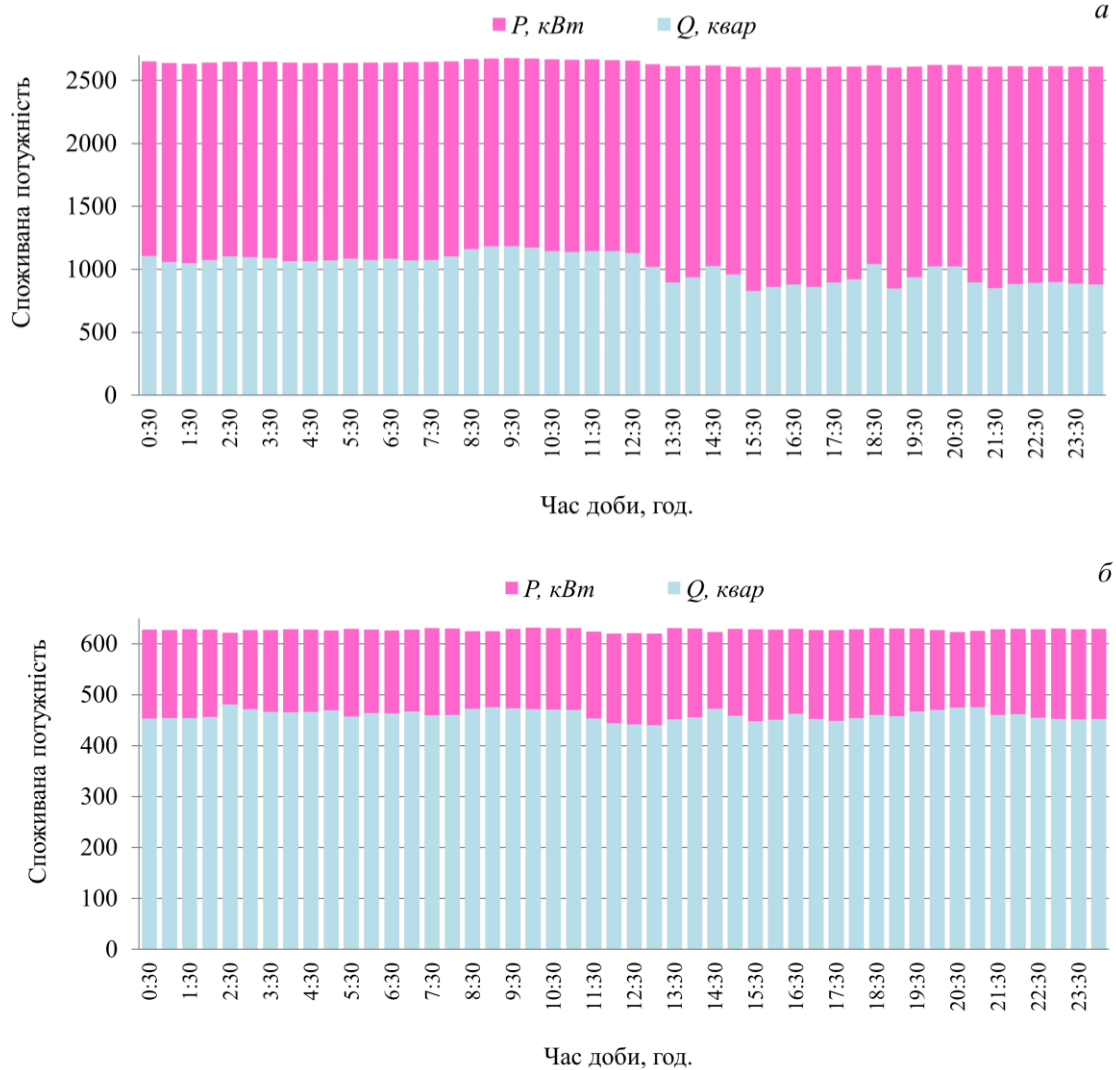


Рисунок 7.1 – Фактичні добові профілі електроспоживання ВГП з системою ПЧСВ та синхронними двигунами потужністю 3200 кВт (а) і 1250 кВт (б)

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.

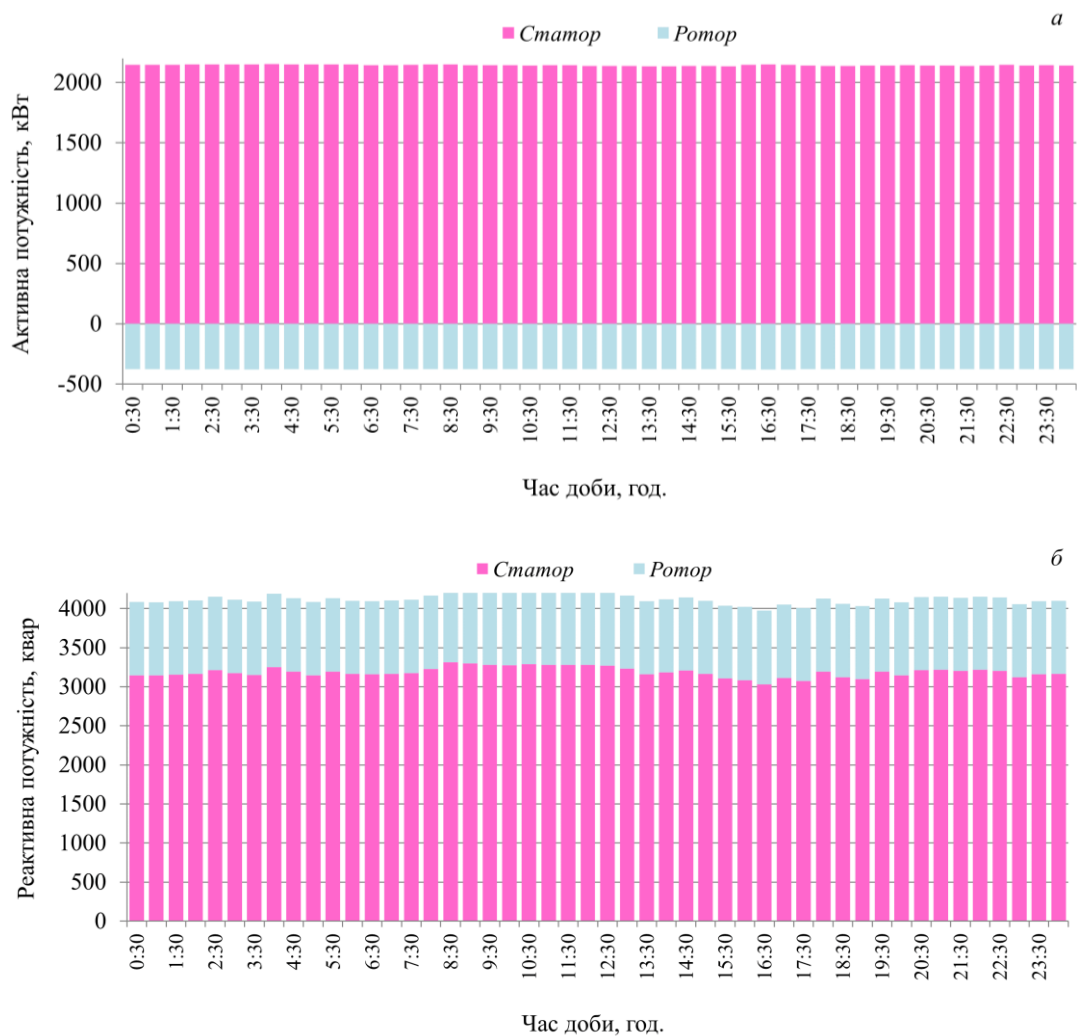


Рисунок 7.2 – Фактичні добові профілі електроспоживання ВГП з системою АТК та АД потужністю 3800 кВт для активної (а) і реактивної (б) потужностей

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.

У дужках в таблиці 7.2 вказані значення у відсотках від номінальної потужності двигуна.

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	W_P	63100	15020	42420
	W_Q	24400	11050	98980
Математичне сподівання потужності: активної, кВт	P_{c^*}	2630 (82,2)	627 (50,2)	1770 (46,6)
	Q_c	1020	461	4120
Середньоквадратична потужність: активна, кВт	$P_{ск}$	2631	628	1771
	$Q_{ск}$	1024	465	4125
Дисперсія потужності: активної, кВт ²	DP	525	9	17
	DQ	11850	95	3970
Середньоквадратичне відхилення: активної, кВт (%)	σP^*	23 (0,7)	3 (0,2)	4(0,1)
	σQ	109	10	63
Коефіцієнт форми	k_{ϕ}	1,0004	1,00001	1,0006
Коефіцієнт потужності	$\cos\phi$	0,93	0,81	0,4

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_{ϕ} лише в четвертому або п'ятому знаку після коми перевищує одиницю). Такий стабільний режим електроспоживання визначається практично рівномірним за завантаженням протягом доби режимом роботи вентиляторної установки (відносне 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) [81, 82].

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 [83, 84, 85]. 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).

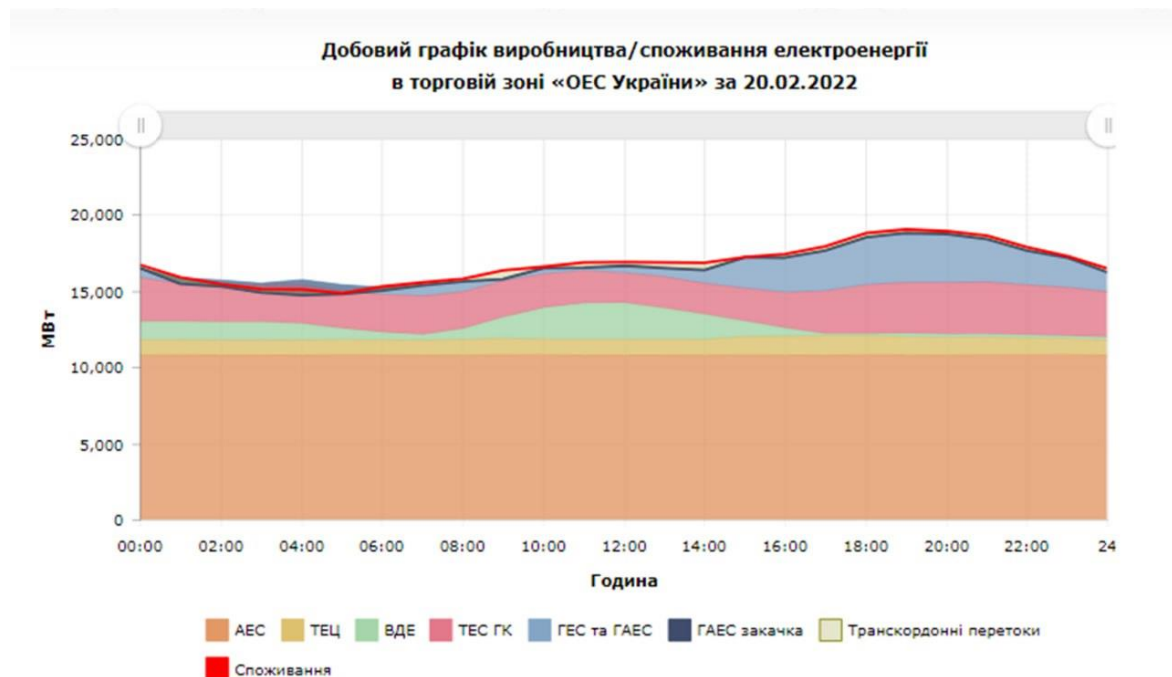


Рисунок 7.3 – Приклад фактичного добового ГЕН енергосистеми
України станом на 20.02.2022 р

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.

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, СНЕ) 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 [77].

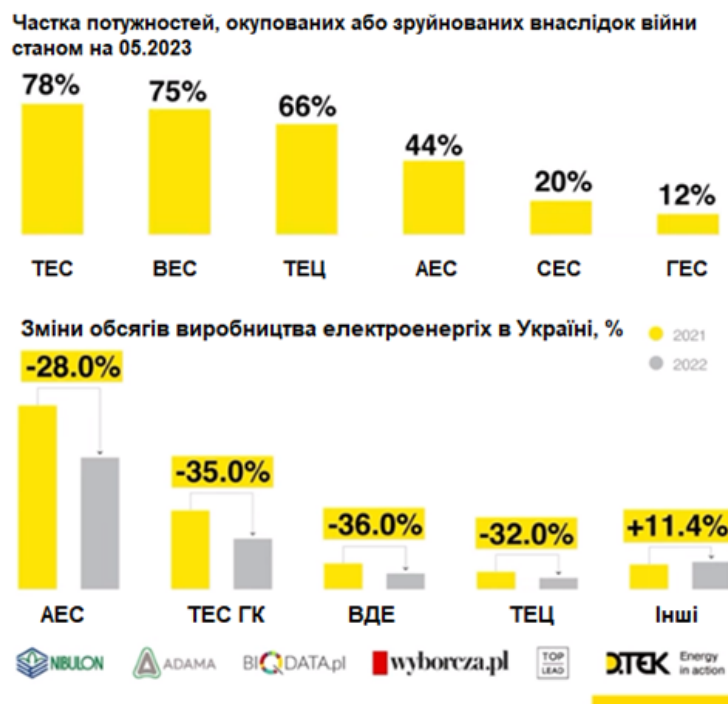


Рисунок 7.4 – Рівень пошкодження (окупації) систем виробництва електроенергії та зміни обсягів генерації внаслідок російської агресії

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 (рис. 7.5).

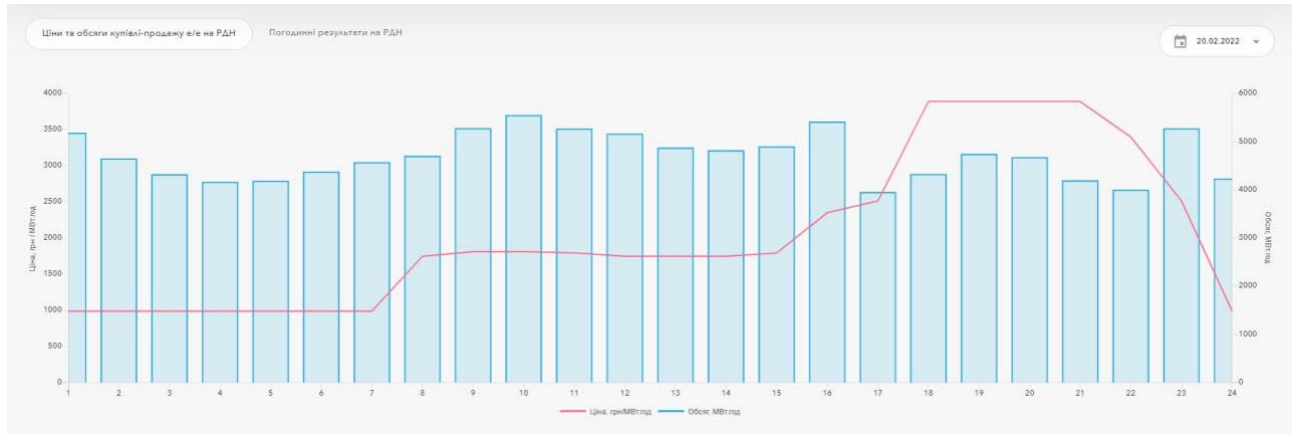


Рисунок 7.5 – Ціни та обсяги купівлі-продажу електроенергії на ринку на добу наперед (РДН) за 20.02.2022 р.

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 напівпік 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.

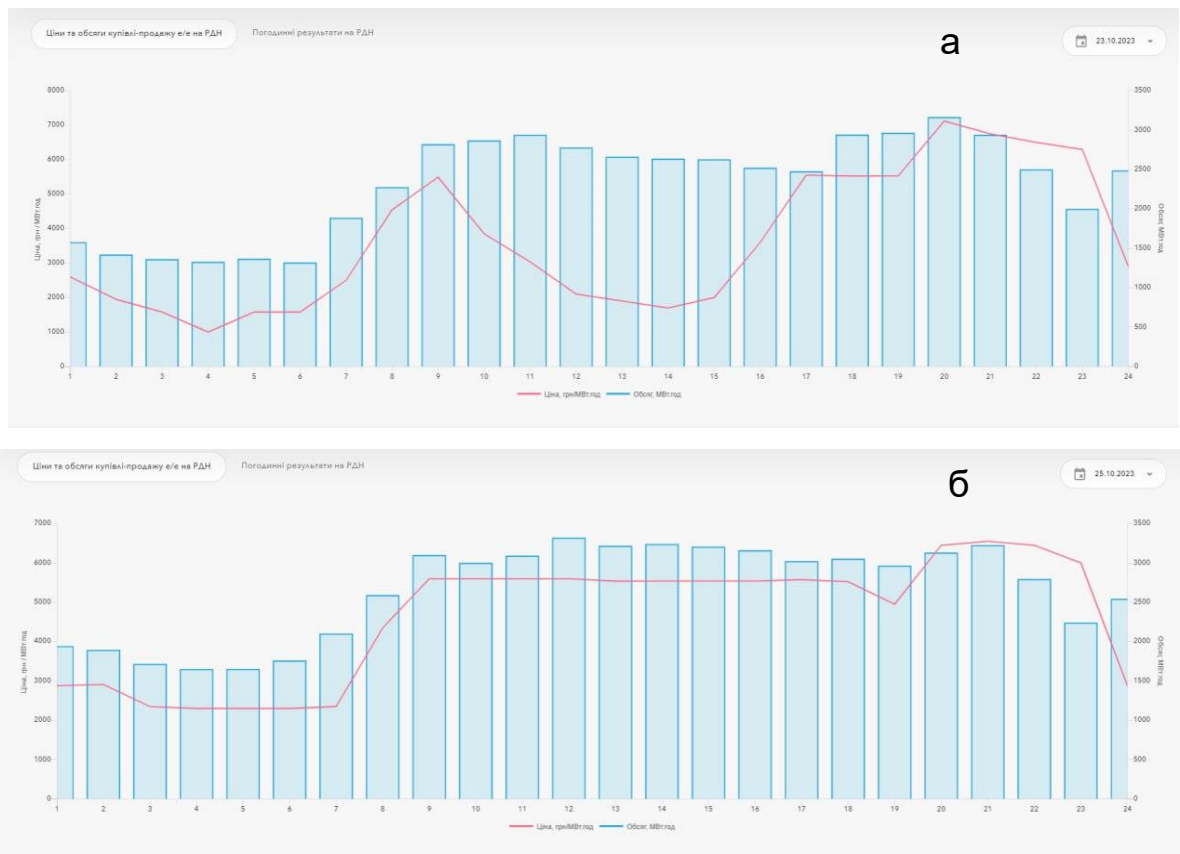


Рисунок 7.6 – Ціни та обсяги купівлі-продажу електроенергії на РНД: двозонний (а) та тризонний (б) залежно від рівня генерації ВДЕ

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.

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.

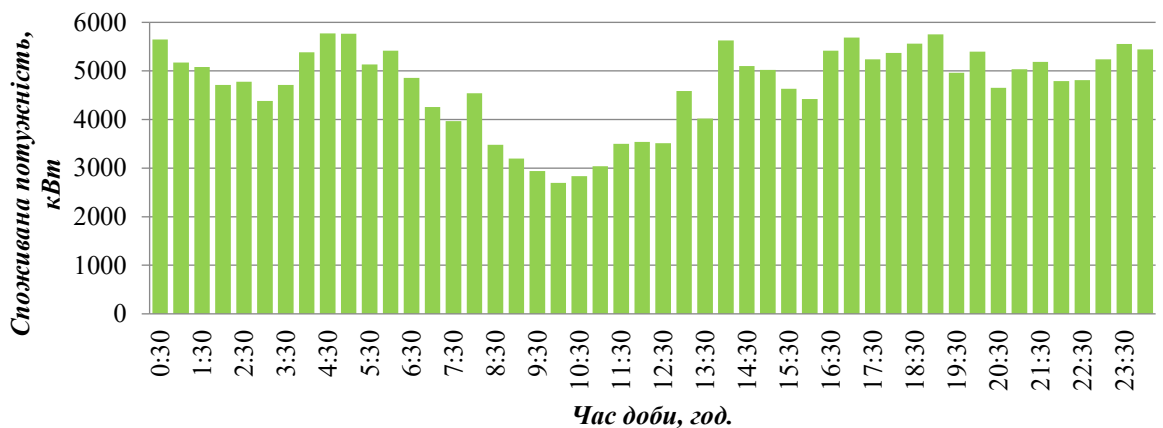
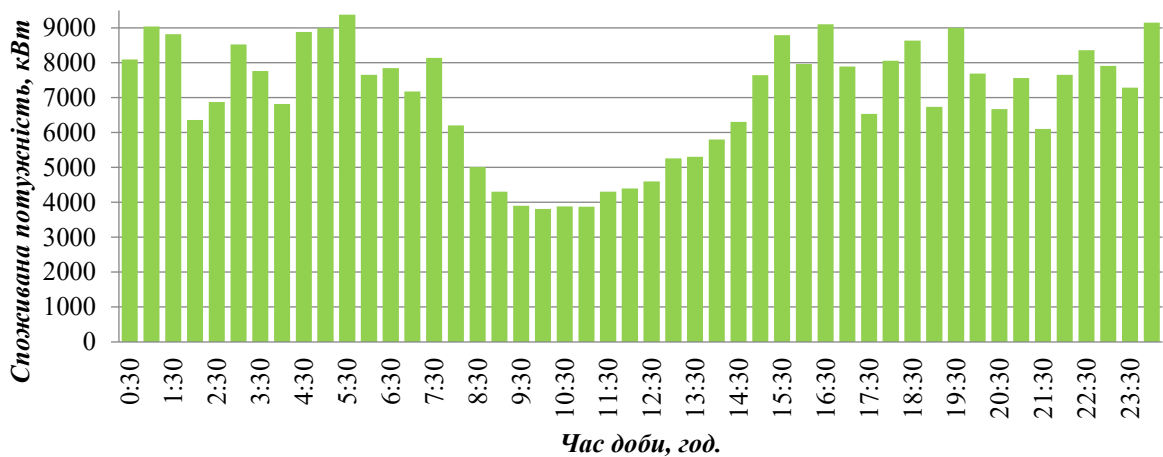


Рисунок 7.7 – Фактичні добові ГЕН двох різних вугільних шахт
Західного Донбасу

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 [86, 87].

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 [88].

7.4 Модель добового профілю електроспоживання вугільної шахти

Одним із основних викликів для Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України є проблема забезпечення пікових електричних навантажень, яка останнім часом тільки ускладнилася через військові

дії та масовані атаки ворога на енергетичну інфраструктуру нашої країни. Безпосередньо добові графіки виробництва та споживання електричної енергії в ОЕС України для різних періодів року характеризуються значною нерівномірністю, що викликана в основному за рахунок приросту побутового та комунального електроспоживання [88].

Визначальний вплив на форму графіка електричного навантаження (ГЕН) енергосистеми має населення та комунально-побутові споживачі, частка електроспоживання яких з урахуванням спаду промислового виробництва (особливо металургії) в сукупному енергобалансі перевищує 50 %. Слід зазначити, що регулювальний потенціал вказаних 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 власного електроспоживання за умови зміни режиму роботи та наявності технологічних процесів, які можуть бути зміщені у часі з урахуванням добової динаміки зміни вартості електричної енергії на оптовому ринку [81].

Отже, сучасні принципи електрозабезпечення енергоємних промислових підприємств ґрунтуються на необхідності вирівнювання добового ГЕН енергосистеми, що пов'язано із дефіцитом пікових потужностей, високими питомими витратами палива на теплових електростанціях через необхідність використання їх для роботи в маневреному режимі, поганим технічним станом устаткування, низькою якістю палива та іншими причинами. Варто зазначити, що негативна характеристика нашої енергосистеми з точки зору регулювання добового профілю електроспоживання мала місце й до військової агресії, а зараз тільки посилилася. Тому диференційована за зонами доби вартість електроенергії на оптовому ринку має стимулювати

потужні підприємства до регулювання режиму електроспоживання, яке зводиться до перенесення часу роботи певних споживачів-регуляторів (СР) із зон максимальних навантажень в енергосистемі в інші зони без шкоди технологічному процесу.

Вимоги часу призводять до необхідності підвищення енергетичної безпеки вуглевидобувних підприємств: електроенергії завжди має бути стільки та такої якості, скільки потрібно для забезпечення стабільного функціонування шахти. Централізоване електропостачання, на превеликий жаль, не дає повної впевненості у цьому питанні, що і є одним з основних його недоліків. До інших слід віднести низьку ефективність: вугілля видобувають на шахті й транспортують до теплових електростанцій, де спалюють із низьким коефіцієнтом корисної дії ($\approx 30-33\%$), що забезпечує викиди значного обсягу шкідливих речовин, а вироблену електроенергію знову повертають підприємству, але вже з істотними втратами в елементах системи електропостачання. Більш енергетично та економічно ефективний варіант – децентралізоване енергопостачання шахти або групи шахт від власного джерела енергії з високим коефіцієнтом корисної дії та маневреністю, тим паче, що для його сталої роботи є власне паливо – вугілля та/або метан. Таке джерело забезпечить прилеглі підприємства теплом та електроенергією, собівартість вироблення якої буде нижчою, ніж вартість у енергосистемі, та, найголовніше, підвищить енергетичну безпеку за рахунок можливості функціонування шахти навіть у разі повного припинення централізованого енергопостачання [89, 90]. Окрім цього, не варто відкидати варіант енергозабезпечення вуглевидобувного підприємства від «популярних» сьогодні сонячних та вітрових електростанцій.

Аналізу режимів електроспоживання та їх ефективності загалом для вугільних шахт та її окремих технологічних процесів присвячені певні цикли наукових робіт. Так, у роботі [91] розглядається

математична модель для визначення комплексної енергоефективності вугільних шахт та ранжування їх за цим показником. Автори роботи [72] розробляють багатофакторне прогнозування електроспоживання вугільної шахти за допомогою нейронної мережі в розрізі річного інтервалу часу. Роботи [73, 74] присвячені обґрунтуванню та розробці багаторівневої інтелектуальної системи керування електроспоживанням стаціонарних установок гірничо-збагачувальних комбінатів та рудних шахт. Аналізу та підвищенню енергоефективності окремих технологічних процесів вугільних шахт присвячені роботи [71, 77, 80, 87]. Однак автори наведених робіт не розглядають вуглевидобувне підприємство як потенційний споживач-регулятор залежно від джерела енергії (або їх комбінації) та можливості відповідного коригування режимів електроспоживання основних технологічних процесів.

Таким чином, метою роботи є аналіз режимів електроспоживання вугільних шахт та визначення їх показників в контексті реалізації різних способів енергозабезпечення.

Аналіз значень річної кількості годин використання максимуму активної потужності T_m для вугільних шахт з урахуванням максимально можливого й економічно виправданого залучення електроприймачів як СР, що дають змогу здійснювати «глибоке» регулювання електроспоживання, свідчить, що за таких умов T_m може зменшуватися до 3000-3500 год за нормального значення для вугільних шахт на рівні 4500-5500 год. При цьому підприємство, здійснюючи регулювання, знижує величину T_m для власного профілю електроспоживання, а для ГЕН енергосистеми – підвищує.

Для умов актуального сьогодні децентралізованого енергопостачання (за рахунок власних джерел розподіленої генерації) та раціонального використання генерованої потужності для підприємства виникає аналогічна ситуація, як і для енергосистеми у разі

централізованого електропостачання, за якого необхідно забезпечити найбільш рівномірний профіль електроспоживання, чого практично можливо досягти при $T_m = 6000-7000$ год. Таким чином, вугільна шахта, електропостачання якої може здійснюватися як централізовано, так і децентралізовано, з метою ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів повинна мати можливість забезпечити режими електроспоживання для діапазону значень $T_m = 3000-7000$ год. При цьому максимум активної потужності споживача може змінюватися до 2 разів [81].

Отже, промислові підприємства мають запроваджувати заходи з регулювання режимів електроспоживання, використовуючи з цією метою споживачі-регулятори, 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 нормальному протіканню технологічного процесу, у якому вони задіяні.

Припустимо, що максимальна споживана вугільною шахтою електрична потужність до регулювання режиму електроспоживання P_m близька за величиною із навантаженням, розрахованим на стадії проектування, та визначає вибір елементів системи електропостачання (силових трансформаторів, магістральних повітряних і кабельних ліній, комутаційної апаратури тощо), за якими визначаються капітальні витрати. Диференційована за зонами доби вартість електроенергії на оптовому ринку є економічним стимулом для регулювання режиму електроспоживання, коли у результаті виконання зазначених заходів величина P_m може змінитися або залишитися приблизно на тому самому рівні. Позначимо максимальне навантаження вугільної шахти при регулюванні режиму електроспоживання як P'_m .

Припустимо, що в результаті перенесення часу роботи СР із пікових зон у зони з дешевшою електроенергією відбувається певне вирівнювання добового профіля електроспоживання шахти та, відповідно, зниження максимальної споживаної потужності ($P'_m < P_m$). На стадії експлуатації це призводить не тільки до зниження оплати за електроенергію, а й до зменшення навантаження на елементи системи електропостачання та появи їх надлишкової пропускної спроможності, а на стадії проектування – до можливості вибору таких елементів меншого типорозміру і, тим самим, зниження капітальних витрат.

Можливий зворотній випадок, коли за рахунок регулювання режимів електроспоживання відбувається зростання максимальної споживаної потужності ($P'_m > P_m$). На стадії експлуатації це призводить до зниження оплати за електроенергію шахтою з одночасним збільшенням навантаження на елементи системи електропостачання та їх потенційним перевантаженням, а на стадії проектування – до необхідності вибору таких елементів більшого типорозміру і, тим самим, підвищення капітальних витрат.

Добовий профіль електроспоживання шахти у випадку, коли максимальне навантаження до і після регулювання режиму електроспоживання залишається незмінним ($P'_m = P_m$) представляє найменший практичний і теоретичний інтерес. Вартість електроенергії зменшується за рахунок зниження її споживання у пікових зонах.

Виконаний аналіз підтверджує важливість точного визначення максимальних електричних навантажень як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації підприємства у сучасних ринкових умовах, коли споживачі економічно зацікавлені у регулюванні режимів електроспоживання та вирівнюванні ГЕН енергосистеми. На жаль, наявні методи розрахунку електричних навантажень не враховують зазначених тенденцій через те, що використовувані методи (статистичний модифікований, коефіцієнта попиту, максимуму, питомої

витрати електроенергії тощо) розроблені для умов «нормального» протікання технологічного процесу і, відповідно, режиму електроспоживання, а завдання визначення електричних навантажень зведене до розрахунку величини півгодинного максимуму, що матиме місце хоча б один раз на зміну. Окрім цього, зазначені методи не дають змоги визначити періоди споживання максимального навантаження, інформація щодо яких дасть можливість уникнути його збільшення під час зміни часу роботи СР.

Зазначених недоліків можна уникнути, якщо максимальні електричні навантаження шахти визначати за модельованими добовими профілями електроспоживання, що відповідають новим режимам технологічних процесів. Формування таких профілів здійснюється шляхом перебору можливих варіантів індивідуальних ГЕН для електроприймачів з урахуванням їхніх технологічних обмежень та необхідності реалізації заходів щодо регулювання режимів електроспоживання. У такому разі потрібно використовувати потужний апарат моделювання індивідуальних і групових ГЕН для їхнього формування, аналізу та подальшого представлення.

Інший варіант полягає у всебічному аналізі технологічних процесів вугільної шахти та визначенні не тільки самих СР, а й їх навантаження при регулюванні режимів електроспоживання окремо для кожної із зон доби. Тут передбачається, що її зміна в часі буде відома і врахована наявними розрахунковими методами, а сумарна споживана протягом доби потужність електроприймачів, які не беруть участі в регулюванні, майже не змінюється, оскільки вони працюють у незмінному режимі. Наприклад, для вугільної шахти необхідно передбачити збільшення максимального навантаження в години напівпіку та нічного провалу за рахунок увімкнення додаткової кількості насосів головного водовідливу, максимального навантаження конвеєрного транспорту та вугільного

підйому для транспортування накопиченого вугілля у акумулюючих бункерах (за їх наявності) тощо.

Виконані дослідження свідчать, що у загальному випадку ГЕН окремих електроприймачів вугільних шахт можна представити трьома основними кластерами, що формують груповий профіль електроспоживання (рис. 7.8). Групування графіків на три кластери виконано на основі інструментальних спостережень та аналізу їх результатів. За основні ознаки подібності ГЕН одного кластера прийнято топологію графіка та дисперсію (або стандарт) навантаження. Додатковою ознакою подібності є технологічний режим (регламент) роботи електроприймача з урахуванням наявності або відсутності технічних та інших пристроїв для регулювання режимів електроспоживання.

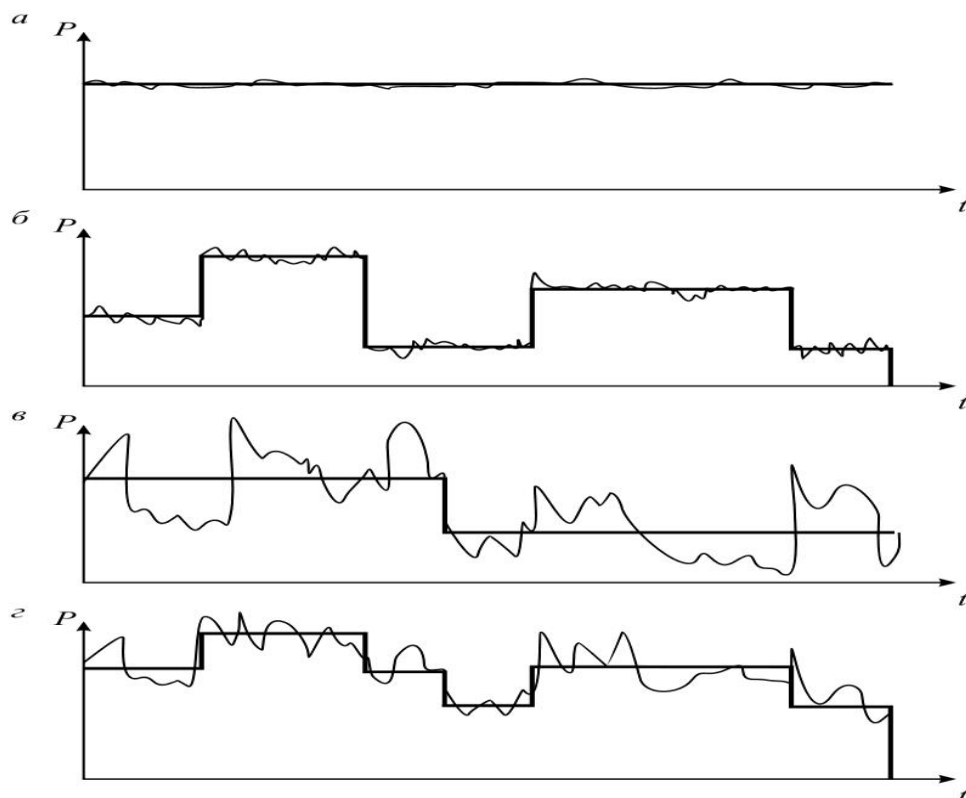


Рисунок 7.8 – Моделі індивідуальних ГЕН електроприймачів вугільної шахти: а – перша група, б – друга, в – третя група, г – груповий профіль

Як відомо, дисперсія ГЕН визначається різницею $DP = P_{\text{СК}}^2 - P_{\text{С}}^2$, де $P_{\text{СК}}$ та $P_{\text{С}}$ – відповідно середньоквадратична та середня активна споживана потужність. Стандарт (середньоквадратичне відхилення) навантаження визначається як $\sigma P = \sqrt{DP}$. При осередненні добового ГЕН на $N = 48$ півгодинних інтервалів $P_{\text{СК}}$ і $P_{\text{С}}$ дорівнюють:

$$P_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N P_i^2}{N}}, \quad P_{\text{С}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}, \quad (7.1)$$

де P_i – осереднена за i -й півгодинний інтервал споживана потужність, кВт.

На рис. 7.8, а для першої групи електроприймачів наведено лінійну рівномірну (одноступеневу) модель графіка навантаження, для другої групи (рис. 7.8, б) – ступеневу модель, для третьої групи електроприймачів (рис. 7.8, в) – модель, для якої індивідуальні графіки потужності електроприймачів нерівноперіодичні. Ступенева модель може бути представлена дво- і триступеневою. Слід зазначити, що для моделей (рис. 7.8, б і в) розглянуто дисперсії навантаження одного ступеня, тобто ті, що відносяться до часу одного циклу ввімкнення.

Зазначені моделі графіків навантаження мають відповідні дисперсії, що ускладнює їх моделювання та формування групових профілів електроспоживання шахти. Для визначення еталонних ГЕН розглянутих трьох моделей виконано фільтрацію відповідно до наступної процедури. Максимум півгодинного середнього навантаження:

$$P_{\text{М}} = P_{\text{С}} + \alpha_{\text{С}} \sqrt{DP_{30}}, \quad (7.2)$$

де DP_{30} – дисперсія середніх півгодинних навантажень за час увімкнення;

α_c – статистичний коефіцієнт, що враховує ймовірність перевищення поточним навантаженням $P(t)$ рівня P_m , який за нормального закону розподілу $\alpha_c = 1,6-1,7$.

Враховуючи припущення для досліджуваних навантажень, що максимальна та мінімальна величина $P(t)$ є рівновіддаленими від середнього значення P_c за час увімкнення, з (7.2) отримаємо «відфільтровану» постійну складову графіка навантаження

$$P(t)_{\text{пос}} = P_c - \alpha_c \sigma P \quad (7.3)$$

та «відфільтровану» максимальну випадкову складову ГЕН

$$P(t)_{\text{вип}} = 2\alpha_c \sigma P. \quad (7.4)$$

Аналіз отриманих результатів розрахунків показників індивідуальних ГЕН для шахт з пологим та похилим заляганням пластів дозволяє встановити, що його постійна складова у груповому профілі електроспоживання шахти переважає та становить 70-75 %, а випадкова значно менша – 25-30 % (див. табл. 7.3). Це дозволить нам коректно обирати потужність та режими роботи джерел енергії за комбінованого способу енергозабезпечення.

Крім того, індивідуальні ГЕН характеризуються розрахунковими коефіцієнтами форми ($K_f = P_{\text{ск}} / P_c$) і заповнення графіка ($K_{зг} = P_c / P_m$). Аналізуючи дані табл. 7.3 зазначимо, що ГЕН електроприймачів I групи мають мінімальне значення K_f і максимальне $K_{зг}$, що ще раз підтверджує рівномірний характер навантаження цих електроустановок [71]. Навпаки, електроприймачі III групи характеризуються випадковим режимом роботи, тому й коефіцієнт форми для їхніх графіків максимальний, а заповнення графіка – мінімальний.

Таблиця 7.3 – Показники профілів електроспоживання груп електроприймачів вугільних шахт

Група електроприймачів	Середня потужність від загальношахтної, %	Стандарт навантаження, %	Потужність від загальношахтної після фільтрації, %		Середнє значення коефіцієнтів для груп ЕП	
			постійна складова	випадкова складова	K_{ϕ}	$K_{зз}$
I						
- вентилятор головного провітрювання;	20,5	4,1	19,10	1,4	1,04	0,9
- підземне освітлення;	1,5	2,5	1,44	0,06		
II					1,18	0,55
- вугільний та породний підйоми;	18,0	10,0	15,03	2,97		
- головний водовідлив;	19,5	9,0	16,61	2,89		
- компресорна станція;	1,5	5,0	1,38	0,12		
- конвеєрний транспорт;	11,0	15,0	8,28	2,72		
- освітлення поверхні;	0,5	22,0	0,32	0,18		
III					1,3	0,38
- вантажо-людський підйом;	6,0	36,6	2,38	3,62		
- очисні та підготовчі вибої;	13,5	33,8	5,97	7,53		
- котельня;	3,2	50,0	0,60	2,60		
- склади та допоміжні цехи;	3,8	60,0	0,03	3,77		
- АПК.	1,0	60,0	0,02	0,98		
Усього	100	-	71,15	28,85		

7.5 Стаціонарні установки шахт як потужні споживачі реактивної енергії

Потужні стаціонарні технологічні установки вугільних шахт характеризуються зовсім різними за профілем режимами активного електроспоживання:

- головний вентилятор (ГВ) – рівномірний із низьким значенням стандарту навантаження;

- головний водовідлив – ступеневий із низьким значенням стандарту навантаження;

- головний підйом (ГП) – різкозмінний із високим значенням стандарту навантаження.

Також для таких установок характерні різні типи приводних двигунів – асинхронні з фазним ротором, синхронні та двигуни постійного струму. Однак завдяки відомим перевагам головні вентиляторні та підйомні установки здебільшого обладнуються системами регульованого електроприводу на базі тиристорних перетворювачів основних електричних параметрів: частоти, струму або напруги (системи ПЧСВ, ЕКТЦ, КТЕУ, АТК тощо). Водночас, як свідчить практика, основні переваги таких систем у вигляді високої керованості технологічних параметрів (швидкості, продуктивності, тиску тощо) та певного зниження активного електроспоживання обов'язково «доповнюються» значним зростанням споживання реактивної енергії та генерацією вищих гармонік у електричну мережу підприємства. Варто зазначити, що залежно від параметрів самої системи електропостачання (потужності короткого замикання, амплітудно-частотної характеристики тощо) та показників системи регульованого електроприводу (потужність, пульсність та тип перетворювача тощо) зазначені негативні ефекти можуть значно зменшити позитивні.

Загалом дослідженню різноманітних аспектів систем регульованого електроприводу, у тому числі тиристорного, присвячена велика кількість робіт, як навчальних [92, 93], так і наукових [94-96]. Вирішення проблеми низької якості електроенергії, що виникає в електричних мережах при застосуванні подібних систем та іншого нелінійного навантаження, всебічно розглядається авторами у роботах [97-100].

Для умов вугільних шахт в контексті розв'язуваного науково-практичного завдання системи електроприводу стаціонарних установок незалежно від типу приводного двигуна можна класифікувати за одним критерієм – застосуванням тиристорного перетворювача (ТП). Будова, схемні рішення, конструктивне виконання, автоматизація та режими «класичних» систем (без ТП) досить повно викладено в численних літературних джерелах, наприклад, у роботах [92, 93]. Для підйомних установок із таких систем набув поширення "класичний" асинхронний електропривод із реостатним регулюванням у колі ротора, якому притаманна низка недоліків, найсуттєвішими з яких є неможливість точного підтримання швидкостей дотягування без застосування регульованого механічного гальма та значні втрати електроенергії. Величина цих втрат прямо пропорційна різниці між номінальною і зниженою швидкостями, і часу руху на зниженій швидкості. Однак простота, відносно низька вартість і відсутність у минулому інших конкурентоспроможних електроприводів зумовили широке поширення асинхронного реостатного приводу на шахтних підйомних установках. Для вентиляторів головного провітрювання все ще застосовується система синхронного електроприводу з незалежним збудженням, основними перевагами якої є відносно невисока вартість і можливість компенсації реактивної потужності під час роботи в режимі перезбудження. Однак певні недоліки призводять до її витіснення іншими системами з використанням ТП: великі пускові струми (особливо

для потужних вентиляторів) і значна тривалість пуску, необхідність влаштування системи збудження, низька надійність тиристорних збудників тощо. Регулювання продуктивності вентилятора при «класичному» синхронному електроприводі здійснюється за допомогою механічних пристроїв при постійній частоті обертання ротора двигуна.

Для головного підйому як системи тиристорного електроприводу в основному застосовуються «тиристорний перетворювач (керований випрямляч) – двигун постійного струму» (ТП-ДПТ) та «асинхронний тиристорний каскад» (АТК). В електроприводах за системою ТП-ДПТ регулювання кутової швидкості двигуна здійснюється зміною напруги живлення ланцюга його якоря (так званий вентильний перетворювач напруги). Виконання цієї функції фазовим способом у діапазоні від нуля до номінального значення покладено на ТП (керований випрямляч). Характерним прикладом системи ТП-ДПТ є використання електропривода комплектного тиристорного постійного струму серії ЕКТЦ (подібна серія – КТЕУ) з мікропроцесорною системою керування, призначеною для механізмів, які працюють у режимах регулювання частоти обертання (швидкості), положення, моменту, потужності, а також струму збудження. У системі АТК нерегульований діодний випрямляч в ланцюзі ротора (відповідно до вентильного каскаду) на тиристорний (керований) випрямляч. Це забезпечує додаткові переваги за рахунок керованості роторного перетворювача, а саме двонаправленість потоку енергії. Електропривод АТК забезпечує незалежне керування швидкістю і моментом двигуна за рахунок регулювання струму ротора (струму мережевого перетворювача), що дозволило досягти регульовальних властивостей, порівнянних з електроприводом постійного струму.

Для електроприводу головних вентиляторів вугільних шахт в основному використовуються дві системи з ТП: асинхронний тиристорний каскад на базі асинхронного двигуна з фазним ротором і

високовольтний синхронний перетворювач частоти (ПЧСВ) із ланкою постійного струму. Система ПЧСВ призначена для регулювання частоти обертання механізмів із приводними синхронними двигунами (СД) напругою 6 (10) кВ потужністю від 1 до 10 МВт з усіма відомими перевагами та недоліками перетворювачів частоти [71, 79, 80].

Профілі електроспоживання технологічних установок відповідають, в основному, змінному або добовому часовому інтервалу. Для наочного порівняння на рис. 7.9 наведені фактичні добові графіки електричних навантажень (ГЕН) головного вентилятора із СД номінальною потужністю 3200 кВт з системою регульованого електропривода на базі ПЧСВ та без неї, а на рис. 7.10 – для іншої вентиляторної установки потужністю 1250 кВт за тих самих варіантів.

Доцільність застосування систем регульованого електроприводу оцінюють здебільшого з погляду підвищення енергетичної ефективності та технологічних переваг. Якщо переваги, пов'язані з керуванням технологічним процесом, не викликають сумнівів, то перший фактор (особливо в частині зниження технологічної витрати електроенергії) не настільки очевидний. У цьому випадку величина такого зниження залежить від режиму роботи установки та наявного діапазону регулювання її технологічних параметрів: чим він ширший – тим ефективність застосування регульованого електроприводу вища і навпаки.

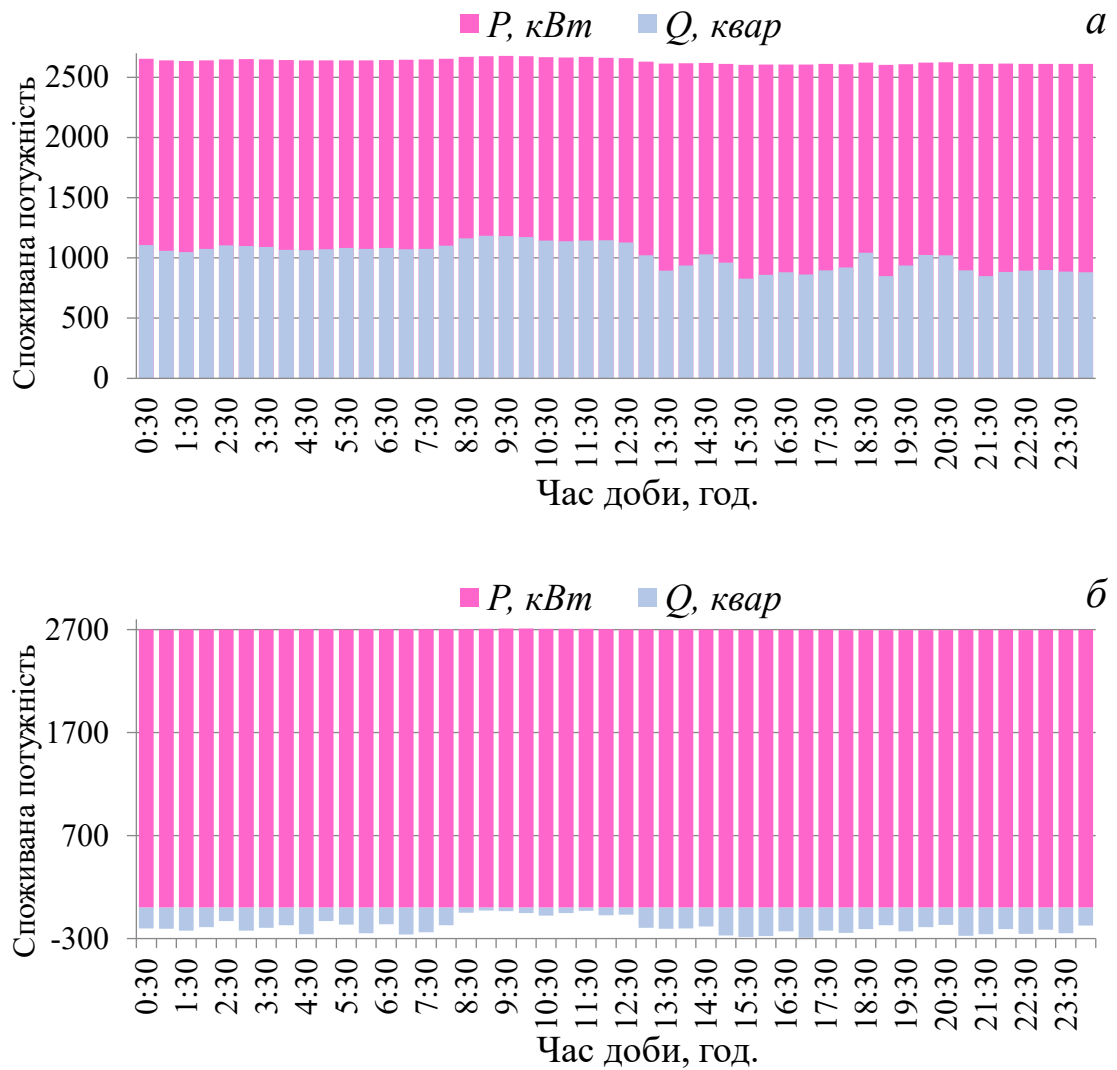


Рисунок 7.9 – Фактичні добові профілі електроспоживання ГВ із синхронним двигуном потужністю 3200 кВт та системою ПЧСВ (а) і «класичним» регулюванням (б)

Розглянуті ГЕН характеризуються дуже малим стандартом активного навантаження (до 0,5%) і мінімальним споживанням реактивної потужності для систем без ПЧСВ (не більш 10 кВАр на рис. 7.10, б) або її генерацією (рис. 7.9, б), що пояснюється відповідним режимом збудження синхронного двигуна.

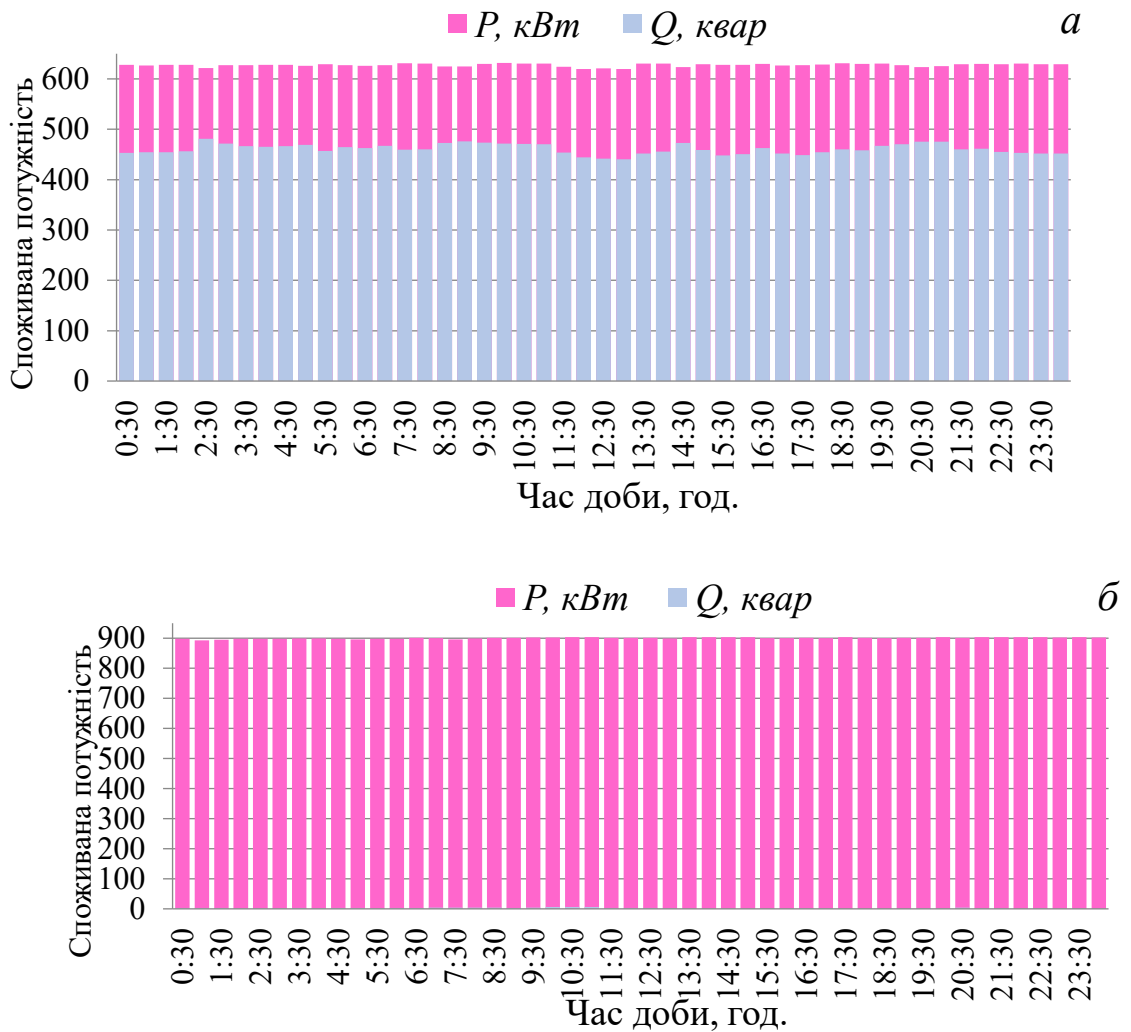


Рис. 7.10 – Фактичні добові профілі електроспоживання ГВ із синхронним двигуном потужністю 1250 кВт та системою ПЧСВ (а) і «класичним» регулюванням (б)

У табл. 7.4 наведені усереднені параметри профілів електроспоживання вентиляторних установок, що визначені для вибірок з кількістю реалізацій: ГВ з потужністю 3200 кВт та ПЧСВ – 7 реалізацій, СД – 14; головний вентилятор потужністю 1250 кВт з ПЧСВ – 24, СД – 12 реалізацій. У дужках вказані значення у відсотках від номінальної потужності двигуна.

Таблиця 7.4 – Усереднені значення параметрів фактичних добових профілів електроспоживання ГВ

Параметр	Позначення	Величина параметру для			
		ГВ потужністю 3200 кВт		ГВ потужністю 1250 кВт	
		з ПЧСВ	без ПЧСВ	з ПЧСВ	без ПЧСВ
Витрата електроенергії: активної, кВт·год реактивної, квар·год	W_P W_Q	63100 24400	64800 -4400	15020 11050	21600 57
Математичне сподівання потужності: активної, кВт реактивної, квар	P_c^* Q_c	2630 (82,2) 1020	2700 (84,3) -180	627 (50,2) 461	900 (72,4) 2,4
Середньоквадратичне відхилення: активної, кВт (%) реактивної, квар	σP^* σQ	23 (0,7) 109	4,1 (0,1) 74,8	3 (0,2) 10	2,6 (0,2) 1,4
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,93	0,998 (вип.)	0,81	1,0

Як бачимо, реалізація такого самого режиму провітрювання шахти, але за відсутності тиристорного електроприводу, спричиняє збільшення завантаження двигуна. Однак якщо для СД потужністю 3200 кВт воно незначне (у середньому на 2-2,5% до $\approx 85\%$), то для двигуна 1250 кВт величина такого збільшення вже суттєва (середнє значення 20-25% до $\approx 75\%$). Це свідчить про те, що перший ГВ навіть із системою ПЧСВ уже працює в режимі, близькому до номінального, коли діапазон регулювання його технологічних параметрів практично відсутній. Зниження добового активного електроспоживання складає усього $\approx 3\%$. Для другого вентилятора стан інший, оскільки зниження завантаження двигуна на 20-25% при застосуванні системи ПЧСВ підтверджує широкий діапазон зміни технологічних параметрів вентилятора (тиску і продуктивності). Для таких умов зниження добового активного електроспоживання складає вже значущі $\approx 30\%$. Однак зміни у споживанні реактивної енергії для обох установок величезні.

Для підтвердження зростання реактивного електроспоживання наочнішими будуть фрагменти замірів у вигляді кривих зміни енергетичних показників у характерних циклах роботи головного підйому із двигуном 800 кВт та системою АТК (рис. 7.11, а). Форма кривих свідчить, що значне споживання реактивної потужності спостерігається в періоди неусталеного руху скіпа, тобто у процесі його розгону, гальмування і розвантаження.

У процесі сталого руху скіпа накидів споживання реактивного навантаження не спостерігається, а його величина порівнянна з активною. Наведені фрагменти зміни фактичних енергетичних показників ще раз підтверджують тезу про те, що "глибоке" регулювання технологічних параметрів стаціонарних установок за допомогою тиристорних перетворювачів значно знижує коефіцієнт потужності [81].

На підтвердження цього на рис. 7.11, б наведено криві зміни потужностей у нетиповому циклі вугільного підйому, що виконується під час спуску негабаритного вантажу, в разі використання «класичного» реостатного регулювання асинхронного двигуна потужністю 800 кВт замість системи АТК. Порівняння цих кривих із даними рис. 7.11, а свідчить про значно менше споживання реактивної потужності ніж при застосуванні системи АТК.

Зауважимо, що за умови несинусоїдальності напруги й струму в електричній мережі (що спостерігається при роботі тиристорного електропривода) компенсація реактивної потужності за допомогою найбільш розповсюджених батарей статичних конденсаторів значно ускладнюється або взагалі виявляється неможливою. Це пов'язано з декількома основними факторами.

По-перше, батареї конденсаторів можуть довгий час працювати при перевантаженні струмами вищих гармонік, які не перевищують 30 %, та підвищеній до 10 % напрузі. Однак опір саме конденсаторів значно зменшується зі зростанням частоти, тому у цих умовах термін їхньої

роботи скорочується (особливо це стосується батарей, що приєднуються до мережі безпосередньо, тобто без захисних реакторів).

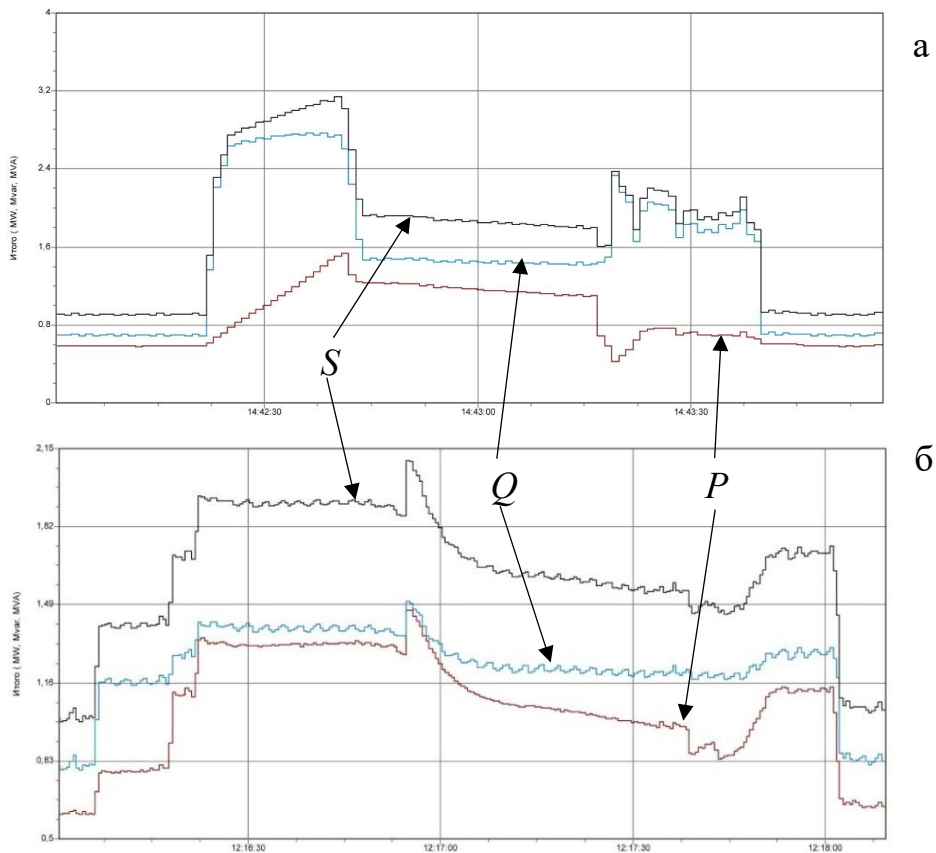


Рисунок 7.11 – Криві зміни потужностей у циклі УП із системою асинхронного приводу

По-друге, значення ємності конденсаторів та індуктивності електричної мережі можуть спровокувати в системі електропостачання режим, близький до резонансу струмів на частоті будь-якої з гармонік. Звичайно, що такий режим спричиняє перевантаження батарей конденсаторів та вихід їх із ладу. По-третє, різкозмінний режим споживання реактивної потужності (короткотривалі стрибки і провали, див. рис. 7.11) при застосуванні систем регульованого електропривода робить неефективним використання нерегульованих або ступенево регульованих конденсаторних установок. Для таких умов необхідне впровадження фільтрокомпенсувальних пристроїв, величина

генерованої реактивної потужності яких регулюється в масштабі реального часу [100].

7.6 Висновки

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 (відносне 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.

Вимоги сьогодення все більше схиляють чашу терезів у бік децентралізованого (або комбінованого) енергозабезпечення промислових підприємств, у тому числі вугільних шахт. У цьому випадку підвищується доцільність та ефективність заходів щодо регулювання режимів електроспоживання, реалізація яких може викликати суттєву зміну величини максимальних електричних навантажень підприємства. Існуючі методи їх розрахунку не адаптовані до сучасних умов експлуатації, за яких економічно вигідно знижувати рівень електроспоживання в години максимальних навантажень в енергосистемі та підвищувати в години мінімальних. Можливі шляхи розв'язання цієї проблеми – визначення електричних навантажень за модельованими ГЕН, що відповідають новому режиму електроспоживання, або для кожної зони доби з урахуванням перенесення часу функціонування споживачів-регуляторів. Для таких умов технологічно-математичне моделювання групових профілів електроспоживання шахти виконується на основі результатів класифікації режимів роботи окремих електроприймачів з метою регулювання режимів електроспоживання стосовно відповідного (децентралізованого або комбінованого) режиму електропостачання. При цьому як еталонні ГЕН для відповідних груп електроприймачів варто приймати рівномірний, ступеневий і випадковий.

Дослідження підтверджують, що використання тиристорних перетворювачів у системах електроприводу технологічних установок

(наприклад, головних вентиляторів та підйомних машин) суттєво збільшує споживання реактивної енергії. Це призводить до зниження коефіцієнта потужності та погіршення якості електроенергії в мережі підприємства. Величина потенціалу зниження активного електроспоживання за таких умов залежить від необхідного (або наявного) діапазону регулювання технологічних параметрів конкретної установки: чим він ширший – тим ефективність застосування регульованого електроприводу вища й навпаки. Традиційні батареї статичних конденсаторів неефективні в умовах несинусоїдальності напруги та різкозмінного навантаження, характерного для тиристорних приводів. Це вимагає впровадження більш складних фільтрокомпенсувальних пристроїв із динамічним регулюванням.

Результати роботи опубліковані [71-80]

8 МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ПРОМИСЛОВИМИ РОБОТАМИ ТА МАНІПУЛЯТОРАМИ

8.1 Особливості модернізація ливарного виробництва промисловими роботами та маніпуляторами

Ливарне виробництво є одним із прикладів ефективного використання ресурсів, адже виливки майже повністю придатні для повторної переробки. Після завершення свого «життєвого» циклу вони підлягають переплавленню. Окрім цього, сучасні технології дають змогу відновлювати до 95% піщаної суміші для виготовлення різних ливарних форм, що позитивно впливає на екологію [101]. Тому ливарне виробництво відіграє важливу роль у сфері переробки. Багато ливарних підприємств інвестують у новітні технології, автоматизацію та енергоефективність, постійно зменшуючи споживання ресурсів. Ключову роль у цьому процесі відіграє цифровізація під час проектування, моделювання та 3D-друку, що дає змогу не лише створювати складні виливки, а й усунути метод проб і помилок, підвищуючи конкурентоспроможність ливарних підприємств і сприяючи впровадженню сталих стратегій [102]. Одним із важливих напрямів автоматизації та покращення енергоефективності є впровадження роботизації [103].

Ливарна промисловість зазнає значних трансформацій завдяки появі автоматизації та роботизації. Ця революція не лише підвищує ефективність та продуктивність, але й покращує безпеку та якість у секторі. Інтеграція автоматизації та робототехніки в ливарні процеси кардинально змінює ситуацію. Традиційно ливарні процеси були і є трудомісткими, включають високий рівень ручної роботи. Робітники повинні виконувати такі роботи, як формування та лиття, часто в

небезпечних умовах. Однак запровадження автоматизації та роботизації змінює цей процес.

Запровадження автоматизації та роботизації в ливарній промисловості є чітким свідченням прихильності галузі до інновацій та прогресу. Це є свідченням стійкості та адаптивності галузі перед обличчям мінливої ринкової динаміки та технологічного прогресу [104].

Ливарні виробництва, історично трудомісткі та небезпечні, розвивалися паралельно з технологічним прогресом. У перші дні робітники вручну обробляли високотемпературний розплавлений метал та виконували фізично важкі завдання. Це призвело до значної загрози безпеці та потенційної невідповідності якості лиття. Однак у міру розвитку промислової революції почали формуватися механізація та автоматизація.

Технологічні досягнення в автоматизації ливарного виробництва відбуваються з 1950-х років [105]. Ці ранні автоматизовані системи здебільшого передбачали механізоване оброблення, переміщення матеріалу та операції формування, що зменшувало потребу в ручній праці та пом'якшувало деякі ризики безпеки.

Останніми роками «Промисловість 4.0», яка головним чином характеризується інтеграцією кіберфізичних систем, інтернету речей та штучного інтелекту, привела до нової ери автоматизації ливарних виробництв. Сучасні системи розроблені для автономного виконання повторюваних завдань, таких як заливка, різання та подрібнення, з мінімальним втручанням людини [105].

Досить очевидно припустити, що автоматизація відіграє і продовжуватиме відігравати значну роль у вдосконаленні ливарних операцій, переважно через скорочення людської праці та загальну ефективність операцій.

Серед різних типів роботів найбільший попит мають автоматизовані промислові роботи. Роботизовані системи найближчого

майбутнього дозволять замінити людину на більшості основних і допоміжних виробничих операцій, сприяючи автоматизації технологічних процесів у різних промислових галузях. Особливо це актуально для ливарно-металургійної промисловості, де існують небезпечні та шкідливі умови праці, зокрема в гарячих цехах [106-108].

Серед різновидів робіт найбільш затребуваними є маніпуляційні автоматизовані промислові системи. Маніпулятор компанії ABB розташований поруч із роторним барабаном і здійснює нанесення сухого компонента на модельні кластери, обертаючи модельні кущі всередині барабана [109].

Технологія лиття за газифікованими моделями (ЛГМ) із застосуванням роботизованих систем [107] включає використання термічної печі з обертовим подом виробництва CAN-ENG Furnaces International Limited (США). Робот завантажує піч виливками в три ряди, що оптимізує термообробку алюмінієвих виробів при температурі 500-550 °С. Також ці печі підходять для ізотермічної витримки залізобуглецевих сплавів у діапазоні 350-450 °С. Подібні системи використовуються в схемах ливарного РКК [110].

Залежно від методу лиття ливарні роботи класифікуються на чотири основні категорії: лиття в піщані форми, лиття під тиском, гравітаційне лиття та ЛГМ-процес [111].

Існує роботизована системи перенесення пластин, яка відноситься до інноваційного обладнання для ливарного виробництва. Ця система містить роботизовану руку з 4 DOF для передачі пластин між касетою та камерами обробки. Вона має інтелектуальну автоматизацію для виготовлення пластин, у якій потрібно обробляти кілька пластин та камер одночасно. Роботизована система передбачає інтеграцію виявлення дефектів та визначення кінцевої точки обробки пластини [112].

Робот є автоматизованою машиною, призначеною для відтворення рухових та інтелектуальних функцій людини. Маніпуляційні роботи, що виконують універсальні завдання, оснащені виконавчими пристроями-маніпуляторами (механічними руками) [113].

Сучасні ливарні підприємства постійно шукають способи підвищення ефективності, гнучкості та безпеки робочого середовища, орієнтуючись на створення енергоефективних процесів із мінімальним впливом на довкілля. Використання роботизованих систем суттєво спрощує досягнення необхідної продуктивності у галузі та підтримує конкурентні переваги [114].

Збільшення корисного навантаження на роботизовані системи для ливарних операцій сприяє оптимізації виробничих циклів порівняно з традиційними методами лиття, що є основним фактором зростання ринку ливарної роботизації. Впровадження технологічних інновацій, спрямованих на скорочення часу інтеграції роботів у процес лиття та розширення їхнього функціоналу, також є ключовим чинником, що стимулює попит на такі рішення [113].

Розвиток ринку ливарної роботизації стримується тим, що відкриті приводи роботизованих систем важко захистити від пилу та рідин. При цьому оптимізація виробничих витрат та класифікація методів лиття на чотири основні категорії – лиття в піщані форми, лиття під тиском, гравітаційне лиття та ЛГМ-процес – залишаються ключовими аспектами галузі.

Розглянемо приклади новітніх технічних рішень, що демонструють взаємодію людей і коботів, як це реалізовано у випадку роботизованих систем Кука та АВВ [115]. У ливарному виробництві подібне впровадження найбільш доцільне для операцій точного, великосерійного та масового лиття. Ідеальним варіантом є поєднання переваг людини (гнучкість, суб'єктивність рішень, креативність, досвід, інтуїція, широкий огляд) з перевагами роботизованих систем

(автоматизованість, висока точність, потужність), що сприяє ефективному розподілу завдань та підвищенню загальної продуктивності.

Лиття в пісок застосовують для виготовлення таких елементів, як опори двигуна та корпуси диференціалів. Потім ці компоненти розрізають та подрібнюють за допомогою промислового робота типу IRB 6660 ABB у виробничій камері виробництва Automations Robotic GmbH. У цьому процесі робітник затискає сировину деталі в позиціонері заготовки, який транспортує деталі в комірку робота для обробки. Після роботизованої обробки частина передається в наступну робочу станцію [116].

Зменшивши швидкість робота при високих силах, одночасно контролюючи сили можливо зменшити ризик пошкодження або неправильного оброблення. Це продовжує термін їх служби. Технологія контролю не тільки позитивно впливає на довговічність інструментів, а й життєвий цикл шпинделя та точність осей робота. Крім того, за допомогою цієї технології зменшується час циклу на 20 відсотків [116, 117].

Працівники, які займаються литтям у пісок, стикаються з суворими умовами, а безпека їх роботи є низькою. Існуючі заливні роботи мають недостатню стабільність та несучу здатність і не можуть виконувати інтелектуальну заливку відповідно до вимог процесу заливки. Існує гібридний розливний робот, який вирішує ці обмежень, а технологія апаратного керування на основі бачення (NIL) вирішує проблеми з керуванням в режимі реального часу моделюванням розливу та процесу розливу [118].

Ливарні підприємства постійно шукають нові способи підвищення продуктивності, скорочення витрат підвищення якості. Високоєфективні технології роботів АББ дозволяють зменшити виробничі витрати та

відсотки браку, збільшений час безвідмовної роботи та стабільна найвища якість є перевагою роботів АББ [119].

Промисловий роботизований процес виробництва литва передбачає формування, додаткову обробку та холодну обробку. За допомогою роботів спочатку на стадії формування здійснюється інтелектуальна обробка піщаного сердечника. Потім на етапі післяобробки реалізується інтелектуальне чорнове лиття. Етап холодної обробки реалізує інтелектуальне видалення задирок, зняття фаски, очищення та видування роботами [120].

Існує робот, який допомагає виготовляти швидкі прототипи форм та зразків. Шестиосьовий робот KUKA RMC90 допомагає прискорити виробництво лиття з більш економічними та точними результатами. Роботизована фабрика для візерунків KUKA включає системи обробки цвілі та збору пилу, які сприяють безпечній та екологічній обробці. Ще одна економія часу за допомогою робота пов'язана з фрезеруванням блоків у формі піску. Робот може створювати більшість геометрій прес-форми, які зазвичай включають кілька сердечників або структурних деталей, і тому роботизовані піщані форми можуть виготовляти більш точні за розмірами виливки. Час виконання замовлень скорочується, оскільки вимоги до інструментів зводяться до мінімуму або усуваються. Однією з найбільших переваг є можливість виготовити деталь, яка точно відповідає кресленню [121].

Серія ливарних роботів KUKA була розроблена для конкретних вимог ливарного виробництва. Завдяки термостійким зап'ясткам роботів, виготовленим зі спеціальної сталі, вони функціонують при екстремальних температурах. Крім того, KUKA має додаткові компоненти для виробничої лінії: від преса для швидкого обрізки до охолоджувальної чаші та повністю розробленої концепції. Інтелектуальне ливарне виробництво можливе завдяки обміну даними через OPC UA. KUKA має хмарну програмну платформу KUKA Connect

для збору цифрових даних у виробництві, надає огляд даних робота KUKA. Використовуючи KUKA Connect, можливо не тільки контролювати продуктивність роботів, але й точно прогнозувати, коли настане час технічного обслуговування. Цикл робота та цикл натискання в комірці автоматично оптимізуються за часом як загальна операція. Таким чином, робот не завжди рухається з однаковою швидкістю, а діє відповідно до виробничого процесу. Це призводить до скорочення часу очікування, а також знос машини зменшується завдяки більш рівномірному потоку. Крім того, на заводі майбутнього параметри робота та преса обробляються одним контролером, що дозволяє здійснювати повний огляд даних системи [122].

Вибір роботів TIE Industrial для ливарного виробництва включає моделі, відомі своєю довговічністю та продуктивністю: Fanuc M- 2000 iA відомий своєю винятковою вантажопідйомністю та радіусом дії, що робить його ідеальним для роботи з великими виливками та виконання складних завдань; ABB IRB 7600 забезпечує надійну конструкцію та універсальну продуктивність, підходить для різноманітних ливарних застосувань, від лиття до обробки; серія KUKA KR QUANTEC F розроблені спеціально для ливарного виробництва, ці роботи забезпечують високу стійкість до тепла та забруднень; Motoman ES 165 D характеризується високою швидкістю та точністю, ідеально підходить для фінішної обробки та ефективної роботи з невеликими виливками [123].

Попри значні досягнення у сфері автоматизації ливарного виробництва, залишаються відкритими низка наукових питань, які потребують подальших досліджень, однією з яких є інтеграція літаючих роботів у виробничий цикл – вивчення можливостей використання дронів не лише для моніторингу, а й для активного втручання у виробничий процес, наприклад, транспортування матеріалів або нанесення покриттів.

8.2 Дослідження модернізації ливарного виробництва промисловими дронами

Дослідження інтеграції літаючих роботів у ливарне виробництво проводилися із застосуванням міждисциплінарного підходу, що поєднує експериментальні та моделювальні методи.

Основні етапи дослідження включали розробку сценаріїв використання дронів, визначення можливих завдань для дронів у ливарному виробничому процесі, таких як транспортування матеріалів, нанесення покриттів, контроль якості. Також проводилося математичне моделювання, аналіз траєкторій руху дронів, їх взаємодія з ливарним середовищем та оцінка енергетичних витрат. Експериментальні дослідження передбачали польові випробування для оцінки ефективності застосування дронів у реальних умовах ливарного виробництва. Додатково здійснювався аналіз ризиків та обмежень, визначення технічних та організаційних бар'єрів, оцінка безпеки експлуатації.

Для проведення дослідження був використаний безпілотний літальний апарат DJI Matrice 300 RTK (рис. 8.1), що має можливість автономного управління. Також застосовуються системи навігації, зокрема GPS, RTK та LiDAR, які забезпечують точне позиціонування у ливарних цехах. Датчики контролю навколишнього середовища, такі як камери, тепловізори, спектрометри, дозволяють здійснювати моніторинг процесів лиття. Для аналізу траєкторій та симуляції роботи дронів у ливарному виробництві використовується відповідне програмне забезпечення. Роботизовані маніпулятори забезпечують взаємодію дронів із металевими заготовками та формами.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що інтеграція літаючих роботів у ливарний виробничий цикл дозволить значно підвищити ефективність виробництва. Очікується зменшення часу на

внутрішньоцехове транспортування ливарних матеріалів, мінімізація впливу людського фактора на виконання рутинних операцій у ливарних цехах, підвищення точності нанесення технологічних покриттів на металеві деталі, а також покращення безпеки ливарних виробничих процесів.



Рисунок 8.1 – Безпілотний літальний апарат DJI Matrice 300 RTK

Очікувані результати включають підтвердження ефективності застосування дронів у ливарному виробництві та розробку рекомендацій щодо їх впровадження у технологічні процеси лиття.

Використання дронів у ливарному виробництві відкриває нові можливості для автоматизації та підвищення ефективності технологічних процесів. Основні сценарії їх застосування охоплюють транспортування матеріалів, нанесення покриттів і контроль якості продукції.

Один із ключових сценаріїв передбачає транспортування матеріалів між різними секціями виробництва. Дрон може переміщувати невеликі партії піщаних сумішей, хімічних реагентів або допоміжних компонентів, що дозволяє зменшити затримки у постачанні та оптимізувати логістичні операції. Завдяки автономному управлінню та системам точного позиціонування, таким як GPS, RTK і LiDAR, дрони можуть швидко та безпечно доставляти матеріали у визначені точки виробничого процесу.

Інший сценарій пов'язаний із нанесенням покриттів на металеві заготовки перед або після процесу лиття. Дрон, оснащений розпилювальними системами, може рівномірно наносити антикорозійні або термостійкі покриття на деталі. Це дозволяє підвищити якість продукції, зменшити втрати матеріалів та мінімізувати вплив людського фактора на цей процес. Автоматизація нанесення покриттів також сприяє зменшенню кількості дефектів, покращуючи кінцевий результат виробництва.

Контроль якості є ще одним перспективним напрямком використання дронів у ливарному виробництві. Дрони, оснащені високоточними камерами, тепловізорами та спектрометрами, можуть здійснювати безконтактний моніторинг стану форм та готових виробів. Вони здатні виявляти дефекти лиття, оцінювати рівномірність охолодження металу та передавати зібрані дані в режимі реального часу до систем управління якістю. Це дозволяє своєчасно виявляти проблеми та оперативно коригувати виробничий процес, що сприяє зменшенню кількості браку та підвищенню загальної ефективності виробництва.

Таким чином, інтеграція дронів у ливарне виробництво дозволяє покращити логістичні процеси, автоматизувати нанесення покриттів та забезпечити якісний контроль готової продукції. Використання таких технологій сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню виробничих витрат та покращенню умов праці.

8.3 Математичне моделювання руху дронів у ливарному виробництві

Математичне моделювання дозволяє аналізувати траєкторії руху дронів, їхню взаємодію з ливарним середовищем та оцінювати енергетичні витрати під час виконання виробничих завдань. У цьому

дослідженні розглядається застосування безпілотного літального апарата DJI Matrice 300 RTK для транспортування матеріалів, нанесення покриттів та контролю якості у ливарному виробництві.

Кінематичний аналіз траєкторії дрона. Рух дрона описується рівняннями кінематики за другим законом Ньютона [124]:

$$x(t) = x_0 + v_x t + \frac{1}{2} a_x t^2 \quad (8.1)$$

$$y(t) = y_0 + v_y t + \frac{1}{2} a_y t^2 \quad (8.2)$$

$$z(t) = z_0 + v_z t + \frac{1}{2} a_z t^2 \quad (8.3)$$

де $x_0 = 2$ м, $y_0 = 1$ м, $z_0 = 5$ м – початкові координати дрона;

$v_x = 3$ м/с, $v_y = 2$ м/с, $v_z = 1,5$ м/с – початкові швидкості;

$a_x = 0,5$ м/с², $a_y = 0,3$ м/с², $a_z = 0,2$ м/с² – прискорення.

Динаміка руху дрона визначається рівнянням Лагранжа другого роду [125]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (8.4)$$

де L – лагранжіан системи;

q – узагальнені координати;

Q – узагальнені сили.

Дрон використовується для перевезення невеликих партій піщаних сумішей, легкоплавких металів та допоміжних матеріалів між робочими зонами ливарного виробництва. Завдяки точній навігації (RTK GPS) забезпечується стабільний рух навіть у закритих приміщеннях. Враховуючи вантажопідйомність дрона (до 2,7 кг), оптимізується маршрут, щоб мінімізувати витрати енергії. Оптимальна траєкторія польоту моделюється через алгоритм динамічного програмування

[126], що дозволяє визначити найекономічніший маршрут з урахуванням повітряних потоків та перепадів температур.

Дрон оснащується системами розпилення для нанесення антикорозійних, жаростійких або захисних покриттів на металеві деталі. Враховується рівномірність розпилення, що моделюється рівнянням потоку:

$$Q_s = \frac{m}{t} = \rho V \quad (8.5)$$

де m – маса покриття;

t – час нанесення;

ρ – густина матеріалу;

V – об'єм розпилення.

Для покращення точності розпилення використовується модель турбулентного потоку Нав'є-Стокса [127], що дозволяє прогнозувати напрямки та рівномірність покриття в умовах змінної температури.

Дрон обладнаний високоточними камерами та тепловізорами для моніторингу стану відливки та виявлення дефектів. Використовується спектральний аналіз з оцінкою відхилень від стандартних параметрів. Оптична система аналізу базується на методах машинного навчання [128], що дозволяє автоматично класифікувати дефекти за їхньою природою та ступенем критичності.

Ливарне середовище характеризується високими температурами, сильними електромагнітними завадами та наявністю металевих перешкод, що можуть впливати на навігаційні системи дрона. Температурний вплив враховується через коефіцієнт теплового випромінювання:

$$Q = \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_e^4) \quad (8.6)$$

де $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{Вт/м}^2 \text{К}^4$ – стала Стефана-Больцмана;

$\varepsilon = 0,85$ – коефіцієнт випромінювання поверхні дрона;

$A = 0,2 \text{ м}^2$ – площа поверхні дрона;

$T_s=1200 \text{ К}$ – температура ливарної печі;

$T_s = 300 \text{ К}$ – температура навколишнього середовища.

Графіки, які наведено на рис. 8.1 показують залежність споживаної потужності від маси вантажу та ефективності двигунів від температури середовища. Графік (рис. 8.1) відображає зростання потужності при збільшенні вантажу, а на іншому графіку представлено зниження ККД двигунів через нагрівання (рис. 8.2).

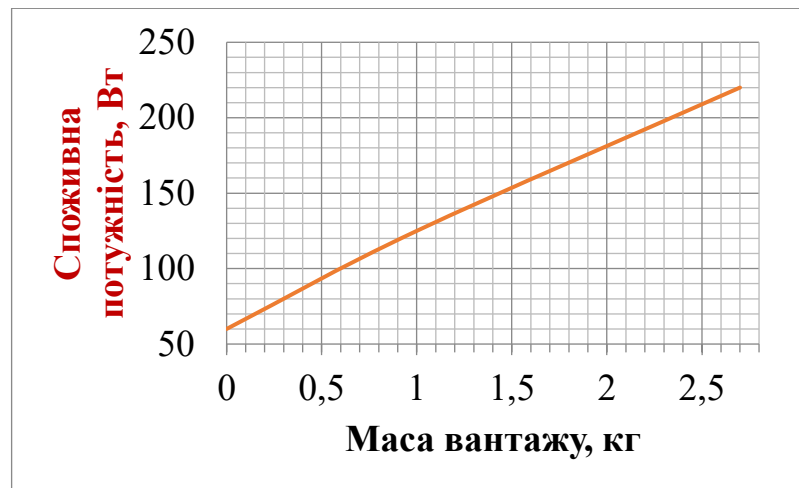


Рисунок 8.1 – Графік зростання потужності при збільшенні вантажу

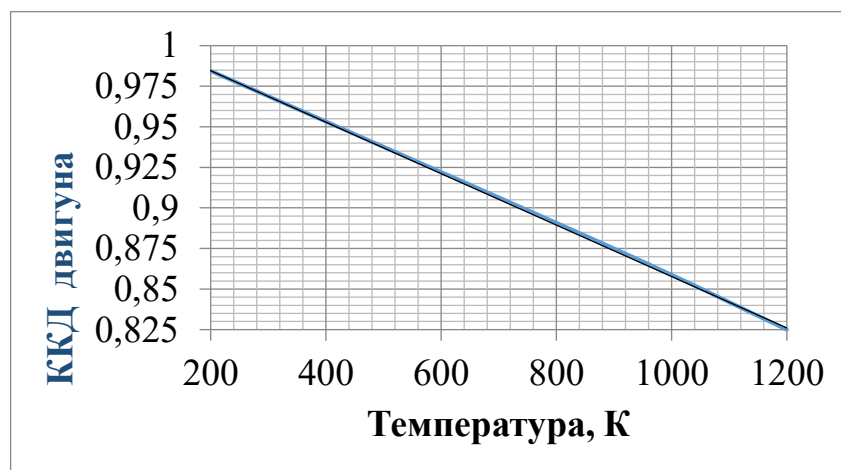


Рисунок 8.2 – Графік зниження ККД двигунів через нагрівання

8.4. Експериментальні дослідження оцінки ефективності застосування дрона

Для оцінки ефективності використання безпілотного літального апарата DJI Matrice 300 RTK у ливарному виробництві було проведено серію експериментальних досліджень. Основними напрямками оцінки стали транспортування матеріалів, нанесення захисних покриттів та контроль якості продукції в умовах підвищених температур та забрудненого середовища.

Експериментальні випробування проводилися у виробничих цехах ливарного підприємства, де оцінювалася продуктивність дрона за кількома ключовими критеріями. По-перше, було проаналізовано швидкість транспортування матеріалів, тобто час, необхідний для доставки вантажу на задану відстань. По-друге, перевірялася точність нанесення покриттів, де оцінювали рівномірність розпилення матеріалу на металеві поверхні. Також проводилася перевірка якості контролю відливки, що включала виявлення дефектів за допомогою камер та тепловізорів. Окрім цього, проводилося вимірювання витрат енергії для оцінки часу автономної роботи та загального енергоспоживання пристрою. Останнім критерієм стала стійкість дрона до впливу ливарного середовища, включаючи високу температуру та підвищену концентрацію металевого пилу.

Під час випробувань встановлено, що дрон DJI Matrice 300 RTK здатний транспортувати вантажі, такі як піщані суміші та допоміжні матеріали, на відстань 50 метрів у середньому за 18 секунд. Використання навантаження до 2,5 кг незначно впливало на швидкість польоту, тоді як при збільшенні ваги до 2,7 кг спостерігалось зниження ефективності на 15%. Отримані результати свідчать про те, що дрон може ефективно застосовуватися для транспортувальних операцій у

межах ливарного цеху, проте рекомендована вага вантажу не повинна перевищувати 2,5 кг для збереження стабільності польоту.

Експерименти з нанесенням покриттів показали високу точність роботи розпилювальної системи. Рівномірність покриття відхилялася не більше ніж на $\pm 5\%$ від заданої товщини при швидкості польоту 1 м/с. При цьому умови підвищеної вологості та високої температури до 800°C не впливали на якість нанесення. Проте ефективне нанесення покриттів у таких умовах вимагало застосування спеціальних термостійких фарб і стабілізації дрона для мінімізації відхилень у траєкторії розпилення.

Контроль якості ливарних відливок за допомогою дрона показав високу ефективність у виявленні дефектів. Тепловізорна система дозволила ідентифікувати 90% поверхневих тріщин, розмір яких перевищував 0,5 мм. Однак для глибшого аналізу дефектів рекомендується застосовувати додаткові інфрачервоні сенсори, що можуть виявляти приховані внутрішні пошкодження деталей.

Оцінка енергетичних витрат показала, що максимальний час автономної роботи дрона без навантаження становив 45 хвилин, тоді як при перевезенні вантажу 2,5 кг, який знижувався до 35 хвилин. Крім того, при роботі в умовах підвищених температур понад 700°C енергоспоживання дрона збільшувалося на 25%, що вказує на необхідність розробки ефективніших систем охолодження бортових електронних компонентів.

Для наочного представлення отриманих результатів було побудовано графіки залежностей рис.8.1-8.5. Встановлено, що при збільшенні маси понад 2,5 кг час транспортування значно зростає, що підтверджує ефективність роботи дрона в умовах обмеженої вантажопідйомності (рис.8.1). Графіки рис.8.2, рис.8.3 показують взаємозв'язок між масою вантажу та часом автономної роботи дрона, а також вплив температури середовища на енергоспоживання. Оптимальним виявилось значення маси 2,5 кг, при якому зберігається

прийнятний баланс між витратами енергії та часом польоту. Крім того, було визначено, що при температурі 700 К енергоспоживання дрона зростає до 125%, що вказує на необхідність додаткових заходів з охолодження електронних систем.

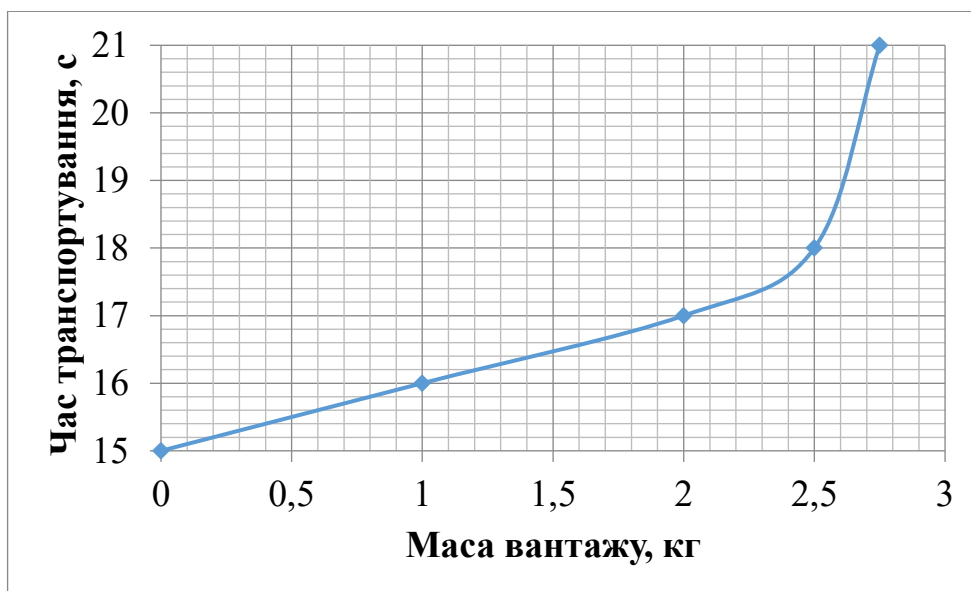


Рисунок 8.3 – Графік залежності часу транспортування та маси вантажу



Рисунок 8.4 – Графік залежності часу автономної роботи та маси вантажу

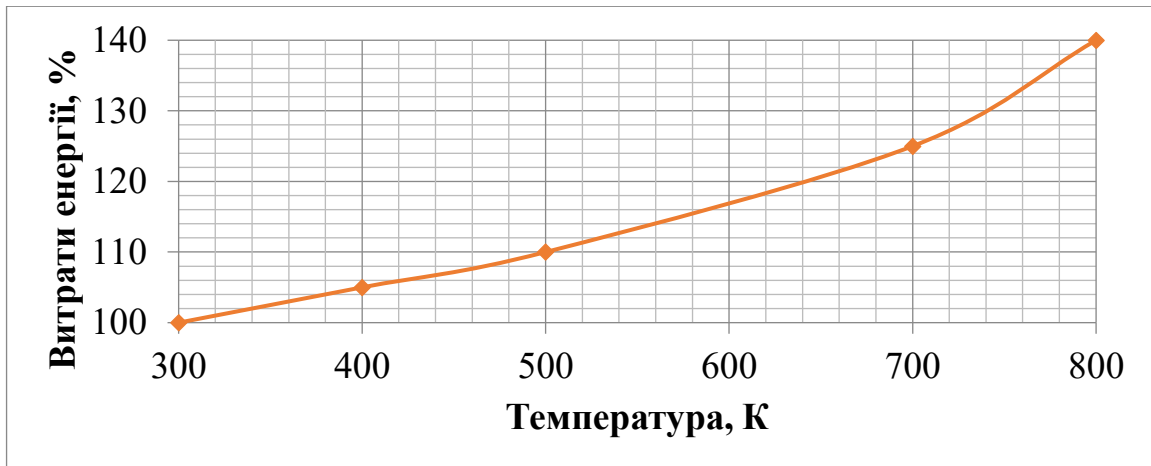


Рисунок 8.5 – Графік залежності витрат енергії та температури

Загалом експериментальні дослідження підтвердили ефективність застосування дрона DJI Matrice 300 RTK у ливарному виробництві. Оптимальна вантажопідйомність не повинна перевищувати 2,5 кг, що забезпечує максимальну стабільність та ефективність роботи. Швидкість транспортування та точність нанесення покриттів відповідають виробничим вимогам, а використання тепловізорів значно підвищує якість контролю відливок. Вплив високих температур потребує подальших досліджень для розробки додаткових систем охолодження та підвищення термостійкості електронних компонентів. У перспективі також доцільно оптимізувати аеродинаміку дрона для покращення стабільності польоту та розширення його функціональних можливостей у складних промислових умовах.

8.5. Аналіз ризиків та обмежень, визначення технічних та організаційних бар'єрів, оцінка безпеки експлуатації дрона

Використання дрона DJI Matrice 300 RTK у ливарному виробництві пов'язане з низкою ризиків та обмежень, які можуть впливати на його ефективність та безпеку експлуатації. Одним з основних ризиків є вплив екстремальних температур, які можуть досягати 800–1200°C. Високі

температури можуть спричиняти перегрів бортових електронних систем, зниження продуктивності акумуляторів та пошкодження корпусу дрона. Для мінімізації цього ризику необхідно застосовувати термостійкі матеріали, активні системи охолодження та розміщення критично важливих електронних компонентів у термозахищених відсіках. Додатково може бути впроваджено систему дистанційного моніторингу температури корпусу та компонентів дрона для своєчасного реагування на перегрів.

Ще одним важливим обмеженням є рівень металевого пилу та забруднень у ливарному середовищі. Потрапляння пилу на сенсори та двигуни може знижувати точність навігації, спричиняти збої в роботі оптичних систем і зношування рухомих елементів. Особливо вразливими є лопасті гвинтів, які при тривалому контакті з абразивними частинками можуть втрачати аеродинамічні властивості. Для запобігання цьому необхідно проводити регулярне очищення дрона, використовувати додаткові фільтраційні системи та герметичні корпуси для критично важливих елементів. Крім того, доцільним є використання адаптивних алгоритмів корекції навігаційних даних, які компенсують можливі похибки в роботі сенсорів.

З технічних бар'єрів варто відзначити обмежену вантажопідйомність дрона. Незважаючи на можливість транспортування матеріалів, навантаження понад 2,5 кг значно знижує ефективність польоту, збільшує енергоспоживання та скорочує час автономної роботи. Вирішенням цієї проблеми може бути застосування спеціальних конструкцій для рівномірного розподілу навантаження, використання легких і міцних матеріалів для транспортних контейнерів та оптимізація траєкторії польоту з урахуванням аеродинамічного опору. Також доцільним є дослідження можливості використання альтернативних джерел енергії, таких як водневе паливо або більш

ємнісні акумуляторні батареї, що дозволять збільшити тривалість роботи без значного збільшення ваги.

Організаційні бар'єри включають необхідність навчання персоналу для роботи з безпілотними системами, а також забезпечення відповідності нормам безпеки. Використання дронів у виробничих умовах потребує чітко визначених регламентів експлуатації, зон безпечного польоту та системи моніторингу для запобігання зіткненням із персоналом та обладнанням. Одним із ключових аспектів безпеки є інтеграція дрона в існуючу систему керування виробництвом, що дозволить синхронізувати його дії з іншими автоматизованими процесами. Це зменшить ризики непередбачених ситуацій та підвищить загальну ефективність роботи.

Також важливо враховувати правові обмеження, що можуть регулювати використання безпілотних літальних апаратів у виробничих приміщеннях. У багатьох країнах існують специфічні вимоги до реєстрації та сертифікації дронів, особливо якщо вони використовуються у зонах підвищеної небезпеки. Дотримання цих норм є обов'язковим для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації безпілотних систем.

Загалом, використання дрона DJI Matrice 300 RTK у ливарному виробництві має високий потенціал, однак вимагає врахування технічних, організаційних та правових бар'єрів. Для підвищення безпеки та ефективності необхідно адаптувати систему навігації, забезпечити захист від перегріву та забруднень, впроваджувати відповідні регламенти експлуатації та розробити систему оперативного контролю стану дрона. Врахування всіх цих аспектів дозволить ефективно інтегрувати безпілотні технології у виробничий процес, мінімізувати ризики та забезпечити стабільність роботи в складних умовах ливарного виробництва.

Виявлені проблеми та бар'єри, пов'язані з експлуатацією дрона в екстремальних умовах, визначають перспективні напрямки подальших наукових досліджень. Основними з них є розробка нових методів термозахисту електронних систем, оптимізація аеродинамічних характеристик дронів для роботи у запилених приміщеннях, вдосконалення систем автономного керування в умовах обмеженої видимості, а також дослідження ефективності альтернативних джерел енергії. Подальші наукові дослідження в цих напрямках дозволять значно підвищити рівень надійності та продуктивності безпілотних технологій у промисловому секторі.

8.6 Висновки

У ході дослідження досягнуто поставлену мету – оцінено ефективність інтеграції дрона DJI Matrice 300 RTK у технологічний цикл лиття для підвищення продуктивності, якості та безпеки виробничих процесів. Аналіз можливостей застосування промислових дронів у ливарному виробництві дозволив визначити їхні основні переваги та обмеження. Використання безпілотників сприяє підвищенню ефективності транспортування матеріалів, контролю якості та нанесення покриттів.

Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати траєкторію руху дрона з урахуванням змін у цеху. Досліджено вплив високих температур на експлуатаційні характеристики, що дозволило визначити критичні межі та заходи для покращення термостійкості.

Оцінено ефективність дронів у виробничих процесах. Встановлено, що їх застосування скорочує логістичні витрати, мінімізує ризики травматизму та підвищує точність виконання операцій. Виявлено технічні виклики, пов'язані з впливом температур, металевого

пилу та електромагнітних завад, що потребує додаткових рішень щодо термозахисту, навігації та конструктивної стійкості.

Отримані результати впроваджені на виробництві ПАТ «Камет Сталь» та у навчальний процес, що підтверджує їхню практичну значущість. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення автономного керування, сенсорних систем та інтеграцію дронів у автоматизовані виробничі процеси.

Результати роботи опубліковані [129-131].

9 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА З ТРЬОМА КООРДИНАТАМИ НА ОСНОВІ ARDUINO

Сучасні тенденції розвитку промисловості, зокрема в галузі обробки матеріалів, диктують потребу у впровадженні гнучких та економічно ефективних систем автоматизації. Одним із ключових напрямів є модернізація та створення нових верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ), які дозволяють підвищити точність, продуктивність і повторюваність технологічних операцій. З огляду на це, дедалі більшої популярності набувають рішення на базі відкритих апаратно-програмних платформ, таких як Arduino, які забезпечують широкий функціонал при мінімальних витратах. Особливо актуальним є створення таких систем для невеликих майстерень, освітніх закладів та аматорських проектів, де застосування промислових контролерів є економічно недоцільним.

Слід зазначити, що впровадження відкритих систем у верстатобудуванні є глобальною тенденцією, що охоплює як навчальні, так і дослідницько-промислові напрями. Завдяки розвитку open-source екосистеми (Arduino, GRBL, LinuxCNC, OpenBuilds), виробники отримують можливість створювати модульні, масштабовані та адаптивні рішення, які легко інтегруються в концепції Industry 4.0. Це не лише знижує вартість автоматизації, але й розширює можливості для інновацій, швидкого прототипування та цифрової трансформації локального виробництва. Активна підтримка спільнот розробників та наявність вільного програмного забезпечення сприяють поширенню таких технологій у сфері металообробки, 3D-друку, лазерної обробки тощо.

Використання відкритих систем у верстатобудуванні — це стійка і перспективна тенденція, особливо у сферах малого та середнього бізнесу, прототипування, освіти та наукових розробок. Вони знижують

бар'єр входу в технології, сприяють інноваціям і є ключовим інструментом демократизації виробництва.

Управління фрезерним верстатом у трьох координатних площинах є типовою задачею для систем ЧПУ, яка включає точне позиціонування інструменту по осях X, Y та Z. Реалізація такої задачі за допомогою Arduino та крокових двигунів вимагає не лише глибокого розуміння електроніки та програмування, а й аналізу механічних та кінематичних особливостей конструкції верстата. Дослідження у цьому напрямі дозволяє не тільки отримати практичні навички побудови автоматизованих систем, але й сприяє розвитку вітчизняних рішень у сфері малої автоматизації.

Отже, дана робота присвячена створенню системи управління для фрезерного верстата з трьома координатами на основі Arduino, що дозволяє реалізувати базові функції ЧПУ з високим рівнем точності та надійності, забезпечуючи при цьому доступність і простоту впровадження.

9.1 Постановка задачі досліджень

У зв'язку з інтенсифікацією впровадження автоматизованих технологій в галузі обробки матеріалів, особливо в малосерійних і навчально-дослідних виробництвах, виникає потреба у розробці гнучких і доступних рішень числового програмного управління (ЧПУ). Сучасні промислові ЧПУ-системи, попри високу функціональність, потребують значних фінансових та технічних ресурсів для їх реалізації.

У цьому контексті особливого значення набувають відкриті апаратно-програмні платформи, зокрема Arduino, які завдяки модульності, відкритому коду та широкій підтримці спільноти дозволяють реалізовувати базові функції ЧПУ. Застосування таких рішень у фрезерних верстатах з кроковими двигунами сприяє

створенню доступних систем автоматизованого управління, які легко модернізуються, масштабуються та інтегруються в дослідницьке або навчальне середовище.

Об'єктом дослідження є система числового програмного управління фрезерним верстатом на основі мікроконтролера Arduino.

Предметом дослідження виступають апаратні та програмні засоби реалізації координованого управління по осях X, Y, Z з використанням Arduino, драйверів крокових двигунів та прошивки GRBL.

Метою дослідження є розробка, реалізація та експериментальна перевірка функціональної системи ЧПУ фрезерного верстата з трьома координатами на базі відкритої платформи Arduino, що забезпечує точне позиціонування інструменту при виконанні фрезерних операцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) проаналізувати сучасні підходи до реалізації ЧПУ-систем та тенденції використання відкритих платформ у верстатобудуванні;
- 2) вивчити можливості платформи Arduino для реалізації координованого управління кроковими двигунами;
- 3) розробити структурну схему електронної частини системи управління;
- 4) здійснити підключення драйверів A4988 до Arduino та реалізувати функції управління по трьох координатах;
- 5) інтегрувати та налаштувати бібліотеку GRBL для інтерпретації G-кодів;
- 6) провести практичну перевірку точності, стабільності та швидкодії системи;
- 7) визначити обмеження реалізованого підходу та сформулювати напрямки подальшої оптимізації.

У ході виконання дослідження використано наступні методи:

- аналіз науково-технічної літератури та нормативної документації;
 - структурно-функціональне моделювання системи керування;
 - схемотехнічне проєктування;
 - програмування мікроконтролера Arduino та налагодження драйверів;
 - експериментальна перевірка на фізичному макеті;
 - тестування програмного забезпечення з використанням G-кодів.
- Для реалізації дослідження використано такі технічні засоби:
- мікроконтролер Arduino Uno R3 – відкрита апаратна платформа, доступна для некомерційного використання;
 - драйвери крокових двигунів A4988 – недорогі, широко доступні мікросхеми для управління біполярними кроковими двигунами;
 - крокові двигуни типу NEMA 17 – стандартні приводи для 3D-друку та ЧПУ;
 - стабілізоване джерело живлення 24 В / 15 А – для живлення виконавчих механізмів;
 - прототипувальні компоненти – плати розведення, з'єднувальні кабелі, breadboard.

У дослідженні застосовано лише відкрите та вільно розповсюджене програмне забезпечення, яке не потребує придбання ліцензії, що робить розробку придатною до поширення та масштабування:

- Arduino IDE — інтегроване середовище розробки з відкритим кодом, що використовується для завантаження прошивки до мікроконтролера;
- GRBL — вільна прошивка для Arduino на мові C, яка інтерпретує G-коди для керування осями;

- Universal G-code Sender (UGS) — безкоштовна кросплатформна програма для передачі G-кодів у GRBL-сумісні контролери;
- FreeCAD — для створення моделей і САМ-траєкторій;
- GitHub — як джерело документації, бібліотек і підтримки від розробників та спільноти.

Наявність відкритого коду та активне обговорення проєктів у спільнотах дозволяють швидко розвивати і адаптувати систему до нових вимог, а також забезпечують легке відтворення результатів іншими дослідниками.

Наукова новизна роботи полягає у створенні експериментальної ЧПУ-системи з використанням виключно відкритих ресурсів: апаратної платформи Arduino, бібліотеки GRBL та інтерфейсу Universal G-code Sender. Уперше запропоновано структурований підхід до побудови функціональної системи керування на основі відкритих стандартів із застосуванням методів інтеграції програмного забезпечення, що не потребує комерційних компонентів. Отримані результати демонструють доцільність застосування таких рішень у навчальних цілях та в задачах малосерійного виробництва.

Дослідження базується на поєднанні системного аналізу, схемотехнічного проєктування, практичного моделювання та експериментальної перевірки функціонування розробленої ЧПУ-системи на основі Arduino. В основу підходу покладено відкриту апаратно-програмну платформу Arduino, яка все ширше застосовується в аматорських, навчальних і навіть промислових ЧПУ-системах [132].

Для обґрунтування технічних рішень було проаналізовано типові підходи до автоматизації у машинобудуванні, викладені в навчальних джерелах [133, 134], та досвід впровадження ЧПУ в історичному та сучасному контексті [135]. Прикладами успішного використання Arduino у фрезерних проєктах поділилися ентузіасти на публічних освітніх ресурсах [136].

Також було вивчено ряд наукових досліджень щодо модернізації ЧПУ-систем на базі Arduino та GRBL, включаючи реалізацію багатовісного управління і адаптацію систем для освітніх цілей [137, 138].

9.2 Загальна архітектура системи

Запропонована система складається з мікроконтролера Arduino Uno, драйверів крокових двигунів A4988, трьох двигунів типу NEMA 17, та зовнішнього джерела живлення на 24 В. Програмне забезпечення базується на прошивці GRBL [139], а для надсилання G-кодів із ПК застосовується Universal G-code Sender [140].

Структура повністю відкрита, дозволяє змінювати параметри прошивки та легко масштабувати систему. Подібна конфігурація успішно використовується як у дослідницьких цілях [141], так і у малих виробництвах [142].

Схема електричного підключення реалізована згідно з рекомендаціями із сучасних навчальних порталів і демонструє типове розміщення компонентів [143].

9.3 Апаратна частина

Зовнішній вигляд фрезерного верстата, реалізованого на базі цієї системи, показано на рисунку 9.1. Стенд зібрано з урахуванням типових рекомендацій з інженерної документації [144].

Серед особливостей розробленої системи — повністю модульне з'єднання компонентів: крокові двигуни з'єднані з драйверами A4988, які у свою чергу підключаються до пінів Arduino STEP та DIR. Така конфігурація дозволяє забезпечити повний контроль руху в трьох координатах [145].

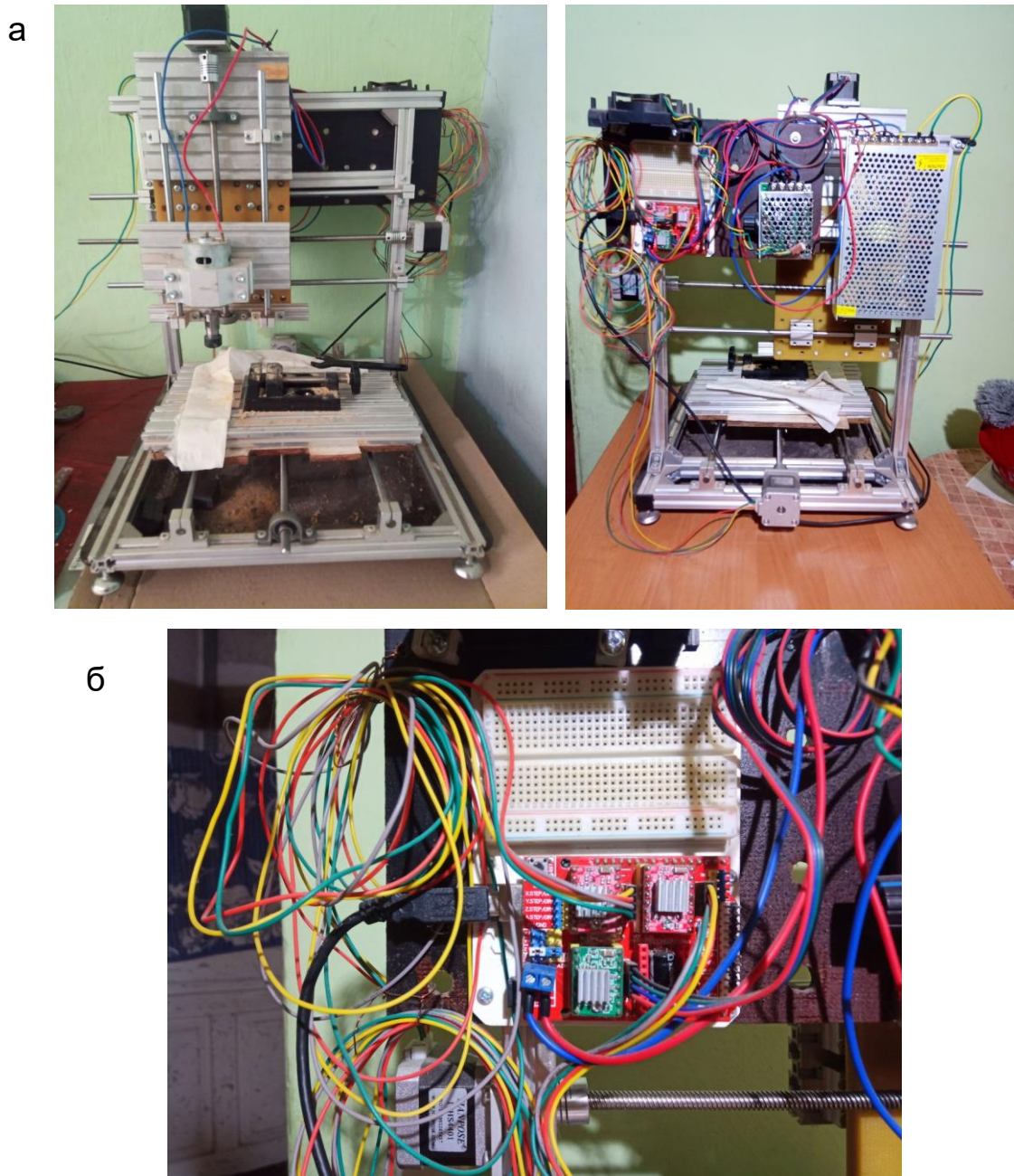


Рисунок 9.1 – Практична реалізація станка ЧПУ на Arduino

Для крокового двигуна необхідно забезпечити окреме живлення. Пряме підключення крокового двигуна безпосередньо до живлення без драйвера не можливе.

Схему типового підключення одного крокового двигуна до драйвера керування подано на рисунку 9.2.

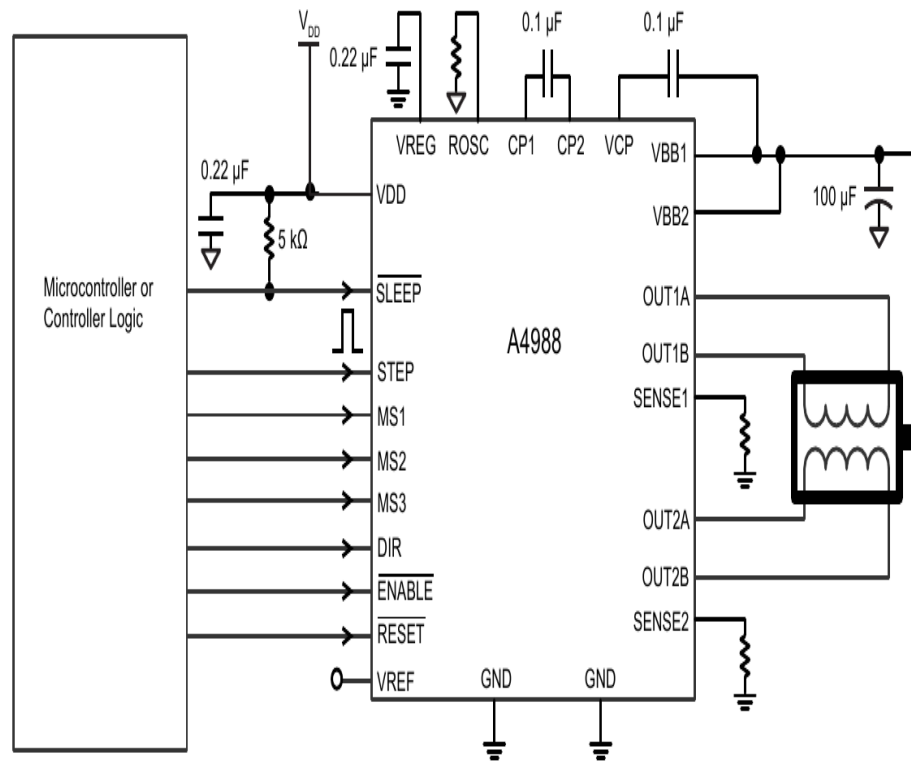


Рис. 9.2 – Схема підключення крокового двигуна

9.4 Керування та програмне забезпечення

Для управління кроковими двигунами використано відкриту бібліотеку Stepper.h, яка підтримує як уніполярні, так і біполярні двигуни [146]. Програмна частина GRBL забезпечує реалізацію G-кодів, в яких вказується траєкторія руху, швидкість подачі та інші параметри обробки [139].

Схеми підключення драйверів детально описані в технічних інструкціях і на сайтах виробників [147, 148, 149]. Зокрема, важливим є правильне налаштування струму на драйвері, що забезпечує стабільну роботу двигуна та запобігає його перегріву [150].

Нижче представлена загальна схема підключення крокових двигунів до Arduino рис. 9.3 [151], частково дана схема реалізована в верстаті рис. 9.1, поки що без кінцевих вимикачів та кнопок керування.

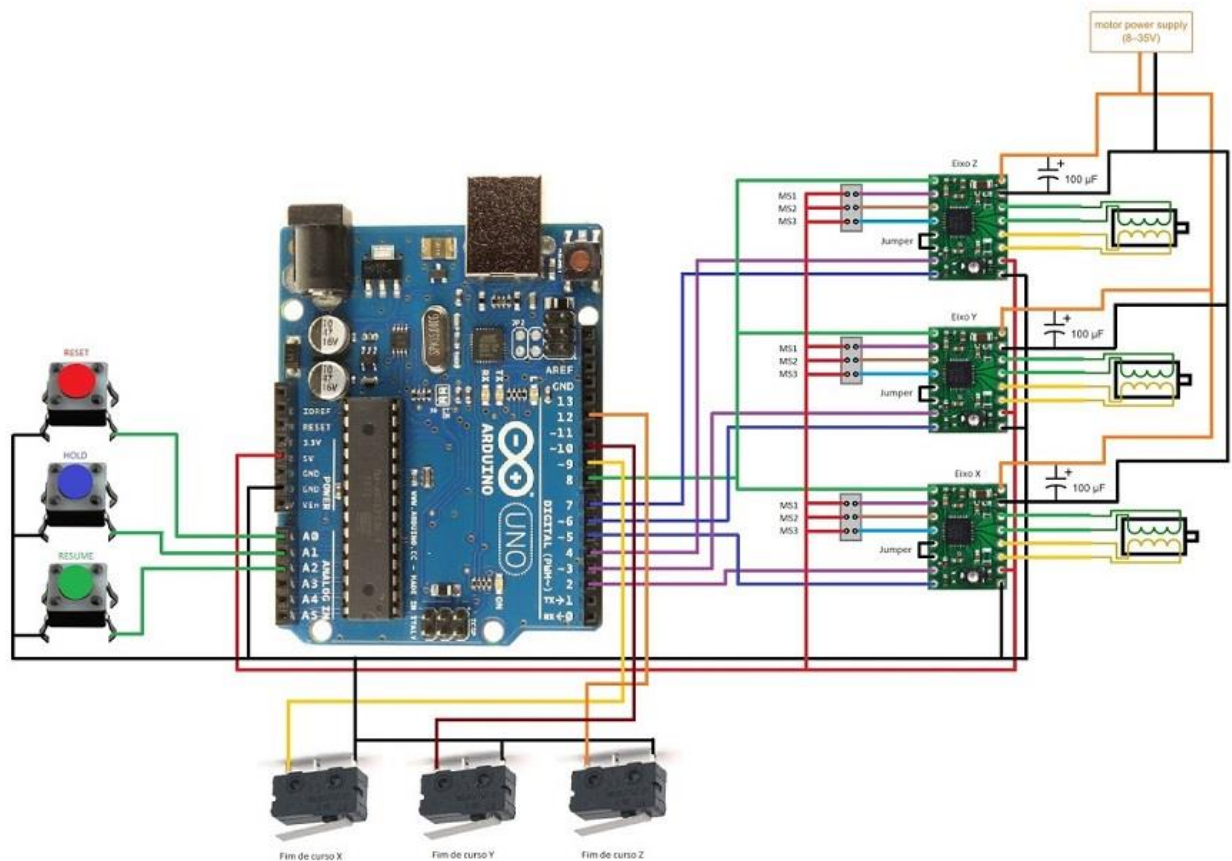


Рис. 9.3 – Схема підключення крокових двигунів до Arduino

9.5 Проведення експериментів

На базі зібраної системи проведено серію випробувань для оцінки точності та стабільності позиціонування інструменту. Для тестування використовувалися типові програми фрезерування з використанням контурних та прямолінійних переміщень по осях.

Дані надсилалися через інтерфейс UGS [140] у вигляді G-коду, приклад якого наведено у роботі. Обробка виконувалася з параметрами середньої швидкості. У результаті система продемонструвала повторюваність позиціонування з точністю, що відповідає вимогам до навчальних стендів і прототипів [151].

9.6 Аналіз обмежень

Під час експериментального дослідження виявлено низку критичних обмежень, характерних для реалізації ЧПУ-системи на основі Arduino та крокових двигунів:

1) розімкнена структура керування. У системі відсутній зворотний зв'язок по положенню виконавчих механізмів, що унеможливорює компенсацію помилок позиціонування. У разі втрати кроків чи перевантаження система не може самостійно скоригувати координати, що знижує точність обробки;

2) обмеження швидкодії. При різкому збільшенні швидкості переміщення або інтенсивному змінному навантаженні драйвери A4988 не встигають обробити сигнали від Arduino, що призводить до пропуску кроків. Цей ефект особливо помітний при зміні напрямку руху або старті/зупинці на коротких відрізках траєкторії;

3) неможливість інтеграції контролю навантаження. Стандартна прошивка GRBL не підтримує функціонал контролю струму навантаження або адаптивної зміни подачі, що не дозволяє системі реагувати на зміни навантаження в режимі реального часу;

4) обмеження продуктивності через синхронізацію швидкостей осей. У випадку одночасного руху по кількох координатах (наприклад, X, Y, Z), система орієнтується на найповільнішу вісь як визначальну для вибору швидкості виконання команди. Це означає, що навіть якщо дві осі можуть рухатись швидше, загальна швидкість фрезерування буде обмежена можливостями найповільнішої осі, що істотно знижує продуктивність системи.

Ці обмеження підтверджуються у фрагментах реального експерименту — наприклад, поломкою фрези через недостатній відступ інструмента під час швидкого переміщення рис. 9.4.



Рисунок 9.4. – Поломана фреза

Усі використані компоненти системи (апаратні та програмні) є відкритими для модифікації, безкоштовними для використання в дослідницьких і навчальних проектах. Отримані результати підтверджують доцільність застосування таких рішень у процесі підготовки фахівців, а також для швидкого створення прототипів у малосерійних виробництвах.

Робота повністю підтверджує функціональність реалізованого технічного рішення та демонструє високу адаптивність відкритої ЧПУ-платформи Arduino для інженерних задач.

9.7 Висновки

У результаті виконання науково-дослідної роботи досягнуто мети щодо розробки та апробації системи числового програмного управління фрезерним верстатом у трьох координатних площинах на базі відкритої платформи Arduino.

Наукові результати:

- розроблено структурну та функціональну модель тривісної системи ЧПУ з використанням доступної мікроконтролерної бази Arduino;

- проведено системний аналіз можливостей бібліотеки GRBL для реалізації G-код керування на відкритому апаратному рівні;

- встановлено особливості реалізації координованого управління в умовах розімкненої системи без зворотного зв'язку.

Практичні результати:

- реалізовано фізичний макет ЧПУ-фрезера з інтерфейсом Universal G-code Sender та повною підтримкою тривісного позиціонування;

- підтверджено можливість виконання основних фрезерних операцій при середніх швидкостях подачі;

- розроблено схему підключення драйверів крокових двигунів A4988 до Arduino, адаптовану для повторного використання у навчальних цілях.

Наукова новизна:

- запропоновано метод реалізації ЧПУ-системи на базі відкритої архітектури Arduino без використання спеціалізованих промислових контролерів;

- вперше досліджено вплив найповільнішої осі на обмеження загальної швидкості виконання команди в умовах розімкненої архітектури GRBL;

- розроблено рекомендації щодо можливих шляхів модернізації системи – зокрема, через впровадження адаптивного керування та зворотного зв'язку.

Обмеження та подальші дослідження:

- система потребує модернізації для роботи з високим динамічним навантаженням та компенсації втрати кроків;

– подальші дослідження мають бути спрямовані на впровадження зворотного зв'язку, замкнених контурів та оптимізації GRBL-коду під конкретні механічні характеристики.

Галузь використання результатів:

– розроблену систему рекомендовано використовувати як навчальний стенд у закладах фахової передвищої та вищої технічної освіти;

– технологічні підходи можуть бути адаптовані для прототипування, дрібносерійного виробництва, систем лазерного або гравірувального типу;

– результати придатні до використання у сфері інженерної освіти, цифрового виробництва та проєктів відкритої автоматизації.

Результати роботи опубліковані [152].

10 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРИВОДНИХ СИСТЕМИ БУРОВИХ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ КАР'ЄРІВ КРИВБАСУ

Об'єкт дослідження: приводні системи бурових верстатів, що експлуатуються в умовах гірничодобувних кар'єрів Криворізького залізорудного басейну (Кривбасу).

Мета дослідження: аналіз конструктивних та експлуатаційних особливостей приводних систем бурових верстатів, які застосовуються в кар'єрах Кривбасу, з метою виявлення основних напрямків підвищення їх ефективності, надійності та енергоефективності в умовах інтенсивного навантаження.

Методика дослідження:

1) аналіз літературних джерел – вивчення науково-технічних публікацій, нормативних документів та технічної документації щодо типів та характеристик приводів бурових верстатів.

2) порівняльний аналіз – зіставлення технічних параметрів різних типів приводів (електричних, гідравлічних, механічних) у контексті їх ефективності при роботі у кар'єрах Кривбасу.

3) огляд практичного досвіду – аналіз результатів експлуатації бурових верстатів у гірничих підприємствах Криворіжжя.

4) інженерно-економічне обґрунтування – оцінка ефективності різних схем приводів з точки зору витрат енергії, надійності, обслуговування та довговічності.

5) використання статистичних даних – обробка даних щодо простоїв, ремонтів, витрат електроенергії для різних типів бурових приводів.

Теоретичні результати:

– проаналізовано класифікацію бурових верстатів, які використовуються у відкритих гірничих роботах, зокрема в кар'єрах Кривбасу;

- розглянуто конструктивні особливості приводних систем бурових верстатів, з урахуванням специфіки гірничо-геологічних умов регіону;

- проведено порівняльний аналіз електромеханічних, гідравлічних і комбінованих приводів щодо ефективності, надійності та енергоощадності;

- визначено критерії вибору типу приводу залежно від технологічних і експлуатаційних вимог буріння у кар'єрах Кривого Рогу.

Практичні результати:

- виявлено найбільш ефективні типи приводних систем для бурових верстатів, які працюють у складних умовах Криворізького басейну;

- розроблено рекомендації щодо модернізації існуючих приводів з метою підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат;

- запропоновано методику оцінювання технічного стану приводів з урахуванням реальних умов роботи та типових несправностей;

- надано обґрунтовані технічні рішення щодо впровадження частотно-регульованих електроприводів на бурових установках у кар'єрах Кривбасу.

Наукова новизна:

- вперше здійснено систематизований аналіз впливу гірничо-геологічних умов Криворізького басейну на ефективність роботи приводних систем бурових верстатів;

- запропоновано комплексний підхід до вибору та оптимізації приводів, який враховує специфіку кар'єрного буріння в регіоні;

- обґрунтовано доцільність переходу до енергоощадних і адаптивних приводних систем у бурових установках відкритих гірничих робіт.

Галузі використання:

- 1) гірничодобувна промисловість, зокрема підприємства відкритого видобутку залізної руди в Кривбасі;
- 2) машинобудування – при проектуванні та виготовленні бурових установок для відкритих кар'єрів;
- 3) науково-дослідні та проектно-конструкторські інститути, що займаються розробкою техніки для гірничої промисловості;
- 4) навчальні заклади – у процесі підготовки фахівців гірничо-інженерного профілю.

10.1 Постановка задачі

У гірничодобувній промисловості Криворізького басейну (Кривбасу) важливе місце займають бурові роботи, що забезпечують ефективне проведення підривних робіт та розробку корисних копалин. В умовах інтенсивної експлуатації кар'єрних бурових верстатів висуваються підвищені вимоги до надійності, енергоефективності та автоматизації приводних систем.

Враховуючи специфіку геологічних умов Кривбасу, а також постійно зростаючі обсяги видобутку, актуальним є аналіз технічних особливостей та вибір оптимальної конфігурації приводних систем, що забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики бурових установок.

Задачею даного розділу є:

- дослідження типів приводів, що застосовуються у бурових верстатах для кар'єрів Кривбасу;
- виявлення їхніх техніко-експлуатаційних особливостей;
- аналіз переваг і недоліків різних типів приводів (електричних, гідравлічних, механічних та комбінованих);

– визначення вимог до модернізації або вибору нових систем приводу з урахуванням умов роботи в кар'єрах регіону.

Розв'язання поставленої задачі дозволить підвищити ефективність бурових робіт у Криворізькому басейні та обґрунтувати технічний вибір оптимальної приводної системи для сучасних умов гірничого виробництва.

Під час проведення відкритих гірничих робіт буріння вибухових свердловин є однією з ключових, водночас трудомістких і витратних операцій [153, 154]. Однією з головних проблем відкритого видобутку корисних копалин залишається зношеність та моральне застаріння бурового обладнання. У зв'язку з цим модернізація наявних установок і розробка нового покоління бурових машин є актуальними науково-технічними завданнями, від вирішення яких залежить ефективність роботи гірничої галузі країни.

Закупівля бурової техніки в країнах ближнього зарубіжжя потребує значних фінансових витрат і не сприятиме поліпшенню техніко-економічних показників гірничого виробництва. Це пов'язано з тим, що машинобудівна й електротехнічна галузі цих країн пережили за останні 15–17 років надзвичайно складний період, що негативно вплинуло на розвиток і виробництво новітньої техніки.

Вітчизняні машинобудівні підприємства розробили верстат УСБШ-250А (експлуатується на Полтавському ГЗК з 2004 року), який є аналогом моделі СБШ-250МН-32, а також принципово нові бурові установки, створені ВАТ «Ново-Краматорський машинобудівний завод» (НКМЗ) у співпраці з інститутом «КриворіжНДПрудмаш» – СБШ-250/270-32 (впроваджено на Інгулецькому ГЗК у 1999 році) та СБШС-250Н (працює на Центральному ГЗК з 2003 року) [155, 156].

Порівняльний аналіз розроблених верстатів із серійно випущеними аналогами представлений у таблиці 10.1. З отриманих даних випливає, що за основними технічними характеристиками нові

моделі, створені вітчизняними машинобудівниками, відповідають верстатам середнього класу, тоді як рівень їх енергооснащеності відповідає обладнанню важкого типу. Це забезпечує підвищену продуктивність нових зразків.

Поряд із вдосконаленням механічної частини бурового устаткування (БВ), актуальним є також модернізація його приводної системи, яка має відповідати сучасному рівню розвитку світової електротехнічної галузі. Лише за таких умов можливо забезпечити створення конкурентоспроможної гірничої машини в цілому.

Починаючи з 1997 року здійснюються науково-технічні дослідження, спрямовані на розробку енерго- та ресурсозберігаючих приводних систем для гірничого обладнання як нового покоління, так і для модернізації машин, що вже експлуатуються на гірничо-збагачувальних комбінатах України.

При виконанні модернізаційних заходів на буровому обладнанні типу СБШ-250МН-32, що експлуатується на Центральному гірничо-збагачувальному комбінаті, були впроваджені різні типи інноваційних систем електроприводу змінного струму. Зокрема, у період з 1998 по 2006 роки застосовувався тиристорний електропривод змінного струму з джерелом струму, реалізований на базі модернізованого блоку вентилів (БВ). Починаючи з 2005 року, були запроваджені транзисторні електроприводи змінного струму з джерелом напруги на модернізованих верстатах. Крім того, з 2003 року на унікальній установці типу СБШС-250Н використовується транзисторний привод змінного струму з джерелом напруги виробництва компанії "Triol Corporation".

Таблиця 10.1 – Порівняльний аналіз технічних характеристик бурових установок, які використовуються в умовах відкритих гірничих робіт на кар'єрах України

Тип верстата	Технічні характеристики бурових верстатів					
	2СБШ-200Н	СБШ-250МН-32	СБШ-320	СБШ-250/270-32	СБШС-250Н	УСБШ-250А
Виробник	РФ	РФ	РФ	Україна	Україна	Україна
Діаметр долота, мм	214; 244	244; 269	320	250	250	250
Глибина буріння, м	40	34	40	32	44	32
Осьове навантаження, кН	245	294	588	300	350	300
Кутова швидкість долота, рад/с	0-33	0-16	0-13,6	0-12	0-12	0-13
Швидкість подачі, мм/с	21,7	15,0	16,7	15,0	16,0	15,0
Потужність двигуна обертання поставу, кВт	50,0	50,75	100,0	90,0	90,0	90,0
Продуктивність компресора, м ³ /с	0,416	0,416	0,833	0,416	0,533	0,416
Сумарна потужність двигунів, кВт	282	386	712	420	545	390
Вага верстата, т	50	65	110	68	79	69

У країнах далекого зарубіжжя при бурінні свердловин переважно застосовуються електрогідравлічні або дизель-гідравлічні приводні системи. Бурові установки обертального буріння виробляються такими провідними компаніями, як Atlas Copco, Ingersoll-Rand, Bucyrus-Erie, Tamrock-Driltech, Harnischfeger P&H та іншими. Вказаними виробниками розроблено установки, здатні ефективно працювати не лише з шарошковими, але й з ріжучими долотами, а також з пневмоударними інструментами.

Конструктивною особливістю бурових установок іноземного виробництва є послідовна гідрофікація основних приводів, що виявляється у впровадженні єдиного дизельного двигуна в якості первинного джерела енергії. Цей двигун забезпечує роботу як компресора, так і насосної станції, яка, своєю чергою, живить головні гідравлічні приводи бурової установки.

Верстати таких західних виробників, як Atlas Copco, Tamrock та Reedrill, демонструють вищу продуктивність порівняно з буровою установкою СБШ-250МНА-32, що зумовлено застосуванням дизельного привода. Це забезпечує їхню автономність від перерв у електропостачанні на кар'єрі та підвищує мобільність при переміщенні між буровими блоками. Водночас, енергетичні витрати дизельних верстатів перевищують відповідні показники для СБШ-250МНА-32 майже в шість разів. У країнах ближнього зарубіжжя завод УМГК-Рудгормаш у 2008 році вперше в Хакасії впровадив комплексний частотний електропривод із застосуванням частотного перетворювача ATV 71 виробництва компанії Schneider Electric (Франція).

10.2 Особливості експлуатації приводів постійного струму

На теперішній час накопичено значний практичний досвід експлуатації приводних систем для шарошкових верстатів обертального буріння, що широко застосовуються на кар'єрах гірничо-збагачувальних комбінатів України. Існуючий парк бурових верстатів, які залишилися в експлуатації на ГЗК, переважно складається з моделей типу СБШ-250МН-32, вироблених заводом «Рудгормаш». На зазначених верстатах застосовуються системи приводів, що включають тиристорний перетворювач з двигуном (ТП-Д) для обертання, а також гідравлічний серводвигун з поршневым приводом подачі, живлення яких забезпечується шестерним гідронасосом постійної продуктивності з асинхронним нерегульованим приводом. Гідросистема оснащена пропорційним регулятором витрати мастила для оптимізації робочих параметрів.

Верстати оснащені уніфікованим тиристорним електроприводом за системою ТП-Д з реверсом струму в обмотці збудження двигуна (рис.10.1). Двигун обертання типу ДЭВ-808 потужністю 68 кВт. Нереверсивний перетворювач якірного кола виконаний на тиристорах із природним охолодженням за трифазною мостовою симетричною схемою випрямлення КНВ. Система регулювання – аналогова, з активною послідовною корекцією динамічних параметрів привода, яка однократно інтегрує і містить два контури керування: зовнішній контур напруги і внутрішній контур струму. Обмотка збудження двигуна одержує живлення від нереверсивного напівкерovanого тиристорно-діодного моста НКВ. Реверс якірного струму робиться релейно-контакторною схемою Р. Система збудження дозволяє плавно змінювати напругу збудження від 20 до 100% максимального значення. Тиристорний електропривод обертання

забезпечує жорсткі механічні характеристики з малим значенням статизму, що при бурінні гірничих порід із міцністю більш 15 балів за шкалою проф. М.М.Протодьяконова призводить до прискореного зносу озброєння долота. Перехід на знижені частоти обертання з метою ресурсозбереження долота робиться оператором у ручному режимі. Номінальна частота обертання якоря електродвигуна – 126 1/с, а максимальна при ослабленому полі збудження – 174 1/с. Привод допускає двократне (із тривалістю до 10 с) перевантаження.

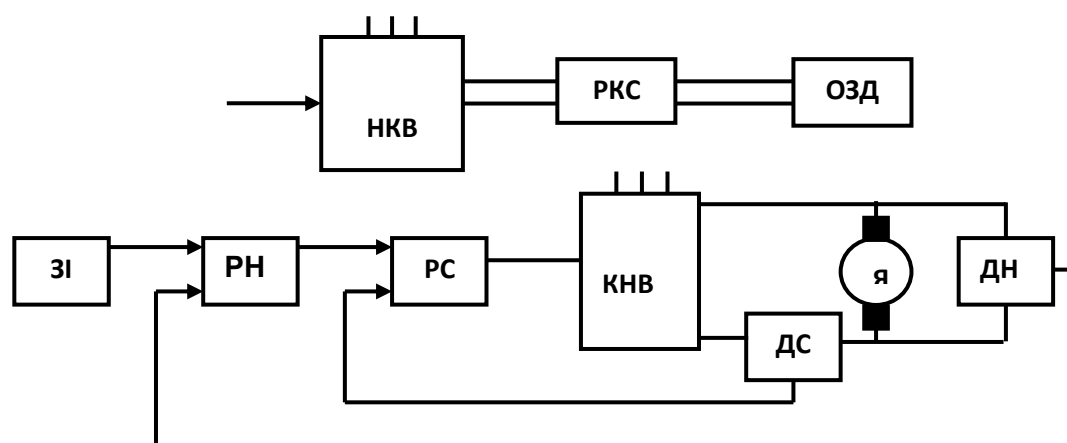


Рисунок 10.1 – Функціональна структура уніфікованого тиристорного приводу постійного струму для бурових верстатів моделі СБШ-250МН-32, розробленого на базі Електроапаратного заводу у місті Запоріжжя

Система керування приводом постійного струму механізму обертання бурового верстата, розроблена НПО «Енергія» (рис. 10.2), характеризується підвищеним рівнем технічного удосконалення. Вона забезпечує підтримання сталого рівня потужності двигуна в режимі буріння міцних порід, що підтверджено високими техніко-економічними показниками в експлуатації на Дніпровському кар'єрі Полтавського ГЗК. Архітектура системи включає цифровий регулятор із зовнішнім контуром

контролю напруги, а регулювання струму реалізовано через нелінійний адаптивний підсилювач з ПІ-регулятором, що володіє динамічною характеристикою. Силевий тиристорний міст МС інтегрований у трифазну мережу через реактор Р, а реверсивний міст на контакторах виконує функцію реверсора. Джерело збудження двигуна функціонує в режимі підтримки заданого струму збудження І_v або в режимі залежного регулювання, що корелює зі струмом якоря. Зниження навантаження призводить до ослаблення магнітного потоку збудження, викликаючи зростання швидкості двигуна при зменшенні струму якоря, і навпаки — збільшення навантаження спричиняє зниження швидкості. Така реалізація механічної характеристики в зоні регулювання поля забезпечує близькість до гіперболічної характеристики постійної потужності, що сприяє підвищенню стабільності роботи долота [157].

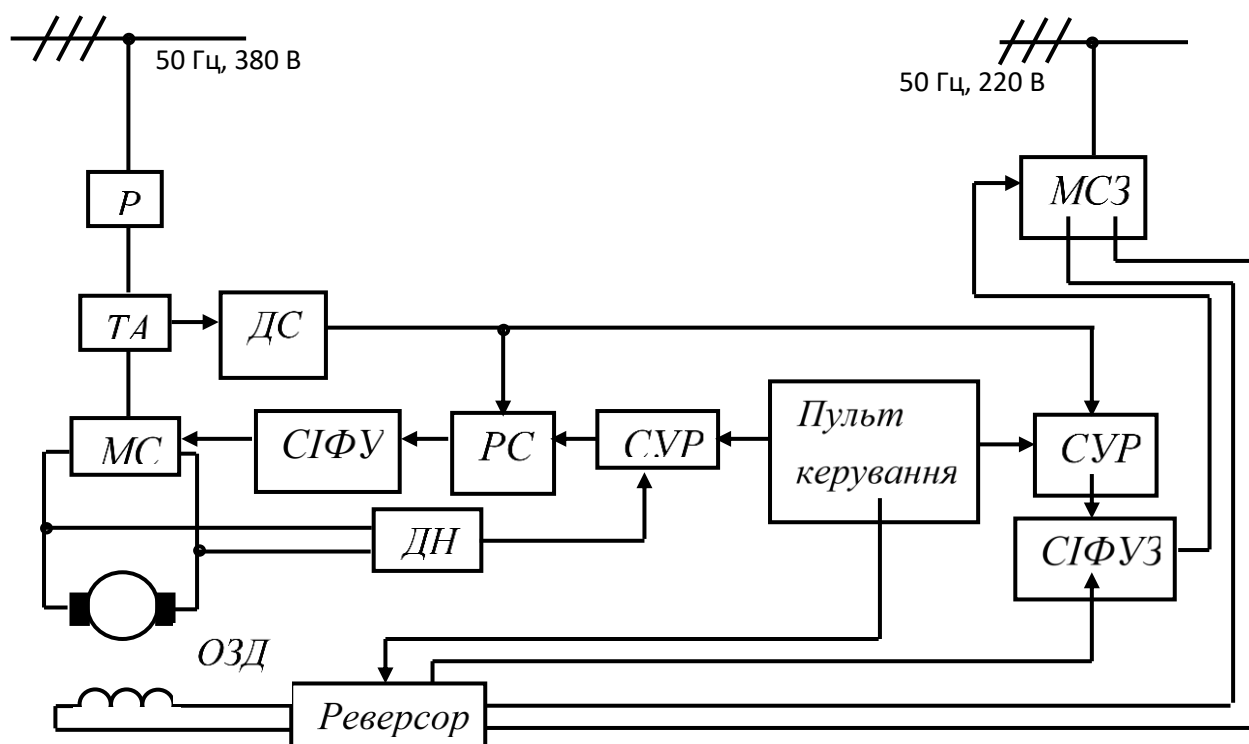


Рисунок 10.2 – Функціональна схема тиристорного приводу постійного струму для бурового верстата, розроблена НВО «Енергія»

В умовах роботи в міцних скельних породах, характерних як для Полтавського гірничо-збагачувального комбінату, так і для гірничо-геологічних умов Криворізького басейну, на тиристорному приводі постійного струму проведено експериментальні випробування режиму регулювання, що базується на критеріях, розроблених в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, а саме – підтримці сталої потужності привода обертання. Цей режим показав позитивний вплив на підвищення стійкості долота в процесі буріння. Водночас, недоліком застосованої системи привода постійного струму з підтримкою потужності, реалізованої НВО «Енергія», є робота з ослабленим магнітним полем двигуна обертання при номінальному струмі якоря, що негативно впливає на процеси комутації та знижує експлуатаційну надійність двигуна. Крім того, привод подачі оснащений нерегульованим асинхронним двигуном, управління тиском на постав у якому здійснюється шляхом дроселювання потоку мастила.

У 1999 році на Інгuleцькому гірничо-збагачувальному комбінаті було проведено промислові випробування верстата нового покоління СБШ-250/270-32, розробленого ВАТ «НКМЗ» у спільному проєкті з ВАТ «КриворіжНІПрудмаш». Верстат оснащений приводом обертання за системою постійного струму ТП-Д. Для виконання спуско-підйомних операцій застосовано тиристорний привод постійного струму, який приводить у дію гідронасос змінної продуктивності, що забезпечує живлення гідродвигуна. Натяг у канатно-поліспастиній системі (КПС) створюється через редуктор гідросистеми, що дозволило відмовитися від використання гідроциліндрів подачі. Під час буріння використовувався нерегульований асинхронний двигун з гідронасосом постійної продуктивності та пропорційним регулятором витрат мастила. Привід ходу верстата реалізований за допомогою гідравлічних двигунів, які отримують

живлення від гідронасосів змінної продуктивності під час руху бурового валу. Результати промислових випробувань вказали, що обмеженим ресурсом напрацювання на відмову гідроприводу ходу суттєво знижувалась загальна працездатність верстату.

Суттєвим недоліком систем електроприводу постійного струму бурових механізмів є застосування колекторних двигунів, що експлуатуються в агресивному струмопровідному середовищі, що негативно впливає на міжремонтний ресурс обладнання. Порівняно з асинхронними двигунами, двигуни постійного струму при рівних швидкостях і потужностях мають масу в 1,5–2 рази більшу та вартість, що перевищує їх у три рази. Крім того, момент інерції та його співвідношення з пусковим моментом, які визначають динамічні характеристики, у асинхронних двигунах є в 2–2,5 рази меншими, ніж у двигунах постійного струму.

10.3 Особливості експлуатації приводів змінного струму

Широке впровадження асинхронних частотно-регульованих електроприводів зумовлене їхніми високими техніко-економічними характеристиками та значним прогресом у розвитку силової перетворювальної техніки і автоматизованих систем керування. Сучасним пріоритетним напрямом розвитку асинхронних регульованих приводів є створення частотно-регульованих систем на базі перетворювачів частоти з автономними інверторами струму (АІС) та напруги (АІН), зокрема з інверторами напруги, що працюють за принципом широтно-імпульсної модуляції (АІН-ШІМ). Відзначається інтенсивне впровадження частотно-керованих асинхронних двигунів, які живляться від АІН-ШІМ у поєднанні з некерованими випрямлячами, у загальнопромисловому виконанні. Подібні

приводні системи серійно постачаються на український ринок провідними виробниками, такими як ABB, SCHNEIDER ELECTRIC, HITACHI, DANFOSS, OMRON, Triol Corporation тощо. З метою підвищення експлуатаційної надійності приводів обертання, у 1998 році в процесі модернізації верстата СБШ-250МН-32 (інвентарний №7) на Центральному ГЗК (м. Кривий Ріг) було замінено тиристорний привод постійного струму на тиристорний привод змінного струму з перетворювачем частоти на основі інвертора струму з прямою цифровою системою керування (рис. 10.3). Запропоноване технічне рішення забезпечило безперебійну роботу обладнання без капітального ремонту до 2006 року і захищене патентом України [158].

В якості приводного двигуна застосовано спеціально розроблений асинхронний двигун типу АМРУ280М4БУ2 виробництва Ново-Каховського електромеханічного заводу, що характеризується перевантажувальною здатністю, яка перевищує номінальну більш ніж у шість разів. Номінальні параметри двигуна включають потужність 90 кВт та частоту обертання 1480 об/хв при тривалості вмикання $T_B=100\%$. Частотний тиристорний перетворювач складається з регульованого випрямляча напруги та інвертора струму з ланцюгом постійного струму, в якому встановлено дросель для згладжування пульсацій струму.

В якості вихідного сигналу функціонального перетворювача використовується струм статора, що реалізує нелінійну залежність струму від частоти ковзання ротора. Управління системою здійснюється через контур регулювання швидкості, де частота обертання ротора оцінюється спостерігачем. Приводна система функціонує за принципом частотно-струмового керування. Експлуатаційний досвід свідчить про високу надійність даної системи, незважаючи на складність структури частотного перетворювача.

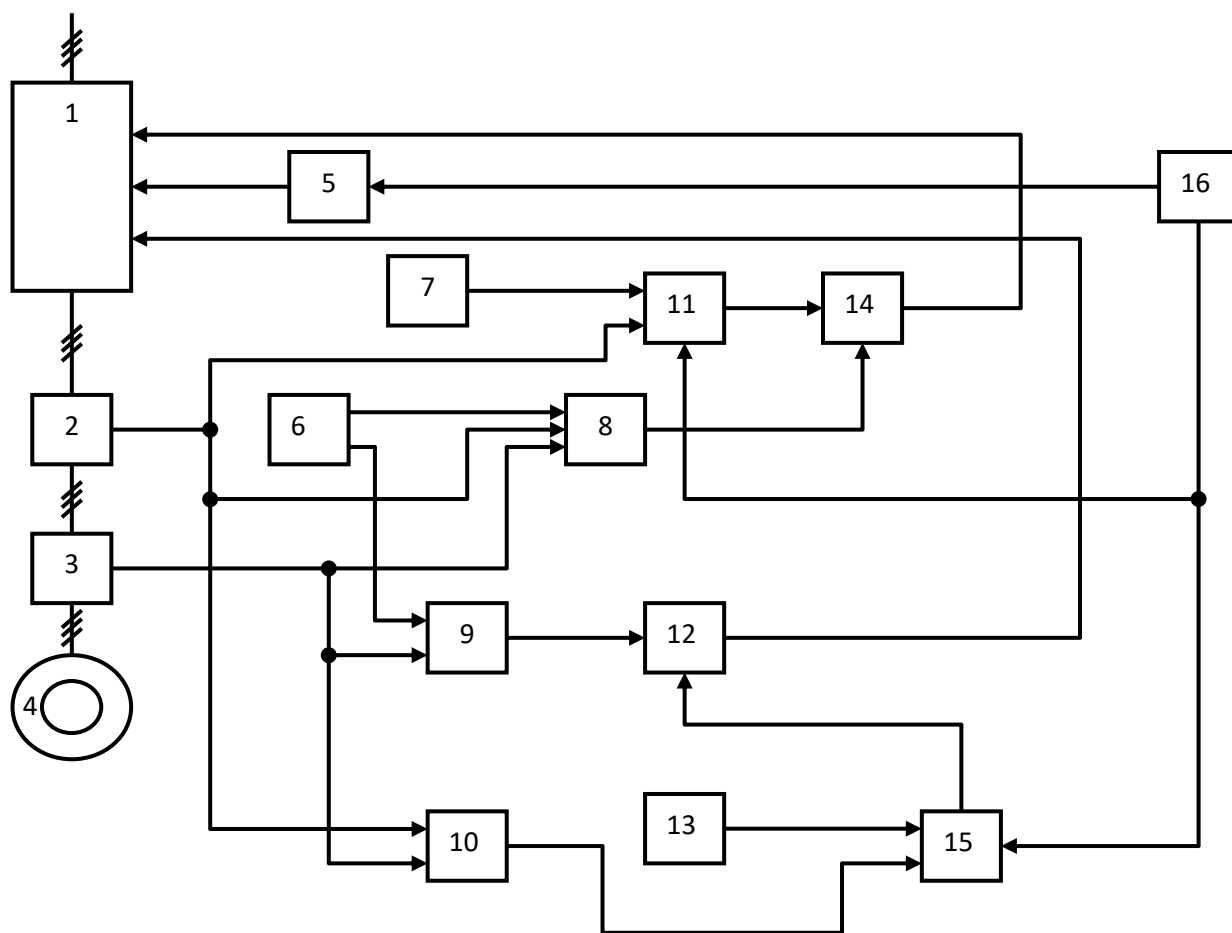


Рис.10.3 – Функціональна схема тиристорного частотно-струмового привода змінного струму, призначеного для керування обертянням бурового поста верстата СБШ-250МН-32: 1 – тиристорний перетворювач; 2 – датчик струму; 3 – датчик напруги; 4 – електродвигун; 5 – блок зміни ємності; 6 – обчислювальний модуль; 7 – задавач потоку; 8 – спостерігач потоку; 9 – спостерігач швидкості; 10 – блок розрахунку електрорушійної сили; 11 – регулятор потоку; 12 – перший суматор; 13 – задавач швидкості; 14 – другий суматор; 15 – регулятор швидкості; 16 – блок управління режимами роботи приводу

Функціональна схема тиристорного частотно-струмового привода змінного струму, призначеного для керування обертянням бурового поста

верстата СБШ-250МН-32 (рис. 10.3), наведена у Деклараційному патенті України №42249А (МКІ Е21В44/00, «Електропривод бурового механізму», автори: О.І. Дмитрієнко, В.А. Оселедько, В.С. Хілов та ін., заявка від 07.12.2000, опубл. 15.10.2001, Бюл. №9, 2001).

На основі результатів проведених промислових випробувань було розроблено та виготовлено експериментальний буровий верстат моделі СБШС-250Н, який у 2003 році було змонтовано та введено в експлуатацію на Центральному гірничозбагачувальному комбінаті (м. Кривий Ріг, інвентарний номер 2). Верстат оснащено частотно-регульованими транзисторними приводами змінного струму відповідно до рекомендацій автора. Електропривід реалізовано на основі дволанкового перетворювача частоти, побудованого на IGBT-транзисторах із застосуванням методу АІН-ШІМ. У приводах використано частотно-керовані короткозамкнені асинхронні двигуни: для обертання поставу застосовано двигун АМРУ280М4БУ2 (номінальна частота 1480 об/хв, потужність 90 кВт), для приводу гідронасосу змінної продуктивності, що забезпечує СПО та подачу поставу — двигун 4АМ225М4БУ2 (1470 об/хв, 55 кВт).

Для забезпечення натягу поліспасти під час бурових операцій застосовано нерегульований привод, що представлений двигуном мастилонасосу АМУ132М4У2 з частотою обертання 1500 об/хв та потужністю 7,5 кВт. У перетворювачах частоти силові вентиля виконані модульно з безпотенційними (ізольованими) корпусами, що забезпечує підвищену електробезпеку та надійність. В автономному інверторі напруги інтегровані інтелектуальні силові модулі, які містять силові транзисторні ключі разом з датчиками струму, напруги, температури, а також вбудовані драйвери керування і захисту. Для управління електроприводами використовується цифровий сигнальний процесор (DSP), що дозволяє

оптимізувати алгоритми широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) транзисторного автономного інвертора напруги та реалізувати пряме цифрове векторне керування. Електронні блоки виготовлені за технологіями авіаційної промисловості, що забезпечує їхню високу стійкість до вібраційних і ударних навантажень.

Для бурових верстатів (БВ) застосовано два комплекти силових транзисторних перетворювачів, які забезпечують керування чотирма електродвигунами. Залежно від виконуваних технологічних операцій, до перетворювачів підключаються або два двигуни ходу верстата, або двигуни обертання бурового поставу разом із гідронасосом змінної продуктивності, що дозволяє реалізувати системи плавного регулювання обертів (СПО) та подачі поставу.

Функціональна схема системи векторного керування [159, 160] представлена на рис. 10.4 і включає два канали управління: модуль вектору потокозчеплення ротора та кутову частоту обертання ротора.

Дослідження та випробування модернізованих приводних систем обертання поставу в умовах Центрального гірничозбагачувального комбінату (Центрального ГЗК) показали, що стандартні промислові електроприводи не забезпечують необхідного ресурсу безвідмовної роботи та не відповідають вимогам щодо динамічних і статичних характеристик, специфічних для кар'єрних БВ. При цьому на ринку відсутні об'єктно-орієнтовані електроприводи змінного струму, спеціально адаптовані для застосування у бурових верстатах.

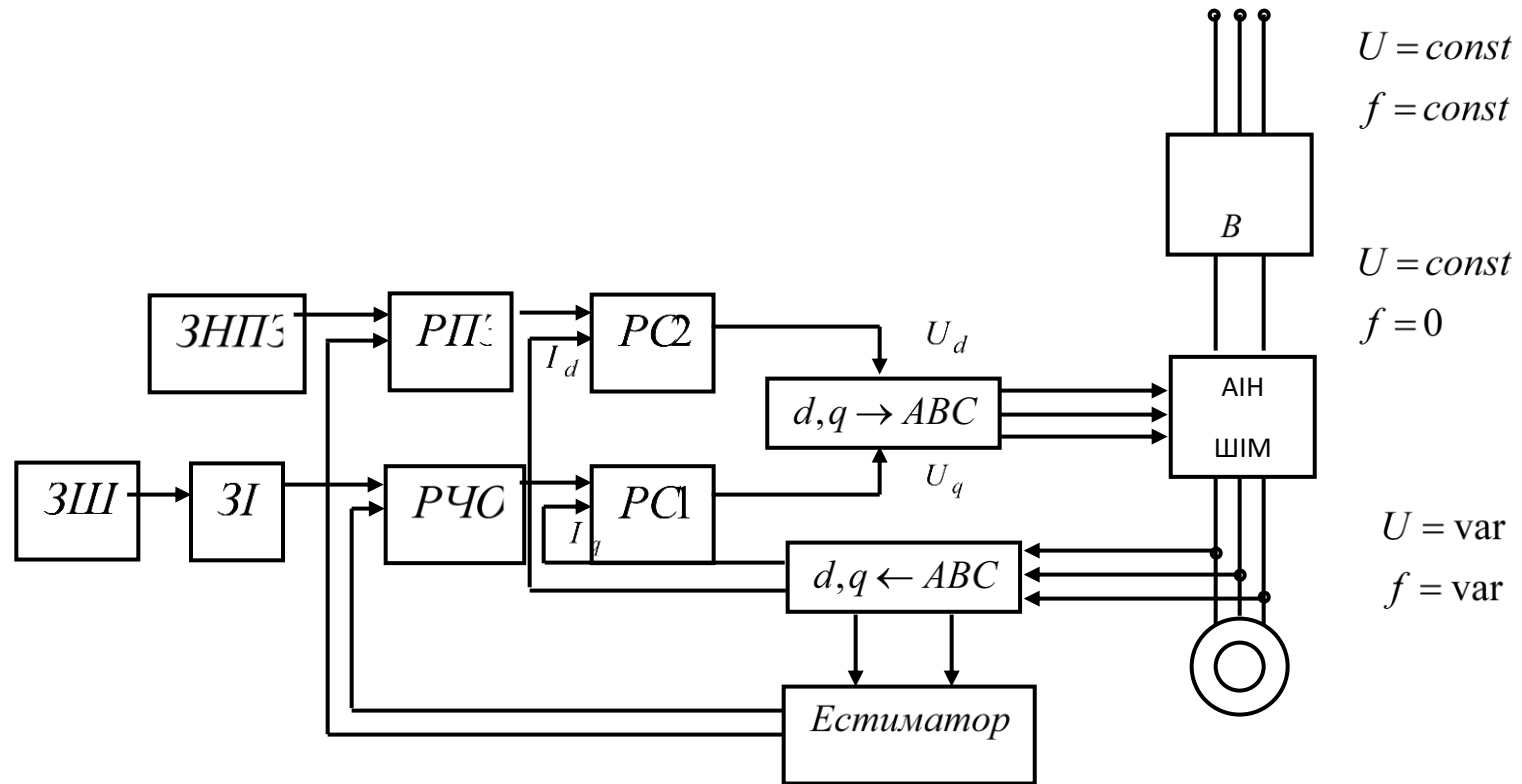


Рисунок 10.4 – Функціональна схема транзисторного приводу змінного струму з векторним керуванням, призначеного для забезпечення обертання ротора, керування гідронасосом змінної продуктивності та рухом бурового верстата моделі СБШС-250Н

В якості проміжного технічного рішення для умов Центрального ГЗК було реалізовано доопрацювання частотного перетворювача фірми "OMRON" до спеціалізованого рівня з урахуванням особливостей експлуатації бурових верстатів у відкритих гірничих роботах. У 2005 році для привода обертання поставу впроваджено частотний перетворювач із джерелом напруги "OMRON", який використовує схему транзисторного привода змінного струму з векторним керуванням [161].

10.4 Вплив вібрацій поставу на режимні параметри

Процес буріння характеризується великою кількістю параметрів, які поділяються на керовані (режимні) та некеровані. До керованих параметрів належать частота обертання і осьовий тиск на буровий постав [162]. Некерованими параметрами, що впливають на режим буріння, є фізико-механічні властивості породи (міцність, категорія свердлування), умови виведення бурового шламу, глибина свердловини, тріщинуватість порід, стан долота, наводненість вибою та інші, які не можуть бути змінені ні при ручному, ні при автоматичному керуванні процесом. Оскільки некеровані параметри змінюються в процесі буріння, відбувається поступовий дрейф режимних параметрів роботи бурового верстата [163].

Буровий верстат має низку технічних обмежень, зокрема за керованими параметрами, потужністю двигуна обертання, віброустійкістю та іншими характеристиками, що визначають область допустимих режимів буріння. Дослідження бурового процесу показали [164], що значущим фактором, який обмежує максимальні значення частоти обертання та осьового навантаження на долото, є вібрації бурового поставу і верстата загалом. При частоті обертання інструменту понад 150 об/хв, рівень вібрацій, як правило, перевищує нормативні межі. Підвищені вібрації під

час буріння на сучасних типах верстатів є загальновідомим явищем, що підтверджується численними дослідженнями.

Експлуатація бурових верстатів у умовах підвищених вібрацій призводить до нестабільності технологічного процесу, зниження ефективності проходки долота та збільшення кількості аварійних ситуацій, що, у свою чергу, спричиняє зростання витрат на буріння та зменшення коефіцієнта використання обладнання. Враховуючи негативний вплив вібраційних навантажень на параметри режиму буріння, виникає необхідність удосконалення систем регулювання шляхом інтеграції коригувальних ланок, що враховують динамічні характеристики верстата.

Одним із прикладів таких систем є розроблена Науково-дослідним інститутом відкритих гірничих робіт (НДІВГР) система регулювання режимів буріння з урахуванням вібрацій поставу для верстатів типу 2СБШ-2Н [165]. Система забезпечує автоматичне регулювання швидкості обертання бурового поставу та осьового зусилля на долото, включаючи: регулятор швидкості обертання, регулятор осьового зусилля, захисні пристрої за максимально припустимим струмом якоря двигуна обертання, пристрій захисту від осьових вібрацій поставу та захист від зашламування свердловини. Безперервне автоматичне регулювання осьового зусилля здійснюється на основі електричного сигналу, який надходить від давача швидкості буріння, проходить нелінійне перетворення та подається на вхід регулятора. Результати промислових випробувань цієї системи підтвердили підвищення продуктивності бурових верстатів та зниження собівартості проходки на рівні 10–15%.

У дослідженні [166] представлені експериментальні дані режимних параметрів процесу буріння за допомогою верстата СБШ-250М. Проведений аналіз засвідчив, що залежності механічної швидкості буріння та потужності двигуна обертання від режимних параметрів за сталих

гірничо-геологічних умов Криворізького басейну не містять екстремальних точок і характеризуються монотонним зростанням зі збільшенням частоти обертання долота та осьового навантаження (рис. 10.5–10.8). У межах частоти обертання від 80 до 110 об/хв спостерігається максимальне значення моменту опору. Аналіз чутливості механічної швидкості буріння до змін режимних параметрів дозволив встановити, що осьовий тиск має більший вплив на механічну швидкість порівняно з частотою обертання долота.

На основі експериментальних досліджень параметрів бурового процесу встановлено, що для існуючих бурових верстатів (БВ) реалізація екстремального регулювання, як це запропоновано у роботі [167], є недоцільною.

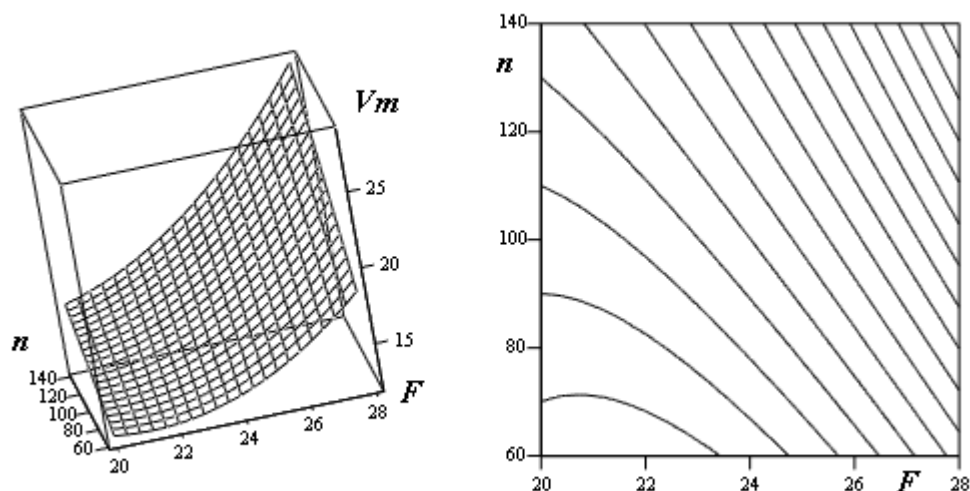


Рисунок 10.5 – Вплив режимних параметрів (лінійна швидкість буріння V_m , м/с; навантаження F , т; частота обертання n , об/хв) на механічну швидкість процесу буріння

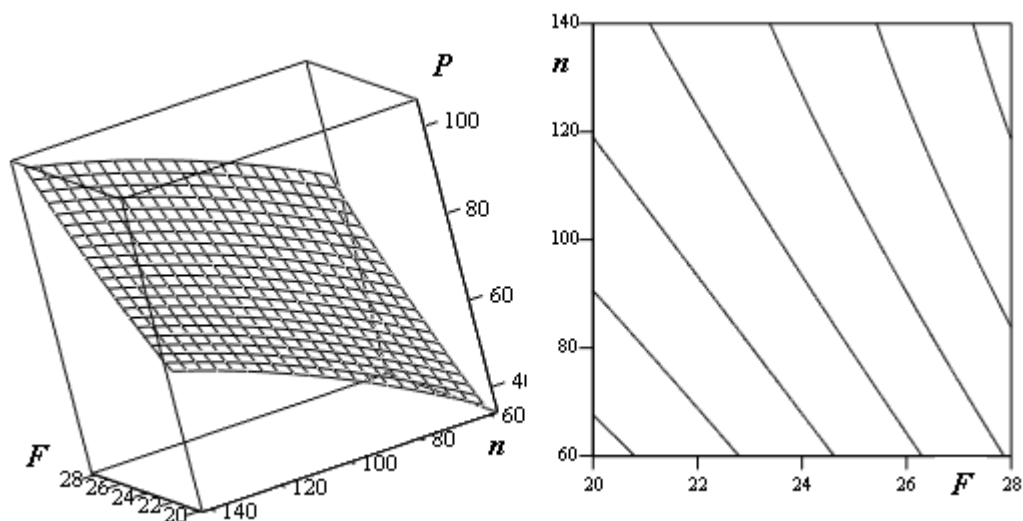


Рисунок 10.6 – Залежність споживаної потужності двигуна обертання від режимних параметрів, таких як потужність (P , кВт), навантаження (F , т) та частота обертання (n , об/хв)

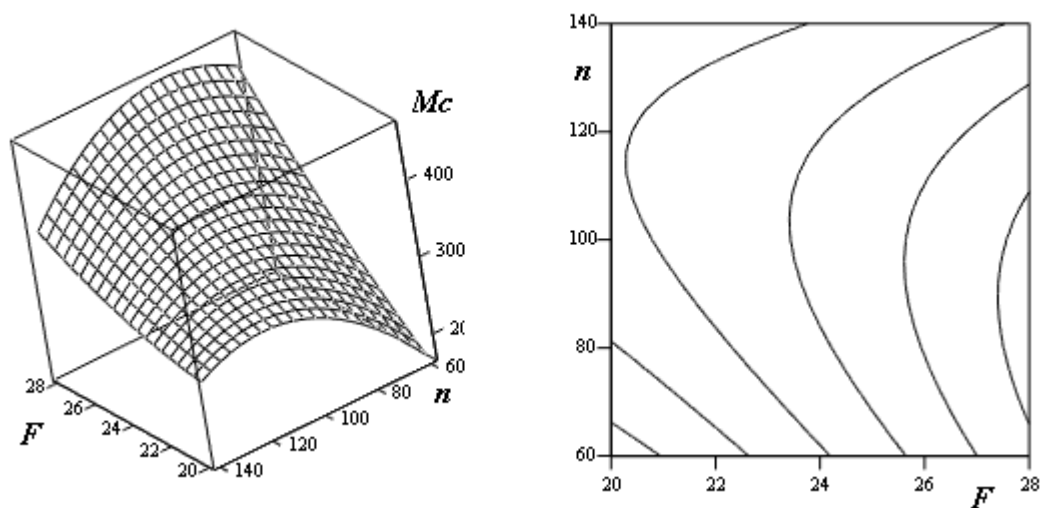


Рисунок 10.7 – Вплив режимних параметрів (момент сили M_c , кг·м; сила F , т; частота обертання n , об/хв) на величину моменту опору, що діє на долото

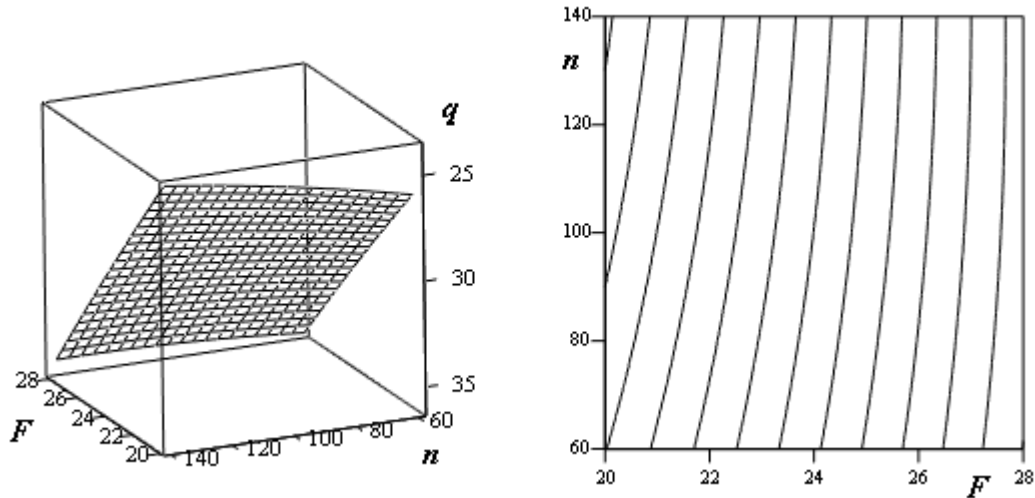


Рис.10.8 – Вплив режимних параметрів (питома потужність буріння q , кВт·год/м; сила різання F , т; частота обертання n , об/хв) на питому енергоємність процесу буріння

Оптимальне регулювання процесу буріння передбачає максимізацію продуктивності, зокрема, досягнення максимальної механічної швидкості буріння. Такий підхід до керування руйнуванням гірської породи забезпечує найкращі техніко-економічні показники експлуатації бурового обладнання. Збільшення режимних параметрів безпосередньо корелює з ростом механічної швидкості буріння, однак супроводжується одночасним підвищенням низькочастотних динамічних навантажень і вібрації верстата.

Експериментальні дані свідчать, що регулювання рівня вібрацій шляхом зміни осьового тиску є неефективним, оскільки зниження осьового тиску, спрямоване на зменшення вібрації, призводить до зниження лінійної швидкості проходження свердловини. При цьому швидкість буріння більшою мірою залежить від осьового тиску, ніж від частоти обертання долота. Навпаки, динамічні навантаження та вібрація верстата

визначаються переважно частотою обертання долота, а не осьовим тиском. Отже, ефективним засобом регулювання вібрації є корекція частоти обертання долота, при цьому швидкість обертання повинна підтримуватися максимальною, з урахуванням допустимого рівня низькочастотних динамічних навантажень.

У роботі [160] запропоновано метод регулювання процесу буріння шляхом зміни частоти обертання долота залежно від рівня вібрацій верстата при підтримці сталого максимального осьового тиску. Величина осьового тиску визначається властивостями бурових порід, тоді як швидкість обертання долота коригується відповідно до показників вібрації.

Застосування параметрів вібрації окремих вузлів верстата для керування процесом має суттєві обмеження. Вібраційні характеристики окремих елементів бурового верстата формуються не лише під впливом вібрацій бурового поставу, а й автоколиваний конструктивної системи, параметри яких різняться в залежності від жорсткості, маси та локалізації вузла. Основним джерелом низькочастотних вібрацій та динамічних навантажень, що спричиняють зношення вузлів верстата та шарошкового долота, є вібрації бурового поставу. Через суперпозицію цих вібрацій із власними коливаннями системи, прояви вібрації для різних вузлів верстата при однакових геологічних умовах та режимах буріння відрізняються і не підпорядковуються єдиним закономірностям.

Експериментальні дослідження низькочастотних динамічних навантажень показали, що динамічні навантаження бурового поставу та крутний момент на долоті мають узгоджену часову структуру. Виявлено також, що динамічні навантаження змінюються періодично в діапазоні частот 3–6 Гц, пропорційна частоті обертання долота. Коливання струму двигуна обертання виникають внаслідок вимушених коливань стаціонарної динамічної системи та характеризуються тими ж кутовими

частотами, що й збурення, проте відрізняються за амплітудою і фазою. Внаслідок цього у роботі [155] рекомендовано використовувати низькочастотну змінну складову струму двигуна обертання як достовірний (непрямий) параметр для оцінки рівня низькочастотних динамічних навантажень.

Регулювання за непрямим параметром динамічного навантаження, представленим струмом двигуна обертання, забезпечило розробку системи керування, вхідний сигнал якої максимально адекватно відображає характеристику вібрацій бурового поставу. Погашення вібрацій досягалося шляхом впровадження нелінійного контуру керування в приводі обертання з використанням силового магнітного підсилювача. Розглянута система (рис. 10.9) була апробована на експериментальному верстаті СБШ-250М у реальних умовах Південного гірничо-збагачувального комбінату (м. Кривий Ріг, 1971 р.), що дозволило підвищити продуктивність проходки на долото в середньому на 4 %.

Система обмеження вібрацій включає такі основні компоненти:

- фільтр Φ , призначений для виділення змінної низькочастотної складової струму двигуна; вхідний сигнал на фільтр надходить від шунта, підключеного до якірного кола двигуна D ;
- підсилювач змінного струму $П1$, що виконує посилення вихідного сигналу фільтра Φ ;
- двопівперіодний випрямляч B , який забезпечує випрямлення вихідного сигналу підсилювача $П1$;
- блок порівняння $БП$, у якому здійснюється порівняння випрямленого сигналу, пропорційного амплітуді змінної складової струму двигуна, з граничним допустимим значенням;
- блок інтеграції I , що інтегрує сигнал помилки (неузгодженості);

– балансовий підсилювач постійного струму П2, який підсилює вихідний сигнал інтегратора І.

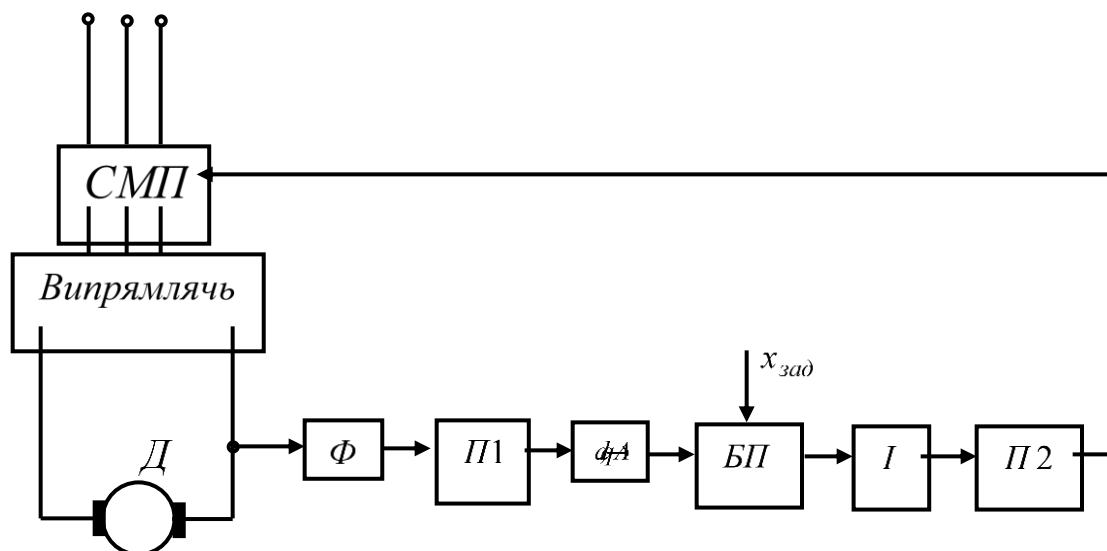


Рисунок 10.9 – Функціональна структура системи автоматичного контролю та регулювання вібрацій у буровому обладнанні

10.5 Висновки

За результатами аналізу стану шарошкового методу буріння підричних свердловин, а також теоретичних і експериментальних досліджень шляхів удосконалення приводних систем бурових верстатів (БВ), впроваджених у відкритих гірничих роботах України, встановлено наступне:

1. Однією з ключових проблем відкритого видобутку корисних копалин на кар'єрах України є фізичне та моральне старіння гірничого обладнання, зокрема бурових верстатів. Відповідно, модернізація існуючого парку машин та розробка нового покоління БВ є актуальним науково-прикладним завданням, успішне розв'язання якого визначає

конкурентоспроможність вітчизняної гірничорудної промисловості на світовому ринку.

2. Розробкою вітчизняних верстатів шарошкового буріння займаються колективи спеціалізованих конструкторських бюро інститутів ВАТ «Ново-Краматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), ВАТ «КриворіжНІПрудмаш» та ВАТ «Криворізький завод гірничого машинобудування» (м. Кривий Ріг). Вони вдосконалюють механічні та гідравлічні компоненти БВ, при цьому традиційно застосовуються тиристорні приводні системи з двигунами постійного струму.

3. Поряд із модернізацією гідромеханічного устаткування необхідно покращувати й приводні системи, які повинні відповідати сучасним стандартам світової електротехнічної промисловості. Лише за таких умов можливо створити конкурентоспроможний буровий верстат у цілому.

4. У галузі промислових приводних систем спостерігається стабільна тенденція впровадження частотно-регульованих короткозамкнених асинхронних двигунів із застосуванням автономних інверторів напруги або струму.

Результати роботи опубліковані [156, 158, 160, 162, 165-168].

ВИСНОВКИ

У результаті виконання науково-дослідної роботи було проведено комплексне дослідження методів автоматизації та енергозабезпечення виробничих процесів у мехатроніці та робототехніці, адаптованих до специфіки гірничо-металургійного комплексу Групи Метінвест. Робота охоплює як фундаментальні, так і прикладні аспекти розробки та впровадження сучасних технологій управління, діагностики та оптимізації енергоспоживання.

Дослідження методів ідентифікації об'єктів керування дозволило вдосконалити підходи до математичного моделювання та адаптивного налаштування систем управління, що є критично важливим для забезпечення стійкої та ефективної роботи мехатронних і робототехнічних систем у складних промислових умовах.

Аналіз впливу типу перехідного процесу та налаштувань регулятора на витрати палива для нагріву металу виявив значні резерви економії енергоресурсів за рахунок оптимізації динаміки роботи систем керування. Отримані результати мають практичну цінність для модернізації теплотехнічних установок металургійного виробництва.

Дослідження інформаційного забезпечення систем управління прокатними станами показало можливості підвищення надійності та точності керування за рахунок інтеграції сучасних засобів збору, обробки і візуалізації технологічних даних, в тому числі:

- системи контролю технологічних параметрів прокатних станів вимагають значного асортименту первинних перетворювачів різного функціонального призначення до роботи в екстремальних умовах металургійного виробництва;

- створення сучасних комплексів із засобами контролю з високою

завадостійкістю та швидкодією для систем управління складними металургійними процесами є актуальним завданням з економічної та науково-технічної точок зору;

- доведено, що фотоелектричний спосіб контролю параметрів об'єктів забезпечує необхідну перешкодозахищеність, достовірність контролю і точність вимірів;

- розроблена методика розрахунку фотоелектричного вимірювального перетворювача з цифровою фільтрацією оптичного кодоімпульсного сигналу як первинного елемента ІВС, що дозволить підвищити якісні показники і реальну перешкодостійкість перетворювача при роботі в екстремальних умовах;

- розроблена методика проектування вимірювальної частини ІВС контролю технологічних параметрів об'єктів контролю на базі фотоелектричного вимірювального перетворювача з цифровою фільтрацією кодоімпульсного оптичного сигналу для виявлення об'єктів будь-якого теплового стану.

Розроблено технічні засоби, алгоритмічне та програмне забезпечення підсистем ведення технологічної інформації в АСУ ТП, що забезпечують підвищення рівня автоматизації виробництва та створюють основу для подальшого впровадження елементів «цифрового підприємства», а саме:

- створено фізичну модель об'єкту управління з декількома різнорідними параметрами, що змінюються як повільно (температура повітря), так і швидко (швидкість повітря), а також взаємопов'язані між собою;

- розглянуто питання обробки вхідних даних для отримання результатів, придатних для подальшої передачі в систему керування;

- проведено ідентифікацію параметрів об'єкта керування та

розрахунок параметрів регуляторів;

– створена математична модель об'єкту керування.

Запропоновано методику технічного діагностування основних вузлів та механізмів роторного екскаватора, реалізація якої дозволяє підвищити ефективність експлуатації та знизити аварійність у гірничих підрозділах підприємства, тобто:

– розробка засобів безрозбірного контролю виявлення дефектів є актуальним завданням вирішення якого дозволить запобігти спрацьовуванню основних вузлів редукторів роторного екскаватора;

– важливим шляхом у підвищенні ефективності технічної експлуатації є вдосконалення методів та форм технічного обслуговування та ремонту на основі використання методів та засобів технічного діагностування;

– встановлено, що інформація про інтенсивність надходження продуктів зношування до мастила, отримана за допомогою датчика, є точнішою порівняно з результатами традиційних методів, що базуються на аналізі відібраних проб;

– випробування інтегрального методу діагностування редуктора роторного екскаватора за кількістю продуктів зношування, що надійшли в мастило, показали можливість безрозбірного контролю інтенсивності зношування елементів редуктора за допомогою датчика.

Досліджено інформаційне забезпечення розподіленої АСУ електротермічними печами, що сприяє гнучкості та адаптивності систем керування в умовах змінного технологічного навантаження та дає змогу реалізувати принципи енергетичного менеджменту, що дозволило:

– розробити структуру технічної реалізації та обґрунтовано можливість організації АСУ ТРП шляхом інтеграції в існуючі дворівневі розподілені системи управління технологічним комплексом «ПІЧ-КІВШ» з

використанням мережевих промислових технологій Profibus та Industrial Ethernet;

- отримати подальший розвиток алгоритм спільного керування та структуру системи керування електричними та тепловими параметрами, яка не потребує конструктивних змін існуючих систем керування енергетичними параметрами плавки ДСП при інтеграції АСУ ТРП;

- провести аналіз процесів керування в системі автоматизації за допомогою мереж Петрі, отримано алгоритми керування переходами станів у ході плавки;

- запропонувати структуру та алгоритм реалізації розподілу завдань управління, контролю та візуалізації АСУ ТРП між окремими компонентами системи управління нижнього та верхнього рівнів;

- розробити модель взаємодії компонентів АСУ ТРП на основі гібридного методу управління доступом на каналному та користувальницькому рівні протоколу Profibus та специфікацій обладнання Master та Slave шини Profibus-DP, що відрізняється тим, що враховує тимчасові параметри промислової шини та розподіл завдань управління між системами автоматизації.

Розроблено рекомендації щодо енергоефективних режимів електроспоживання технологічних процесів шахт, що дозволяє досягти зниження витрат електроенергії без шкоди для продуктивності виробництва у межах яких встановлено:

- фактичні режими електроспоживання ВГП із системами регульованого електроприводу на базі синхронних і асинхронних двигунів характеризуються значною рівномірністю;

- 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;

– проблема забезпечення пікових навантажень в енергосистемі України існує та немає передумов її ефективного (або цілковитого) вирішення у найближчому майбутньому;

– вимоги сьогодення все більше схиляють чашу терезів у бік децентралізованого (або комбінованого) енергозабезпечення промислових підприємств, у тому числі вугільних шахт;

– використання тиристорних перетворювачів у системах електроприводу технологічних установок (наприклад, головних вентиляторів та підйомних машин) суттєво збільшує споживання реактивної енергії.

Встановлені шляхи подальшого удосконалення приводних систем бурових верстатів.

Загальні результати дослідження підтверджують актуальність і високу ефективність інтеграції інноваційних підходів до автоматизації, енергозбереження та технічної діагностики в рамках функціонування підприємств гірничо-металургійного комплексу. Запропоновані методики та технічні рішення можуть бути впроваджені у виробничу практику підприємств Групи Метінвест, що дозволить підвищити конкурентоспроможність, енергоефективність та надійність виробництва.

У результаті виконання науково-дослідної роботи було комплексно досліджено питання автоматизації та енергозабезпечення виробничих процесів у сфері мехатроніки та робототехніки, що застосовуються в умовах гірничо-металургійного комплексу компанії Метінвест.

Проведений аналіз сучасного стану виробництва показав, що впровадження інтелектуальних систем автоматичного керування, робототехнічних комплексів та мехатронних модулів є ключовим чинником підвищення продуктивності, надійності та енергоефективності технологічних процесів.

У межах дослідження:

- розроблено рекомендації щодо вибору оптимальних технічних рішень для автоматизації вузлів та агрегатів виробництва (розділ 1);
- проведено енергетичний аудит типових технологічних ділянок з метою оптимізації споживання електроенергії (розділ 7);
- запропоновано архітектуру інтегрованої системи автоматичного керування із врахуванням умов промислового середовища (розділи 3, 6);
- змодельовано сценарії впровадження мехатронних систем у виробничі лінії підприємств Метінвесту (розділи 4, 8);
- виконано оцінку ефективності впровадження запропонованих технічних рішень за критеріями енергозбереження, зниження аварійності та економічної доцільності (розділи 2, 5, 7, 9).

Результати дослідження підтверджують доцільність широкого впровадження автоматизованих та енергоефективних систем у рамках цифрової трансформації підприємств гірничо-металургійного комплексу. Запропоновані підходи можуть бути використані як основа для подальших інженерних розробок та практичного впровадження інновацій у виробничі процеси підприємств групи Метінвест.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Шпарук Б. О., Поліщук І. А. Адаптивне керування інерційними квазістаціонарними об'єктами. Молодий вчений : науковий журнал № 4, 2017. С. 577–582. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2017/4/135.pdf>.
2. Lipták B. G. Instrument engineers' handbook. 4th ed. CRC Press, 2018. Vol. 2 : Process control and optimization. 2464 p.
3. Koyfman O. O., Miroshnychenko V. I., Simkin O. I. ANALYTICAL STUDY OF METHODS OF IDENTIFICATION OF CONTROL OBJECT. *MININGMETALTECH 2023 – THE MINING AND METALS SECTOR: INTEGRATION OF BUSINESS, TECHNOLOGY AND EDUCATION*. 2023. P. 113–148. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-7>
4. Comparison of the methods for determining the parameters of controlled process / O. O. Koyfman et al. *MININGMETALTECH 2023 – THE MINING AND METALS SECTOR: INTEGRATION OF BUSINESS, TECHNOLOGY AND EDUCATION*. Volume 2. 2023. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-90>.
5. Rengaswamy R., Srinivasan B., Bhatt N. P. Process Control Fundamentals: Analysis, Design, Assessment, and Diagnosis (1st ed.). CRC Press, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780367433437>.
6. Identification of a damped PT2 system. Hackaday.io : веб-сайт. URL: <https://hackaday.io/page/4829-identification-of-a-damped-pt2-system>.
7. Autoren der Wikimedia-Projekte. Lineares zeitinvariantes System – Wikipedia. Wikipedia – Die freie Enzyklopädie : веб-сайт URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Lineares_zeitinvariantes_System.
8. Fitting step responses. Dynamics and Control with Jupyter Notebooks 0.0.1 documentation : веб-сайт URL: <https://dynamics-and->

control.readthedocs.io/en/latest/1_Dynamics/7_System_identification/Dynamics%20model%20parameter%20estimation.html.

9. Alchemyst/Dynamics-and-Control. Jupyter notebooks for Dynamics and Control. GitHub : веб-сайт URL: <https://github.com/alchemyst/Dynamics-and-Control>.

10. Scilab : веб-сайт. URL: <https://www.scilab.org/>.

11. 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 : зб. тез Всеукр. наук.-техн. інтернет-конференції. Дніпро : ДВНЗ «ПДТУ», 2024. С. 19-23.

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

13. Койфман О. О., Ісаєв А. Б., Голотюк М. В. Вплив тривалості стабілізації параметру в кінці кривої розгону на якість ідентифікації об'єкта керування. Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті : зб. тез доп. Міжнар. науково-практ. конференції. Рівне, 2025. С. 100–102.

14. Койфман О. О., Ісаєв А. Б., Голотюк М. В. Вплив згладжування методом модифікованого рухомого середнього на результати дослідження параметрів об'єкта. Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології : тези доп. Всеукр. науково-техн. інтернет-конференції. Дніпро, 2025. С. 20–22. URL: <https://drive.google.com/file/d/1nWwiammOhuSOX15urHF1STM3JkqcSvXu/view>.

15. Thorsten W. Becker, Boris J. P. Kaus. Numerical modeling of Earth systems. : Lecture notes for USC GEOL557, v. 1.2.2. The University of Texas

at Austin, 2020. P. 222 URL: <https://www-udc.ig.utexas.edu/external/becker/Geodynamics557.pdf>

16. Gerald W. Recktenwald. Finite-difference approximations to the heat equation. Portland State University, 2004. Pp. 1-27 URL: <https://webpace.science.uu.nl/~zegel101/MOLMODWISK/FDheat2.pdf>

17. 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. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 2. Pp. 68 - 71. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-102>.

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

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

20. Суботін О.В., Петрухін Я.І., Новіков Д.С. Аналіз оптичних та електромагнітних промислових завад, що ускладнюють роботу засобів автоматизації. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції / за заг. ред. О.Ф. Тарасова. Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2025. С. 239-242. ISBN 978-617-7893-00-3. URL: <http://cit.dgma.donetsk.ua/materials.html>.

21. Сус С. П., Суботін О. В. Підвищення надійності роботи оптичних датчиків в умовах інтенсивних оптичних перешкод. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції / за заг. ред. О.Ф.

Тарасова. Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2025. С.226-229. ISBN 978-617-7893-00-3. URL: <http://cit.dgma.donetsk.ua/materials.html>.

22. Суботін О.В., Петрухін Я.І., Новіков Д.С. Аналіз способів виявлення інформаційних сигналів при значних за інтенсивністю перешкодах. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ-Тернопіль-Свалява: ДДМА, 2025. С. 216-218. ISBN 978-617-7893-02-7.

23. Суботін О.В., Пертухін Я.І. Особливості вибору технічних засобів інформаційної мережі. Research in Science, Technology and Economics: Collection of Scientific Papers “International Scientific Unity” with Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Luxembourg, 2025. Pp.68-71. ISBN 979-8-89704-985-1. DOI: <https://doi.org/10.70286/isu-05.03.2025>.

24. Суботін О.В., Новіков Д.С. Особливості створення комплексної інформаційної системи управління підприємством. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. Pp. 356 - 360. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-119>.

25. Суботін О.В., Чернявський А.А. Інформаційні технології в металургійному виробництві. Інформатика, управління та штучний інтелект : збірник тез сьомої міжнародної науково-технічної конференції. Харків: НТУ "ХПІ", 2020. С. 66. ISSN 2524-0293.

26. Лучук А.М. Устройство передачи дискретной информации. Київ: Техніка, 1978. 260с.

27. Суботін О.В. Розробка ряду модульних структур вимірювальних перетворювачів фотоелектричного типу. Надійність інструменту та

оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. Вип. №42. Краматорськ: ДДМА, 2018. С.80-86.

28. Суботін О.В. Аналіз інформаційного забезпечення систем автоматизації металургійного обладнання. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції. Краматорськ: ДДМА, 2018. С.119-120. URL: http://cit.dgma.donetsk.ua/materials/paper_citae_2018.pdf.

29. Верлань А.Ф. Электронные функциональные преобразователи систем автоматики. К.: Вища шк., 1981. 64с.

30. Суботін О.В., Сус С.П. Аналіз каналу розповсюдження оптичного сигналу для використання первинних перетворювачів фотоелектричного типу. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ-Тернопіль-Свалява: ДДМА, 2025. С. 219-220. ISBN 978-617-7893-02-7.

31. Razzhivin O., Markov O., Subotin O. Automated Melt Temperature Control System In Induction Furnace. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005650>.

32. Суботін О.В., Лістровой В.А. Система автоматичного стеження за слябами у пічному районі. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2023. С.115-116.

33. Сус С.П., Суботін О.В. Особливості визначення місця розташування гарячого прокату оптичним методом. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. Краматорськ: ДДМА, 2019. № 1(45). С.152-157. ISSN 1993-8322. URL:

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_1\(45\)_2019/article/26.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_1(45)_2019/article/26.pdf).

34. Subotin O., Markov O., Razzhivin O. Study Of The Dynamics Of Solidification Of A Continuously Cast Ingot On The Improved Mathematical Model Of The Process Of Soft Compression. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine, 2022. Pp. 481-486. DOI: <https://10.1109/MEES58014.2022.10005665>.

35. Суботін О.В., Петрухін Я.І., Ситнік О.С. Аналіз можливостей передавання цифрової інформації в пристрої для передавання слябів НК1031. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2025. № 3. С.94-101. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-12>.

36. Суботін О.В., Петрухін Я.І., Сергієнко В.Ю. Особливості керування промисловим обладнанням бездротовим способом на фоні виробничих завод. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 2. Pp. 92 - 95. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-146>.

37. Суботін О.В., Петрухін Я.І. Проєктування модулю отримання первинної інформації для систем контролю технологічних параметрів. Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизація та робототехніка 2025 : матеріали II-ої Всеукраїнської конференції. / за заг. ред. І.Ш. Невлюдова. Харків: ХНУРЕ, 2025. С. 110-114. URL: <https://tapr.nure.ua/dijalnist-kafedri/naukova-robota/computer-integrated-technologies-automation-and-robotics>.

38. Суботін О.В., Мінаєнко О.Г., М.М. Штода Інформаційно-вимірювальна система правильної машини для контролю зазора робочих

роликів. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2024. № 2. С.86-91. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-13>.

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

40. 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.

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

42. Алдохін М. Д. Логічний аналізатор сигналів на ПЛІС. *Електронна та акустична інженерія*. 2020. Т. 3. № 4. С. 38–43.

43. Рязанцев О. І., В.С. Кардашук, Рязанцев А.О. Дослідження впливу параметра фільтра на якість аналого-цифрового перетворення сигналу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2020. № 7. (263). С. 29–34.

44. Song J., Tian S., Hu Y.-H., Ye P., Yang K., Guo L., Wei W. Digital Estimation and Compensation of Analog Errors in Frequency-Interleaved ADCs. *Journal of Circuits, Systems and Computers*. 2019. Vol. 28. P. 35–42.

45. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 29. P. 36–52.

46. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15. P. 2405–2415.

47. Yang J., Ji Z., Liu W., Xie Z. Digital-Twin-Based Coordinated Optimal Control for Steel Continuous Casting Process. *Metals*. 2023. Vol. 13, Art. 816. P. 123–143.

48. Kanokogi H. AI in the Process Industry. Yokogawa Technical Report (Engl. Ed.). 2021. Vol. 64, №. 1. P. 53–60.

49. Smith J. L. Advances in neural networks and potential for their application to steel metallurgy. *Materials Science and Technology*. 2020. Vol. 36, Issue 17. P. 1805-1819. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2020.1839206>.

50. Шилов Д., Ямненко Ю. Система дистанційного моніторингу ваги для бджільництва. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2022. Т. 27. № 3. С. 267186–1 – 267186–7.

51. 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*, PP. 113 – 147. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-7>.

52. Tom Denton. *Advanced Automotive Fault Diagnosis Automotive Technology: Vehicle Maintenance and Repair*. London: Routledge, 2020. 364 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429317781>

53. Kadilnikova T. M., Sushko L. F. Rationale of the evaluation and selection of kinematic and tribological characteristics of the system «pinion – gear rack» of cold-pilgering mills. *Science and Transport Progress*. 2014. Vol. 1(49). P. 1-5-111. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/22672>

54. Натаров А. П. Дослідження впливу геометричних параметрів зубчатих передач, що працюють в середах з наявністю абразива на їх довговічність : автореф. дис... канд. техн. наук. Харків, 1978. 28 с.

55. Gaydamaka A., Muzikin Y., Klitnoi V. Modelling of Technical Condition Control of Heavy Loaded Gears Teeth. *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice*. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2023. P. 285-297.

56. Cao Wei. The gearbox wears state monitoring and evaluation based on on-line wear debris features. *Wear*. 2019. Vol. 426-427. P. 1719–1728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.068>

57. Тимків А. В., Денисов В. Г. Методи та засоби діагностування суднової енергетичної установки. Суднові енергетичні установки. 2014. Вип. 32. С. 113-123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/seu_2014_32_18.

58. Налобіна О.О., Голотюк М.В., Бундза О.З., Шимко А.В., Пилипака Т.С. Дослідження методів автоматичного налаштування траєкторії руху транспортних засобів. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2025. № 3. С. 192 – 197. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-25>.

59. Налобіна О.О., Голотюк М.В., Бундза О.З., Шимко А.В., Пилипака Т.С. Розробка інтелектуальних систем керування машинами. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2025. № 3. С. 198 – 202. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-26>.

60. Налобіна О.О., Голотюк М.В., Бундза О.З. Концептуальний підхід до оцінки технічного стану роторних екскаваторів. The VII International scientific and practical conference «Present and future: priority areas of research in scientific and educational activities», Prague, Czech Republic, February 17-19, 2025. Prague, Czech Republic, 2025. 225 p., с. 216-218. URL: <https://surl.li/skzhyh>.

61. 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. С. 16-18.

62. 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.

63. Веман К. Основи PROFIBUS. Автоматизація та привід, Siemens : веб-сайт. 2006. с. 186. URL: <http://www.siemens.ua>.

64. Міюшкович Є. Г., Парамуд Я. С. Телекомунікаційні інтерфейси кіберфізичних систем: концепція застосування. Кіберфізичні системи: досягнення та виклики : матеріали Першого наукового семінару. Львів, 2015. С. 28–37.

65. International Standart IEC 61158 Digital data communications for measurement and control. Fieldbus for use in industrial control systems. 2004, 338 p.

66. 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". Краматорськ: ДДМА, 2002. С. 33.

67. Кузьмук В.В., Супруненко О.О., Парнюк А.М. Класифікація мереж Петрі та приклади їх застосування для розв'язання прикладних задач. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2011. № 2/9 (50). С. 40–43.

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

69. Разживін О.В., Койфман О.О Мірошніченко В.І., Новіков Д.С. Методика коректування параметрів бази даних технологічного процесу. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2025. № 3. с. 83-87. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-10>.

70. Razzhyvin O.V., Ryabchenko A.A., Pokotylova O.V. Analysis of the degree of informativeness of the database description of the state of automation objects .International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 2. P. 69-74. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-139>.

71. Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю., Кириченко М.С. Профілі електроспоживання головних вентиляторів вугільних шахт. Збірник наукових праць НГУ. 2024. № 77. С. 111-117. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.111>.

72. 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.

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

74. 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.

75. 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.

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

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

78. 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”. Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2021. р. 73-75.

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

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

81. Рухлов А.В., Луценко І.М., Рухлова Н.Ю., Кошеленко Є.В., Замкова О.А. Регулювання електроспоживання підприємств для зниження пікових навантажень в енергосистемі. *Збірник наукових праць НГУ*. 2023. № 74. С. 204-212. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.204>.

82. Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю. 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. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 2. P. 56-59. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-98>.

83. 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. p. 86-93. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2017_5_15.

84. 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.

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

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

87. 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. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/082>.

88. Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю., Воронін М.М. Складники добового профілю електроспоживання вугільної шахти. *Центральноукраїнський*

науковий вісник. *Технічні науки*. 2025. № 11 (42), ч. 2. С. 177-183. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.177-183](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.177-183).

89. Сергієнко Л.В., Сергієнко О.І. Обґрунтування способу автономного енергозабезпечення вугільного підприємства. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*. 2024. №1 (30). С. 85-90. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2024-1-85-90.pdf>.

90. Сергієнко Л.В., Сергієнко О.І. Обґрунтування комплексного проекту виробництва теплової та електричної енергії з використанням метану закритих шахт. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*. 2024. №2 (31). С. 63-67. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2024-2-63-67.pdf>.

91. Волинець В.І., Коменда Н.В., Романюк М.В., Бандура І.О., Гайдай А.В. Ранжування електротехнічних комплексів вугільних шахт за енергоефективністю. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика»*. 2023. №2 (29). С. 17-21. URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2023-2-17-21.pdf>.

92. Василега П.О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 290 с.

93. Возняк О.М., Штуць А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1 : навч. посібник. Вінниця: ТВОРИ, 2021. 280 с.

94. Stadnik M., Semenchenko D., Semenchenko A., Belytsky P. Improving energy efficiency of coal transportation by adjusting the speeds of a combine and a mine face conveyor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies SNIP*. 2019. №1. 60-70.

95. Стаднік М.І., Видмиш А.А. Дослідження пуску стрічкових конвеєрів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. С. 98-104.

96. Квашнін В.О., Бабаш А.В., Квашнін В.В. Розробка та дослідження моделі електроприводу рециркуляційного насосу зі скалярною системою керування. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2021. № 34(110). С. 39-48.

97. Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., Удовик О.В. Визначення показників якості напруги у промислових системах електропостачання при обмеженій потужності енергосистеми. *Електротехніка та Електроенергетика*. 2024. №3. С. 36-44. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-4>.

98. Чорна В.О., Кудряшов О.О. Порівняльний аналіз ефективності пасивного та активного фільтрів вищих гармонік в мережі з нелінійним навантаженням. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 83-91. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310686>.

99. Варецький Ю.О., Гайдзіца М., Коваль О.О. Проблема перенапруг на силових фільтрах у промислових електричних мережах. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2023. № 1(6). С. 20-30. DOI: <https://doi.org/10.23939/>.

100. Рухлов А.В., Рухлова Н.Ю. Ефективність застосування фільтрокомпенсуючого пристрою на прикладі головної підйомної установки вугільної шахти. *Abstracts of XXIII International Scientific and Practical Conference «The current state of the organization of scientific activity in the world»* (Madrid, Spain, June 10-12, 2024). Madrid, Spain, 2024. P. 559-563. URL: <https://eu-conf.com/events/the-current-state-of-the-organization>.

101. Doroshenko V., Yanchenko O. Improving the resource efficiency of foundry due to the assembly of conveyor and rotor-conveyor lines by robots. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*. 2020. Vol. 27. № 2. P. 179–186. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-179-186>.

102. Matthews K. 6 robotics trends taking over manufacturing. American Machinist : веб-сайт. URL: <https://www.americanmachinist.com/automation-and-robotics/media-gallery/21903020/6-robotics-trends-taking-over-manufacturing>.

103. Дорошенко В. С. Метод нейтралізації газів, що виділяються з ливарної форми при литві за газифікованими моделями. 2021. № 9. С. 8-14.

104. How automation is transforming the foundry and forging processes with robotics. foundry-planet.com : the platform for the ENTIRE CASTING INDUSTRY. URL: <https://www.foundry-planet.com/d/how-automation-is-transforming-the-foundry-and-forging-processes-with-robotics/>.

105. Foundry automation: the evolution and future. Foundry Machinery : веб-сайт. URL: <https://www.ofml.net/news-media/omega-sinto-news/foundry-automation-the-evolution-and-future>.

106. Дорошенко В. С. Концепція роторно-конвейєрного комплексу для літа по газифікованим моделям і термообробки відливок. *Металл и литье Украины*. 2019. № 1-2. С. 31-40. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001001769>.

107. Дорошенко, В.С. Лиття по газифікованих моделях з кристалізацією металу під тиском. *Ливарне виробництво*. 2016. № 1. С. 25-28.

108. Калюжний П. Б., Бродовий О. В., Дорошенко В. С., Нейма О. В. 3d-генерація пористих структур для друку ливарних моделей, що газифікуються в ливарній формі. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні* : праці Міжнародної науково-технічної конференції. 2024. № 5. DOI: <https://doi.org/10.20535/2519-450x.5.2024.319032>.

109. Shell-O-Matic automates Franklin Bronze foundry : Shell-O-Matic : веб-сайт URL: <https://www.shellomatic.com/automates-franklin-bronze-foundry/>.

110. Дорошенко В.С. Комплектація роботами конвеєрних та роторно-конвеєрних ліній ливарного виробництва. Лиття України. 2019. № 6. С. 21-23.

111. Metal casting robots market: Global industry analysis and forecast (2022-2029) : Maximize market research : веб-сайт. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-metal-casting-robots-market/109387/>.

112. Song K.-T., Ou S.-Q., Yang C.-A., Sun Y.-X., Kang L.-R., Wang Z.-Y., Wang Y.-S., Lu P.-C., Ko C.-L., Chen Y. H.. Scheduling and control of a wafer transfer robot for foundry equipment innovation competition. *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. № 15. P. 627–632. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.654>.

113. Калюжний П.Б., Шинський О.Й., Дорошенко В.С. Удосконалення ступінчастої ливникової системи для лиття за моделями, що газифікуються. *Литво. Металургія. 2024* : матеріали XX Ювіл. Міжнар. науково-практ. конф. (м. Харків, 30 трав. 2024 р.). Харків, 2024. С. 123–126. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79750>.

114. Cobot und kollaborative Roboter: Wissenswertes zur MRK : Automationspraxis : веб-сайт. URL: <https://automationspraxis.industrie.de/cobot/cobot-symbiose-von-mensch-und-roboter/>.

115. Kaliuzhnyi P., Doroshenko V., Neima O. Casting of combined polymer patterns that are gasified. *Casting processes*. 2023. Vol. 152. № 2. P. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049>.

116. ABB Robotics magazine. *International customer magazine from ABB Robotics*. ABB Robotics AB, 2015. № 2. URL: https://library.e.abb.com/public/1e526ce4610d469ebefc42938574d182/ABB_Robotics_magazine_2.15_low-res.pdf.

117. ABB robots improve foundry productivity and quality. *Industrial robot: an international journal*. 2001. Vol. 28. № 2. DOI: <https://doi.org/10.1108/ir.2001.04928baf.006>.

118. *International customer magazine from ABB Robotics*. № FO10002EN_R0. ABB, 2005. URL: https://library.e.abb.com/public/69dabf67ec8bf933c125717800462b57/Foundry_LR.pdf

119. Optimising production time in die casting: reducing cycles and increasing productivity. foundry-planet.com : the platform for the ENTIRE CASTING INDUSTRY. URL: <https://www.foundry-planet.com/d/optimising-production-time-in-die-casting-reducing-cycles-and-increasing-productivity/>.

120. Yang, Y., Zheng, Y., Xu, Y., Yang, M., Boyang, B., & Liu, F. Robotic applications of foundry industry in china. *Y Proceedings of the 72nd world foundry congress*. (Nagoya, 21-25th May 2016.). Nagoya, 2016. URL: <https://www.senkyo.co.jp/shishido/wfc2016/pdf/O-153.pdf>.

121. Robot milling speeds pattern, mold production. *Foundry Management & Technology* : веб-сайт. URL: <https://www.foundrymag.com/molds-cores/article/21249200/robot-milling-speeds-pattern-mold-production-process-qesc-llc>.

122. Automation in foundry and forging industry. KUKA AG : веб-сайт. URL: <https://www.kuka.com/en-de/industries/metal-industry/foundry-and-forging-industry>.

123. Doroshenko V., Yanchenko O. Improving the resource efficiency of foundry due to the assembly of conveyor and rotor-conveyor lines by robots.

Modern Technology, Materials and Design in Construction. 2020. Vol. 27. № 2. P. 179–186. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-179-186>.

124. Lynch K. M., Park F. C. *Modern robotics: mechanics, planning and control*. Cambridge University Press, 2017. 544 p. URL: <http://modernrobotics.org>.

125. Goldstein H., Poole C., Safko J., *Classical Mechanics*, Addison-Wesley. *Klassische Mechanik*. 2002. URL: <https://surl.li/mrdcyr>.

126. Bertsekas D. *Dynamic Programming and Optimal Control*. Massachusetts : Athena Scientific, 2012. URL: <https://surl.li/srkwtv>.

127. Batchelor G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO978051180095>.

128. Heaton I., Goodfellow J. Ian, Bengio Y., Courville A. *Deep learning. Genetic programming and evolvable machines*. 2017. Vol. 19. № 1-2. P. 305–307. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>.

129. Karyavkina N.S., Tsymbal B.M. Modernisation of foundry production with industrial robots and manipulators. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Issue 11(42). Part II. p. 135-142 URL: [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11\(42\)_II/18.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11(42)_II/18.pdf).

130. Карявкіна Н.С., Цимбал Б.М. Дослідження модернізації ливарного виробництва промисловими дронами. XXXII Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» : матеріали конференції. Кременчук: КрНУ, 2025. с. 126-128. DOI: <https://doi.org/10.32782/2079-5009.krnu25.4.27>.

131. Карявкіна Н.С., Цимбал Б.М. Теоретичні дослідження автоматизації ливарного виробництва промисловими роботами та маніпуляторами. Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування : збірник наукових праць Міжнародної молодіжної

науково-технічної конференції (м. Вінниця, 16-17 квітня 2025 р.) / за заг. ред. С. В. Ковалевського, д-ра техн. наук., проф.. Краматорськ : ДДМА, 2025. с. 142-148. URL:

[http://www.dgma.donetsk.ua/docs/news/2025/Collection%20of%20Young%20Science%202025.%20\(2\).pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/docs/news/2025/Collection%20of%20Young%20Science%202025.%20(2).pdf).

132. Історія верстатів з ЧПУ. Carable Machining : веб-сайт. URL: <https://carablemachining.com/uk/блoзі/історія-верстатів-з-ЧПУ/>.

133. Муляр Ю. І., Репінський С. В. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина I : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2019. 99 с.

134. Муляр Ю. І., Репінський С. В. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина II : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2020. 123 с.

135. Історія верстатів з ЧПУ. Carable Machining : веб-сайт. URL: <https://carablemachining.com/uk/блoзі/історія-верстатів-з-ЧПУ/>.

136. Ти і Діод. Кроковий двигун та Arduino. Приклади застосування. YouTube : веб-сайт. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Jj1qCGCXdl8>.

137. Abdulrahman D., Saleh T. Enhancing And Enriching An Existing 3-Axis CNC Machine For Teaching And Learning: A Case Study At IIUM. IIUM Engineering Congress Proceedings. 2023. Т. 1. № 1. С. 7–13. URL: <https://journals.iium.edu.my/ejournal/index.php/proc/article/view/2995>.

138. Sarguroh S. S., Rane A. B. Using GRBL-Arduino-based controller to run a two-axis computerized numerical control machine. 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET). Mumbai, India, 2018. С. 1–6. DOI: 10.1109/ICSCET.2018.8537315.

139. GRBL – G-code parser and CNC controller for Arduino. GitHub : веб-сайт. URL: <https://github.com/grbl/grbl>.

140. Universal G-Code Sender (UGS) : веб-сайт URL: https://winder.github.io/ugs_website/.

141. Mon T. Y., Oo S. H., Phyu H. E. Design and Implementation of Microcontroller Based Stepper Motor Control System for 3-Axis Airfoil Maker CNC Machine. International Journal of Scientific and Research Publications. 2018. Т. 8, № 9. URL: <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.9.2018.P8114>.

142. Впровадження технології автоматизації промислового управління. Sango Automation Limited : веб-сайт URL: <https://ua.linear-rotary.com/info/introduction-of-industrial-control-automation-57209559.html>.

143. Технологія автоматизованого виробництва : конспект лекцій URL: <https://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=177280>.

144. Nasution A. Y. Rancang Bangun Kontrol Motor 3 Axis Menggunakan Arduino Mega Pada Unit Mesin CNC Milling. DINAMIS, 2022. Т. 10. № 2. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.32734/dinamis.v10i2.10784>.

145. Виробник верстатів з ЧПУ. Завод верстатів з ЧПУ : веб-сайт URL: <https://obrabiarki-cnc.pl/uk/про-компанію/>.

146. Підключення крокового двигуна. Контролер L298. Tech-i-news : веб-сайт. URL: https://tech-i-news.com/Ардуіно/Підключення-крокового-двигуна-Контролер-L298?utm_source=chatgpt.com.

147. Підключення крокового двигуна. Geekmatic : веб-сайт. URL: https://geekmatic.in.ua/ua/podkluchenie_shagovogo_dvigatelia?utm_source=chatgpt.com.

148. StepperUnipolarCircuit. Arduino.Ua : веб-сайт. URL: <https://doc.arduino.ua/ru/prog/StepperUnipolarCircuit>.

149. Драйвер крокового двигуна StepStick A4988 з радіатором охолодження. Arduino.Ua : веб-сайт. URL: <https://arduino.ua/prod965-draiver-shagovogo-dvigatelya-stepstick-a4988>.

150. DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection. Allegro MicroSystems. P. 20. URL: https://www.pololu.com/file/download/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf?file_id=0J450.

151. Arduino CNC Shield A4988 управління ЧПУ кроковими двигунами. Arduinomania : веб-сайт. URL: <https://arduinomania.in.ua/arduino-cnc-shield-l293d-upravlenija-dvigateljami>.

152. Voliansky R., Volianska N., Sergienko O., Shramko Y., Nugroho F. Modeling and Simulation of Excited Oscillations in Dynamical Systems with Nonlinear Stiffness. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS, 2024. Vol. 1391. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-90735-7_30.

153. Khilov V. Recourse-saving control systems for electric drives of modernized drill rigs for open-mines of Ukraine. Multi-authored monograph «Prospects for developing recourse-saving technologies in mineral mining and processing». Romania : Universitas Petrosani, 2022. p. 368-396. URL: https://www.researchgate.net/publication/358568040_PROSPECTS_FOR_DEVELOPING_RESOURCE_SAVING_TECHNOLOGIES_IN_MINERAL_MINING_AND_PROCESSING.

154. Khilov V., Triputen V., Kuznetsov M., Babiak A. Effect of The Types of Drive Systems of Drilling Rigs on The Rock Breaking Dynamics. IEEE 2020 on Energy Efficient Systems (ESS), 2020. P. 158-169.

155. Хілов В. С. Визначення способу керування приводами поставу кар'єрного бурового верстата. Збірник наукових праць НГУ. 2024. № 76. С. 228-236.

156. Khilov V.S. Automated control of drives for open pit drilling rigs. Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2024. №1. p.67-72. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-10>.

157. Khilov V.S. Prospects for developing resource-saving technologies in mineral mining and processing/ Multi-authored monography. Petroșani, Romania : Universitas Publishing, 2022. 682 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/358568040_PROSPECTS_FOR_DEVELOPING_RESOURCE_SEAVING_TECHNOLOGIES_IN_MINERAL_MINING_AND_PROCESSING.

158. Пристрій плавного регулювання індуктивності: пат. на корисну модель 158455 Україна: МПК G05F 1/20. № у 202401379; заявл. 15.03.2024; опубл. 12.02.2025, Бюл. №7. 4 с.

159. Хілов В., Федоров С. Безсенсорне вимірювання моменту опору та потужності в електроприводі постійного струму. Збірник наукових праць НГУ. 2023. № 73. С. 278-287. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.278>.

160. Khilov V.S., Dyfort V.V., Pavlbshina O.Y. Dynamic parameters determination of the hydro-mechanical system electric drive control object. Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2025. №3. p.102-109. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-13>.

161. Khilov V. Identification of resistance torque on the roller cone bit in the drill rod rotation drive. 4Th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF). Kryvyi Rih, 2023. URL: <https://iopscience.iop.org/journal/1755-1315>.

162. Khilov V.S. Determination of Drill Rod Vibration Oscillations in Automated Electric Drive Systems. MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education: Scientific monograph. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. 276 p. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-6>.

163. Khilov V., Hlukhova N., Somin A., Kiiko V. Drive systems of the drilling rigs for open pits in Ukraine: state and ways for improvement. E3S Web

of Conferences. 2019. Volume 123, 01042. URL: <https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/49/contents/contents.html>.

164. Khilov V., Glukhova N., Pesotskaya L., Fedorov S. Using Fuzzy Control Principles to Improve the Electromagnetic Compatibility of Electrical Supply and Electromechanical Systems. 2022 IEEE 8th International Conference On Energy Smart Systems (ESS) : conference proceedings. (October 12-14, 2022). Kyiv : National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2022. P. 282-287. URL: https://drive.google.com/file/d/1zPw0S6_P4NJr3eWybZQEX2ptDUnGJ7rD/view?usp=sharing

165. Khilov V. S., Dyfort V.V., Pavlyshyna O.Y. Dynamic parameters determination of the hydro-mechanical system electric drive control object. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. с. 102-108. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-13>.

166. Khilov V., Dyfort V., Pavlyshyna A., Pavlishin S. Improving the Energy Efficiency of Drive Systems of Drilling Gigs for Kryvbas Quarries. Innovative Approaches in Modern Science and Nechnology: Collection of Scientific Papers "International Scientific Unity" with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. (Lisbon, March 26-28, 2025). Lisbon, Portugal, 2025. Pp.315-319. DOI: <https://doi10.70286/ISU-26.03.2025>.

167. Дифорт В.В., Павлишина О.Ю., Хілов В.С. Дослідження на комп'ютерній моделі динамічних властивостей привідних систем бурового верстату. Збірник тез Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції «Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології». Дніпро : ПДТУ, 2025. С. 97-99. URL: <https://drive.google.com/file/d/1nWwiammOhuSOX15urHF1STM3JkqcSvXu/view?usp=sharing>.

168. Khilov V. S. Automated Control of Drives for Open-Pit Drilling Rigs.
Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2024.
№ 3. с. 67-72. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-10>.