

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій, обліку та фінансів
Кафедра комп'ютерних технологій
і моделювання систем

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Боровський Ілля Іванович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача освіти)

УДК 004.78 : 004.42 : 655.3.06
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Адаптивне управління інфрачервоною іррадіацією
в конвеєрних технологічних процесах
(тема роботи)

122 “Комп'ютерні науки”
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело Боровського Іллі Івановича

Керівник роботи
Лапін Андрій Валерійович
Кандидат економічних наук,
доцент кафедри КТіМС

Житомир – 2026

Висновок кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем
за результатами попереднього захисту: допущений

Протокол засідання кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем
№ 20 від «05» червня 2026 р.

Завідувач кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем
к. пед. н., доцент _____ КОВАЛЬЧУК М. О.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ім'я, по батькові)

«05» червня 2026 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач освіти Боровський Ілля Іванович захистив
(прізвище, ім'я, по батькові)

кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____
за шкалою ECTS _____
за національною шкалою _____

Секретар ЕК
лаборант кафедри _____ КОРОЛЬЧУК В. В.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ім'я, по батькові)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	2
ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1 Особливості поліграфічного обладнання TPCABPrint TPS	7
1.2 Аналіз проблеми адгезії чорнил на конвеєрній лінії	9
1.3 Огляд існуючих рішень, обґрунтування розробки нової системи	11
Висновки до розділу 1	14
РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	16
2.1 Алгоритм аналізу графічних макетів у просторі СМҮК	16
2.2 Модель розбиття зображення по зонам	19
2.3 Алгоритм формування керуючих сигналів	21
2.4 Метод синхронізації керування за даними датчиків	23
Висновки до розділу 2	25
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ	27
3.1 Обґрунтування вибору обчислювальної платформи	27
3.2 Розробка структурної схеми інформаційно-керуючої системи	29
3.3 Програмна реалізація керуючого сервісу на мові Python	31
3.4 Розробка веб-інтерфейсу оператора на базі TCP-сервера	34
3.5 Аналіз результатів повної matrix випробувань	37
Висновки до розділу 3	39
ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	48

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АПК - апаратно-програмний комплекс

АСУ ТП - автоматизована система управління технологічними процесами

ВЕБ (Web) - розподілена інформаційна система, що надає доступ до пов'язаних документів

ІС - інформаційна система

ІЧ - інфрачервоний (про випромінювання або іррадіацію)

ОС - операційна система

ПЗ - програмне забезпечення

ЦП (CPU) - центральний процесор

СМΥК (Cyan, Magenta, Yellow, Key/Black) - субтрактивна колірна модель, що використовується у поліграфії

GPIO (General-Purpose Input/Output) - інтерфейс введення-виведення загального призначення

HTTP (HyperText Transfer Protocol) - протокол передачі гіпертексту

MD5 (Message Digest 5) - 128-бітний алгоритм хешування даних

SFEH (Standard Flat Elstein High-temperature) - серія стандартизованих керамічних інфрачервоних випромінювачів

TCP (Transmission Control Protocol) - протокол керування передачею даних

ToF (Time-of-Flight) - час-пролітний метод (оптичний датчик визначення відстані або позиціонування)

TTL / CMOS логіка - транзисторно-транзисторна та комплементарна логіка на базі польових транзисторів, що визначає рівні напруги цифрових сигналів

Цифровий сигнал (Digital Signal) - дискретний сигнал, який має два фіксованих логічних рівні напруги:

- * Логічна одиниця (High / «1») - високий рівень напруги (у шині GPIO Raspberry Pi 5 становить 3.3V), що відповідає увімкненому стану (активація силового ключа нагріву);

- * Логічний нуль (Low / «0») - низький рівень напруги (0V / земля), що відповідає вимкненому стану (деактивація силового ключа).

Q_z - інтегральний об'єм (щільність заливки) чорнила для окремої технологічної зони друкованого макета

V - вектор колірних каналів (C, M, Y, K) для аналізованого масиву пікселів

АНОТАЦІЯ

Боровський І. І. Адаптивне управління інфрачервоною іррадіацією в конвеєрних технологічних процесах. – Рукопис. Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Роботу присвячено розробці інформаційно-керуючої системи для автоматизації зонального інфрачервоного нагріву в поліграфічному виробництві. Досліджено проблему браку у вигляді «сирого шару» чорнил на лініях TISCABPrint TPS (на базі друкуючих головок HP FI-1000) та обґрунтовано вимоги до предиктивного цифрового керування обладнанням.

Запропоновано систему позонного дискретного управління на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5 під управлінням ОС Linux. Розроблено алгоритми попиксельного аналізу макетів у колірному просторі CMYK, що дозволяють розділити площу друку на 14 незалежних зон та сформувати для них карту дискретних станів.

Реалізовано метод синхронізації, де тригером старту є переривання від ToF-датчика під час фіксації краю заготовки. Просторовий трекінг матеріалу та видача команд виконуються через лічильник квадратурних сигналів інкрементального енкодера (фази А і Б). Керування реалізовано через шину GPIO напругою 3.3V (логічна «1») або 0V (логічний «0» для вимкнення ламп на білих полях). Для моніторингу створено веб-інтерфейс оператора на базі TCP/HTTP-сервера (порт :5000). Впровадження системи ліквідує брак та знижує енергоспоживання лінії.

Ключові слова: інформаційно-керуюча система, Raspberry Pi 5, простір CMYK, дискретний сигнал, квадратурний енкодер, ToF-датчик, таймінги керування, мережевий порт :5000, Python, автоматизація конвеєра.

SUMMARY

Borovskyi I. I. Adaptive Infrared Irradiation Control in Conveyor Technological Processes. – Manuscript. Bachelor's qualification thesis in Speciality 122 "Computer Science". – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The thesis is dedicated to the development of an information and control system designed to automate zonal infrared heating processes in industrial printing production. The study addresses product defects like "wet ink layer" on conveyor lines of TICABPrint TPS complexes (based on HP FI-1000 printheads) and justifies the requirements for predictive digital control of execution hardware.

The thesis implements an information system for zone-by-zone discrete control using a Raspberry Pi 5 single-board computer running Linux OS. Algorithms have been developed for predictive pixel-by-pixel analysis of digital layouts within the CMYK color space. This software enables spatial discretization of images into 14 independent technological zones and generates a map of discrete states for each zone in advance.

A synchronization method has been implemented where the physical trigger for starting the countdown is an interrupt from the ToF sensor when the edge of the blank passes. Precise spatial tracking of the material and command delivery are executed via a common counter of quadrature signals from an incremental encoder (phases A and B). Control is implemented through the GPIO bus by applying a voltage of 3.3V (logical "1") or 0V (logical "0" to disable the lamps on the layout's white fields). For system monitoring, a web interface was developed utilizing a TCP/HTTP server operating on network port :5000. The system completely eliminates defects and significantly reduces energy consumption.

Keywords: information and control system, Raspberry Pi 5, CMYK space, discrete signal, quadrature encoder, ToF sensor, control timings, network port :5000, Python, conveyor automation.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку промислового виробництва характеризується масовим впровадженням високошвидкісних автоматизованих ліній та цифрових технологій маркування [18]. Одним із найперспективніших напрямів у сфері виготовлення пакувальної продукції є використання промислових комплексів типу TICABPrint TPS на базі високопродуктивних друкуючих головок індустріального класу [17]. Проте екологічність та ефективність застосування водних пігментних чорнил на високих швидкостях конвеєрних ліній нівелюється проблемою їхньої слабкої адгезії до матеріалів та тривалим часом висихання [28]. У безперервному конвеєрному циклі, де наступна заготовка падає безпосередньо на попередню, це викликає змазування «сирого шару» чорнил та критичну деградацію якості маркування пакувальних матеріалів.

Традиційні підходи до вирішення цієї проблеми базуються на використанні класичних сушильних тунелів, які працюють у безперервному режимі з постійною максимальною потужністю [40]. Такі системи є вкрай неефективними, оскільки споживають від 3,0 до 6,0 кВт електроенергії через постійну роботу ламп по всій площі конвеєра, незалежно від наявності заготовок, їхнього розміру чи щільності нанесеного малюнка, а також створюють ризик термічної деформації гофрокартону.

Ефективне вирішення зазначеної проблеми лежить у площині комп'ютерних наук і полягає у створенні спеціалізованих інформаційно-керуючих систем реального часу [25]. Перспективним є підхід, за якого користувач заздалегідь завантажує графічний макет пакування та параметри лінії, а комп'ютерна система виконує предиктивний попиксельний аналіз зображення у колірному просторі CMYK [35]. Це дозволяє дискретизувати площу друку на 14 незалежних технологічних зон та сформувати для кожної з них карту дискретних станів («увімкнено/вимкнено»), жорстко прив'язану до кроків руху стрічки. Реалізація такої системи на базі доступних і потужних одноплатних обчислювачів, таких як Raspberry Pi 5 [3, 4] під управлінням операційної системи Linux [29], із синхронізацією через ToF-датчики та

квадратурні інкрементальні енкодери [12], є актуальною науково-практичною задачею. Вона дозволяє забезпечити роботу ламп виключно в момент проходження задрукованої ділянки, знижуючи споживання енергії [40].

Мета дослідження - розробка, алгоритмічне забезпечення та програмно-апаратна реалізація інформаційно-керуючої системи адаптивного зонального управління інфрачервоною іррадіацією в конвеєрних технологічних процесах на основі предиктивного аналізу цифрових макетів та крокової синхронізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати принципи функціонування промислового поліграфічного обладнання та обґрунтувати вимоги до інформаційної системи дискретного керування нагрівом.

2. Розробити алгоритм зчитування та попереднього аналізу цифрових макетів пакування у колірному просторі СМΥК для визначення щільності заливки по зонах.

3. Створити модель зонального розбиття зображення та алгоритм формування цифрових профілів на основі дискретних рівнів напруги (0V та 3.3V).

4. Розробити метод просторово-часової синхронізації початку відліку за сигналами апаратного переривання від ToF-датчика випередження [10].

5. Розробити структуру організації масивів керуючих переривань для 14 незалежних зон нагріву відносно фаз А і Б квадратурного інкрементального енкодера [12].

6. Програмно реалізувати багатопотоковий керуючий сервіс на мові Python [21, 38] та клієнт-серверний веб-інтерфейс оператора для моніторингу системи на базі мережевого порту :5000 [39].

7. Провести експериментальні дослідження створеної системи на тестовому стенді, виконати порівняльний аналіз енергоспоживання та оцінити її ефективність (описано в розділі 3, підрозділ 3.5).

Об'єкт дослідження - конвеєрні технологічні процеси термічної фіксації водних пігментних чорнил на пакувальних матеріалах під час їхнього високошвидкісного маркування.

Предмет дослідження - алгоритми обробки графічних даних, програмне та апаратне забезпечення інформаційної системи дискретного позиційного керування параметри інфрачервоної іррадіації відносно імпульсів енкадера.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використано методи цифрової обробки зображень та аналізу кольірних просторів (для розбору макетів СМУК) [35], принципи побудови систем реального часу та низькорівневого програмування мікропроцесорної техніки (для обробки переривань енкадера) [25, 27], методи багатопотокового та мережевого програмування (для розробки ПЗ на мові Python під ОС Linux) [38], а також методи експериментального тестування та статистичного аналізу даних.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні алгоритмів предиктивного керування виконавчими механізмами конвеєрних ліній на основі заздалегідь розрахованих цифрових циклограмних профілів для незалежних зон нагріву [16, 26], що, на відміну від існуючих підходів, дозволяє здійснювати безінерційне повне вимкнення ламп на порожніх ділянках матеріалу (білих полях) за кроками спільного лічильника переривань квадратурного енкадера без витрат процесорного часу на обчислення в процесі руху конвеєра.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено архітектуру, програмний комплекс на базі мови Python та схему сполучення обчислювального модуля Raspberry Pi 5 із периферійними ToF-датчиками, інкрементальним енкадером лінії та силовими ключами [3, 4, 11]. Створена інформаційна система дозволяє повністю ліквідувати брак продукції через змазування чорнил та знизити витрати електроенергії на ділянці сушіння у 2-3 разів порівняно з базовими статичними аналогами (середнє споживання знижено з 3.0–6.0 кВт до 0.8–3 кВт/год) за рахунок своєчасного відключення відповідних зон [40]. Результати роботи впроваджено у виробничий процес ТОВ «Техно Аргумент» (м. Житомир).

Апробація результатів дослідження. Основні теоретичні положення, конструктивні рішення та практичні результати дипломної роботи були представлені, обговорені та опубліковані у матеріалах науково-практичних конференцій:

1. Первинне дослідження обчислювального потенціалу одноплатних мікропроцесорних систем, яке заклало підґрунтя для вибору апаратної платформи та визначило перспективність використання SBC (Single Board Computers) як ядра інтелектуальних керуючих комплексів, висвітлено у праці: Боровський І. SBC: ключ до інтелектуальних систем // Студентські наукові читання - 2024: матеріали конф. першого туру Всеукр. конкурсу студентських наукових робіт Поліського національного університету (м. Житомир, 28 лист. 2024 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2024. – С. 25-27. [1]

2. Обґрунтування розробленого предиктивного алгоритму, результати просторового сегментування заготовок під топологію ІЧ-рампи та аналіз енергоефективності впровадженої інформаційно-керуючої системи сушіння на лінії TISABPrint TPS безпосередньо опубліковані у праці: Боровський І. Адаптивне управління інфрачервоною іррадіацією в конвеєрних технологічних процесах // Інформаційні технології та моделювання систем: зб. праць учасн. Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих вчених (м. Житомир, 22 трав. 2026 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2026. – С. 30-33. [2]

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Особливості поліграфічного обладнання TICASBPrint TPS

Промисловий поліграфічний комплекс TICASBPrint TPS є високопродуктивною конвеєрною системою, призначеною для високошвидкісного повноколірного маркування та брендування пакувальних матеріалів, готових коробів із гофрокартону, пакетів та інших плоских поверхонь. З точки зору комп'ютерних наук та системного аналізу, цей комплекс являє собою інтегровану інформаційно-технологічну систему, де швидкість фізичного переміщення об'єктів жорстко синхронізована з процесами цифрової обробки графічних даних у реальному часі [18, 26].

Апаратною та технологічною основою друкуючого вузла TICASBPrint TPS є вбудована промислова система індустріального класу HP OEM Fixed Imager 1000 (FI-1000). Цей модуль базується на фірмовій технології фіксованої друкуючої головки HP PageWide (модель T114) зі стійким прямолінійним трактом подачі матеріалу («straight through print path»). Використання нерухомої друкуючої головки великої ширини, під якою безперервно рухається конвеєрна стрічка із заготовками, забезпечує безпрецедентну для струминного друку швидкість роботи та лінійну стабільність процесу нанесення зображень.

Проведений аналіз документації та специфікацій OEM-модуля HP FI-1000 дозволяє виділити такі ключові архітектурні та програмно-апаратні особливості базового друкуючого обладнання:

1. Геометричні та конструктивні параметри друку. Ширина проходу друку (Print Swath) становить фіксовані 297 мм (11,7 дюймів), що відповідає стандарту A3+ та дозволяє покривати широкі пакувальні заготовки за один прохід. Конструкція підтримує роботу з медіа-матеріалами практично необмеженої довжини.

2. Конфігурація сопел та роздільна здатність. Загальна кількість сопел (Nozzle Count) у друкуючій матриці становить 59 136 одиниць, розподілених за матричною схемою: 4224 сопла на одну секцію, помножені на 14 секцій. Апаратна роздільна здатність (Resolution) становить 1200 сопел на один дюйм

для кожного з чотирьох колірних каналів. Середній об'єм краплі, що виштовхується, оптимізовано під колірні компоненти: 10 пл (піколітрів) для чорного каналу (К) та 8,5 пл для кольорових каналів (С, М, Y).

3. Програмні інтерфейси та робота з даними. Комплекс підтримує передачу растрових графічних масивів даних у повноколірному напівтоновому форматі CMYK contone raster [35]. Взаємодія з керуючим програмним забезпеченням верхнього рівня реалізується через спеціалізовані динамічні бібліотеки (HP-provided Windows DLL). Швидкість передачі даних та синхронізація потоків забезпечуються стандартними інтерфейсами зв'язку: одним високошвидкісним портом USB 2.0 та одним мережевим гігабітним інтерфейсом 10/100/1000 Base-T Ethernet.

4. Промислова периферія та датчики. Для моніторингу та фізичної синхронізації процесу нанесення чорнил OEM-модуль оснащений розвиненою системою введення-виведення: 5 лініями GPIO, 3 вхідними цифровими портами (GPI) та 2 вихідними (GPO). Окремі апаратні входи виділено для підключення датчика початку форми (Top of Form, ToF), датчика наявності матеріалу (media path) та інтерфейсу квадратурного інкрементального енкодера конвеєра [12]. На апаратному рівні також реалізовано сервісну станцію обслуговування (service station), що забезпечує автоматичне очищення, протирання та капування (закриття) сопел для підтримки стабільної працездатності матриці.

Максимальна лінійна швидкість руху конвеєра при збереженні номінальної якості друку досягає 18 дюймів за секунду (ips), що еквівалентно приблизно 45,7 см/с (або до 27 метрів за хвилину). Друкуючий вузол використовує водні пігментні чорнила (Pigmented aqueous ink) з індивідуальною системою картриджів великого об'єму (приблизно 498 мл для чорного кольору та по 225–237 мл для кольорових компонентів Cyan, Magenta, Yellow).

Незважаючи на високу технологічність, інтеграція вузла HP FI-1000 у конвеєрний комплекс TICABPrint TPS створює жорстку залежність між часом формування відбитка та часом його фізичної фіксації. Подача великих масивів цифрових даних на високій швидкості конвеєра призводить до миттєвого нанесення значних об'ємів рідкої фарби на картонну основу. Оскільки базова

конфігурація обладнання орієнтована на прямий наскрізний шлях матеріалу, виникає потреба в автоматизації супутніх процесів, зокрема - впровадженні інтелектуальних систем прискореного сушіння, які здатні адаптуватися до динаміки роботи конвеєра та структури графічних даних макета [19, 40].

1.2 Аналіз проблеми адгезії чорнил на конвеєрній лінії

Використання оригінальних рідких колірних компонентів на водній основі (Pigmented aqueous ink) в OEM-модулі HP FI-1000 забезпечує високу екологічність поліграфічного процесу, чіткість ліній та яскравість передачі кольорів. Проте в умовах високошвидкісного автоматизованого виробництва комплексів TICABPrint TPS виникає серйозна технологічна проблема - слабка первинна адгезія (зчеплення) водного пігменту з робочими поверхнями заготовок через різну швидкість поглинання та тривалий час випаровування рідкої фази носія чорнила [28].

Швидкість закріплення відбитка та час його повного висихання критично залежать від фізико-хімічних властивостей, структури та поверхневої енергії матеріалу, на який наноситься маркування. Проведений аналіз дозволяє класифікувати особливості взаємодії водного пігменту з основними типами промислових носіїв пакувальної лінії:

1. Гофрокартон (макулатурний та целюлозний). Порівняно зі звичайним картоном, гофрокартон демонструє кращі капілярні властивості та високу швидкість первинного вбирання вологи. Проте при високошвидкісному друку виникає специфічна проблема на ділянках із щільним растровим заповненням зображення. У місцях зі 100% наповненням чорнила (максимальна концентрація сумарного нанесення фарби) матеріал перенасичується вологою і утворює «сирий шар». Без примусової сушки такі заготовки при виході з транспортера злипаються між собою у штабелях, повністю псуючи лицьову поверхню пакування.

2. Крейдований картон. Є вкрай примхливим та складним технологічним матеріалом. Наявність поверхневого шару крейдування (мелону) створює бар'єр для дифузії. Найбільша проблема виникає з чорним (Black) та синім (Cyan)

колірними каналами, оскільки вони мають найбільший лінійний розмір молекул пігменту, які фізично не здатні проникнути крізь мікропори мелону. Для технологічного захисту таких поверхонь зверху наноситься спеціальний лак. Проте перед фазою лакування відбитків обов'язково потрібне попереднє спрямоване просушування, щоб великі молекули пігменту встигли закріпитися на поверхні і не були деформовані або змазані лакувальним вузлом.

3. Напівсинтетичні матеріали. Даний тип носіїв є ключовим об'єктом дослідження для розроблюваної системи через апріорі низьку природну адгезію до водних середовищ. Рідкі компоненти чорнила не здатні самотійно затекти у структуру напівсинтетики. У цьому випадку необхідна точкова термічна дія (легке нагрівання): під впливом інфрачервоної іррадіації відкриваються пори матеріалу, що дозволяє пігментам проникнути всередину верхнього шару та надійно закріпитися в ньому, одночасно забезпечуючи прискорене випаровування надлишкової вологи та еко-сольвентних зв'язуючих речовин [19, 23].

Специфіка конвеєрного циклу маркування на комплексах TICASBPrint TPS передбачає лінійну швидкість транспортера до 45,7 см/с. Нанесений масив рідких чорнил (особливо на напівсинтетичних матеріалах та зонах 100% заливки гофрокартону) утворює нестабільну плівку, яка не встигає пройти стадію дегідратації за час руху стрічки. Механічний контакт заготовок при штабелюванні призводить до змазування відбитку від складання (деградація штрих-кодів, QR-кодів і текстових блоків) та ефекту «відмарювання» (перенесення фарби на зворотний бік сусіднього листа).

Таким чином, системний аналіз процесу взаємодії водного пігменту з різними типами пакувальних матеріалів доводить, що природне висихання на високих швидкостях конвеєра є неможливим. З позиції комп'ютерних наук, це формує задачу розробки інформаційно-керуючої системи, яка повинна предиктивно аналізувати цифрову карту макета, точно локалізувати зони зі 100% заливкою або напівсинтетичні ділянки та адаптувати дискретні таймінги термічної дії під конкретну конфігурацію графічного масиву даних, що рухається конвеєром [26, 35].

1.3 Огляд існуючих рішень, обґрунтування розробки нової системи

Для вирішення проблеми штучного прискорення фіксації водних пігментних чорнил у промислових конвеєрних системах використовуються різноманітні технічні рішення. Аналіз існуючих підходів дозволяє класифікувати їх за принципом дії, архітектурою побудови систем керування та рівнем енергетичної ефективності:

Статичні конвекційні та тунельні сушарки. Функціонують за принципом безперервного обдування заготовок гарячим повітрям. Головним недоліком таких систем є висока теплова інерційність та низький коефіцієнт корисної дії. З позиції автоматизації, ці системи мають лінійне аналогове керування (ввімкнено/вимкнено для всього контуру) і не здатні адаптуватися до пауз у подачі матеріалу, що призводить до перевитрат енергії.

Статичні інфрачервоні (ІЧ) сушильні панелі без зонального розподілу. Використовують кварцові або галогенові ІЧ-лампи, які розташовані над конвеєрною стрічкою [23]. Такі системи забезпечують вищу швидкість передачі теплової енергії порівняно з конвекційними. Проте в базових аналогах керування реалізовано на рівні релейних схем або простих тиристорних регуляторів потужності, які виставляються оператором вручну на пульті керування. Лампи працюють безперервно по всій площі термотракту, споживаючи від 3,0 до 6,0 кВт електроенергії, незалежно від габаритів заготовки та топології нанесеного малюнка. Це викликає не лише фінансові збитки, а й деформацію незадрукованих ділянок (білих полів) картону.

Системи автоматизації на базі класичних промислових логічних контролерів (ПЛК / PLC). Спроби інтеграції стандартних ПЛК для позионного керування лампами стикаються з обмеженнями обчислювальної архітектури. ПЛК оптимізовані для циклічного опитування датчиків та виконання фіксованої логіки, проте вони не мають вбудованих апаратних засобів для високорівневого попиксельного розбору та аналізу графічних макетів (наприклад, файлів форматів PDF, TIFF або BMP у просторі CMYK). Для реалізації предиктивного аналізу макета в таких системах необхідне встановлення додаткового промислового комп'ютера (IPC), що суттєво здорожує загальну архітектуру.

Проведений аналіз доводить, що існуючі промислові аналоги не забезпечують одночасно гнучкості обробки графічних даних, швидкодії в реальному часі та низької енергоємності. Це обґрунтовує необхідність розробки нової інтегрованої інформаційно-керуючої системи, яка б суміщала функції високопродуктивного обчислювального сервера та Hard-Realtime контролера [25].

Впровадження проектованої системи на базі одноплатного обчислювача Raspberry Pi 5 [3, 4] під управлінням ОС Linux дозволяє вирішити зазначені проблеми завдяки таким архітектурним рішенням:

Предиктивний розрахунок цифрових профілів. Замість витрат процесорного часу під час руху лінії, система реалізує попередній попиксельний аналіз графічного макета в просторі СМҮК на етапі його завантаження через веб-інтерфейс (TCP/HTTP-сервер, порт :5000). Комп'ютер заздалегідь формує готову карту дискретних станів для кожної з 14 незалежних зон нагріву.

Низькорівнева крокова синхронізація у перериваннях. Фізичним тригером початку відліку є апаратне переривання від оптичногоToF-датчика випередження [10] (фіксація краю заготовки), а точний просторовий трекінг матеріалу здійснюється через спільний лічильник сигналів фаз А і Б квадратурного інкрементального енкодера [12].

Чиста дискретна логіка комутації. Система повністю відмовляється від енергоємного або інерційного регулювання, замінюючи його миттєвою подачею на піни GPIO напруги 3.3V (логічна «1» для активації ламп у зонах 100% заливки чи напівсинтетики) або 0V (логічний «0» на пустих білих полях та під час технологічних пауз між заготовками) [5, 6].

При максимальній встановленій потужності блоку ламп у 1,4 кВт (14 зон по 100 Вт), предиктивний алгоритм дозволяє задіювати в середньому лише 6–7 зон одночасно. Це забезпечує зниження енергоспоживання конвеєра до 0,3–0,7 кВт/год залежно від щільності макета, що у 4–10 разів ефективніше за існуючі статичні аналоги та повністю ліквідує брак маркування [40].

Проведений системний та порівняльний аналіз чинних індустріальних аналогів доводить, що існуючі технічні рішення мають фундаментальні архітектурні обмеження. Вони не здатні забезпечити гнучкість технологічного процесу та необхідний рівень енергоефективності на високошвидкісних лініях типу TICASPrint TPS. Головна проблема наявних систем полягає у відсутності інформаційного зв'язку між етапом цифрової підготовки графічних даних та етапом фізичного теплового впливу на матеріал [16]. Як наслідок, класичні сушарки функціонують відірвано від динаміки конвеєра та структури макета, що призводить до невиправданих витрат ресурсів та ризику псування продукції.

Це обґрунтовує необхідність проектування нової інтегрованої інформаційно-керуючої системи. Концептуальна доцільність її розробки базується на таких фундаментальних засадах та інженерних вимогах:

Необхідність реалізації попереднього цифрового керування. Замість спроб динамічного обчислення параметрів нагріву безпосередньо під час руху стрічки або використання інерційних зворотних зв'язків, нова система має діяти на основі випереджального аналізу даних [26]. Обчислювальна логіка повинна дозволяти заздалегідь інтерпретувати цифровий макет і трансформувати графічну щільність образу у просторово-координатні профілі для виконавчих механізмів ще до того, як заготовка потрапить у зону термічної обробки.

Потреба у поєднанні функцій високорівневого обчислювального сервера та Hard-Realtime контролера [25]. Оскільки система має одночасно забезпечувати інтерфейс взаємодії з оператором, опрацьовувати важкі графічні масиви кольорних просторів та миттєво реагувати на апаратні події периферії, базові промислові логічні контролери є нераціональними. Обґрунтованим є перехід на архітектуру одноплатних комп'ютерів під управлінням операційних систем сімейства Linux, що дозволяє сумістити розгалужені мережеві сервіси із прямим низькорівневим доступом до шини введення-виведення [5].

Перенесення логіки трекінгу на апаратні переривання. Для досягнення нульової обчислювальної затримки під час руху транспортера, система повинна повністю відмовитися від програмного опитування датчиків [27]. Початок відліку та подальший просторовий розподіл команд мають синхронізуватися

виключно через механізм апаратних переривань від датчиків присутності [10] та інкрементальних енкoderів [12], прив'язуючи дію системи до фізичних кроків лінії, а не до астрономічного часу .

Перехід на безінерційну дискретну комутацію. Специфіка роботи з напівсинтетичними матеріалами та зонами критичного наповнення гофрокартону вимагає миттєвої зміни станів нагрівальних елементів. Система має оперувати чистою дискретною логікою, забезпечуючи безінерційне повне вимкнення джерел іррадіації на технологічних паузах або порожніх білих полях макета [11, 34].

Таким чином, розробка нової інформаційно-керуючої системи є науково та практично обґрунтованою. Створення такої архітектури дозволяє розв'язати ключову суперечність високошвидкісного маркування - забезпечити гарантовану фіксацію відбитка та адаптацію системи під індивідуальні властивості пакувальних матеріалів за одночасного кардинального зниження питомого енергоспоживання конвеєрної лінії.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі виконано всебічний аналіз фізико-технічних особливостей об'єкта автоматизації, проведено критичне дослідження існуючих промислових сушильних систем та обґрунтовано концепцію модернізації апаратно-програмних комплексів за допомогою одноплатних обчислювачів. За результатами аналізу сформувано такі висновки:

1. Досліджено архітектуру промислового поліграфічного комплексу TISABPrint TPS, що функціонує на базі технології фіксованої друкуючої головки HP OEM Fixed Imager 1000. Встановлено, що висока лінійна швидкість руху конвеєра (до 45,7 см/с) у поєднанні з інтенсивним нанесенням водних пігментних чорнил створює критичну суперечність між часом формування відбитка та часом його фізичної фіксації. Це призводить до утворення «сирого шару» та виникнення браку у вигляді змазування графіки або ефекту «відмарювання» під час штабелювання заготовок.

2. Доведено, що характер взаємодії водного пігменту з робочими поверхнями критично залежить від типу носія. Виявлено, що наявні промислові рішення великого формату (класу A3 в альбомній орієнтації), такі як системи суцільного обдування чи інфрачервоні панелі без зонального розподілу (зокрема, аналоги від M&R або Kirk-Rudy), є непридатними для комплексів TICASPrint TPS. Вони функціонують у безперервному статичному режимі на постійній максимальній потужності (від 3,0 до 6,0 кВт), споживаючи надлишкову енергію на прогрів порожніх ділянок матеріалу, що призводить до його термічної деформації, короблення та високої собівартості виробництва. Класична архітектура промислових ПЛК при цьому не має вбудованих інструментів для динамічного попиксельного аналізу важких цифрових макетів «на льоту».

3. На основі дослідження сучасних тенденцій розвитку спеціалізованих одноплатних комп'ютерів (SBC) обґрунтовано їхню роль як ключового інструменту для інтелектуалізації застарілих аналогових АПК [1, 22]. Завдяки значному стрибку обчислювальної потужності (зокрема, переходу на багатоядерні архітектури рівня ARM Cortex-A76 [32]) та високій енергоефективності, сучасні SBC здатні замінити громіздкі промислові станції.

4. Науково та практично обґрунтовано необхідність створення нового адаптивного, енергоефективного рішення на базі комбінації можливостей одноплатних комп'ютерів [25, 29]. Застосування модульних та масштабованих архітектур SBC дозволяє подолати відірваність цифрового макета від фізичного процесу сушки. Нова інформаційно-керуюча система має діяти на принципах предиктивного аналізу графічного образу, апаратного трекінгу матеріалу за допомогою сигналів периферії та дискретного зонального ввімкнення нагрівачів, що дозволить мінімізувати енерговитрати виробничої лінії та повністю ліквідувати брак маркування.

РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

2.1 Алгоритм аналізу графічних макетів у просторі СМΥΚ

В основі предиктивного аналізу даних лежить алгоритм первинної цифрової обробки графічних макетів, який виконується на одноплатному комп'ютері до моменту фізичного старту конвеєрної лінії. Оскільки друкуючий OEM-модуль системи HP Fixed Imager 1000 (FI-1000) оперує чотирма тріадами струменевих дюз, вхідне зображення (незалежно від його початкового колірному простору RGB або палітри індексованих кольорів) підлягає обов'язковій програмній конверсії у субтрактивну модель колірному простору СМΥΚ (Cyan, Magenta, Yellow, Key/Black) [35].

Процес каналної декомпозиції та аналізу реалізується за такими фіксованими етапами та інженерними вимогами:

1. Растровий розбір зображення. Вхідний файл завантажується в оперативну пам'ять засобами високорівневої бібліотеки Pillow (PIL) [7]. Виконується метод колірному перетворення `.convert("СМΥΚ")`, в результаті якого вихідний графічний масив розділяється на 4 незалежні двовимірні матриці (по одній на кожен технологічний колір чорнила).

2. Синхронізація просторової роздільної здатності (DPI). Для точного збігу цифрової моделі аналізу із фізичним кроком нанесення чорнила друкуючою головкою, алгоритм інтерпретує та обробляє масив пікселів строго у фіксованих режимах роздільної здатності модуля HP FI-1000 - стандартний режим продуктивності: 300×300 DPI ;

3. Перетворення у NumPy-масиви [8]. Для забезпечення максимальної швидкодії обчислень на архітектурі ARM Cortex-A76 одноплатного комп'ютера, виділені канали C, M, Y, K трансформуються в одновимірні масиви типу `numpy.array` з типом даних `uint8` (значення насиченості пікселя від 0 до 255).

4. Квантування та предиктивний розрахунок щільності. На основі отриманих масивів для кожної координатної ділянки обчислюється середнє інтегральне значення насиченості за формулою усереднення чотирьох колірних каналів. Отриманий рівень насиченості (0–255) піддається операції

цілочисельного ділення для лінійного квантування інтенсивності нанесення фарби: кожному пікселю присвоюється дискретне значення об'єму чорнила від 0 до 4 умовних крапель.

Результатом роботи алгоритму є сформований у пам'яті чотириканальний цифровий зліпок макета, де кожен елемент матриці чітко відображає щільність нанесення рідкого пігменту на пакуванні [35]. Це створює інформаційний базис для подальшого просторового сегментування зображення на технологічні зони нагріву.

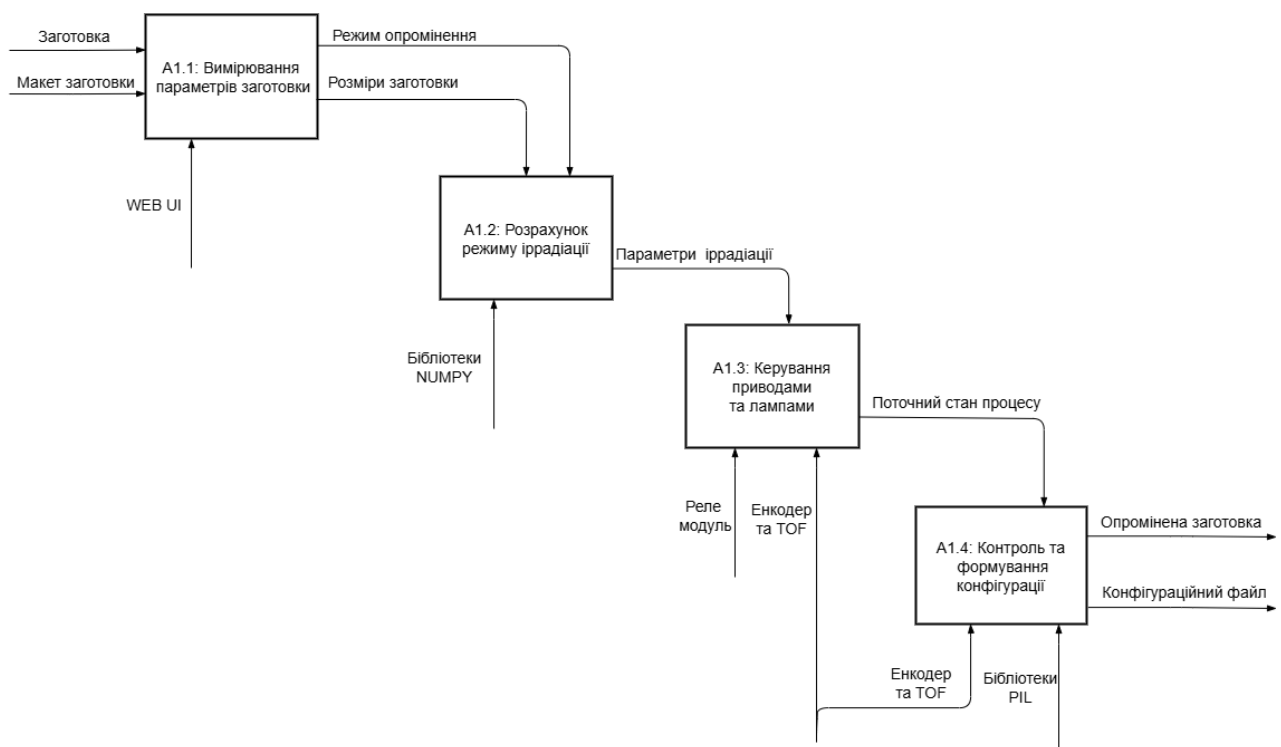


Рисунок 2.1 – Діаграма декомпозиції IDEF0_A1

У контексті представленої діаграми декомпозиції за методологією IDEF0 рівня A1 (рис. 2.1), технологічний цикл функціонування інформаційно-керуючої системи сушіння та фіксації водних пігментів деталізовано через взаємозв'язок чотирьох послідовних функціональних блоків:

Блок A1.1 (Вимірювання параметрів заготовки) відповідає за збір, консолідацію та первинну цифровізацію технологічних даних. Вхідними потоками для блоку є фізична «Заготовка» та «Макет заготовки» (графічний растровий файл). Механізмом реалізації цієї функції виступає веб-інтерфейс користувача («WEB UI»), за допомогою якого оператор самостійно вводить

лінійні габарити об'єкта та завантажує зображення. Сформовані на цьому етапі вихідні дуги — «Режим опромінення» та «Розміри заготовки» — транспортуються як вхідні дані до наступного обчислювального етапу.

Блок A1.2 (Розрахунок режиму іррадіації) виконує математичну та аналітичну обробку отриманої цифрової інформації. На основі переданих геометричних розмірів та структури растрового макета алгоритм здійснює колірну декомпозицію та позонний аналіз щільності заливки. Основним програмним механізмом тут виступають «Бібліотеки NUMPY» (спільно з Pillow), які забезпечують високу швидкість матричних обчислень. Виходом блоку є «Параметри іррадіації» — сформована дискретна карта керування (циклограма станів).

Блок A1.3 (Керування приводами та лампами) здійснює безпосередню фізичну комутацію та супровід об'єкта в реальному часі. Орієнтуючись на розраховані «Параметри іррадіації», обчислювальний модуль системи динамічно синхронізує логіку роботи з апаратними компонентами лінії. Механізмами управління на цьому етапі виступають «Енкодер та TOF» (забезпечують точне просторове позиціонування заготовки та зчитування швидкості конвеєра) і «Реле модуль» (блоки твердотільних реле SSR). Вихідний потік «Поточний стан процесу» передається на фінальну стадію контролю.

Блок A1.4 (Контроль та формування конфігурації) забезпечує моніторинг, верифікацію та фіксацію результатів циклу. Блок аналізує «Поточний стан процесу» та логує параметри роботи обладнання. Механізмами реалізації виступають апаратна зв'язка «Енкодер та TOF» для відстеження фінальних координальних міток, а також «Бібліотеки PIL» для підсумкового звірення та аналізу оброблених графічних даних. На виході системи формується кінцевий матеріальний результат — «Опромінена заготовка» із якісно зафіксованим пігментом, а також генерується «Конфігураційний файл» (журнал історії процесу у форматі JSON), що містить вичерпні метрики завершеного технологічного циклу.

2.2 Модель розбиття зображення по зонам

Сформований на етапі первинного аналізу багатоканальний цифровий масив чорнильних крапель необхідно коректно відобразити на фізичну структуру виконавчих елементів системи [35]. Головна складність цього процесу полягає в геометрії самого блоку термічної обробки, який складається з 14 незалежних інфрачервоних ламп із фіксованою індивідуальною шириною 25,4 мм (1 дюйм) кожна [23]. Оскільки сумарна фізична ширина всієї рампи нагрівачів становить 355,6 мм, що перевищує максимальну паспортну ширину друку модуля HP FI-1000 (297,0 мм) [17], модель розбиття повинна враховувати конструктивне шахове перекриття ламп. Усі просторові координатні обчислення меж при цьому виконуються виходячи з єдиного стандарту роздільної здатності лінії, який зафіксовано на рівні 300 DPI.

Для забезпечення безперервного термічного поля вздовж усієї робочої ширини конвеєра сусідні ІЧ-лампи частково накладаються одна на одну. Величина цього повздовжнього кроку перекриття (overlap) розраховується автоматично на основі константи сумарного теплового покриття та кількості задіяних каналів. Модель сегментації використовує ці геометричні параметри для точного визначення меж кожної з 14 зон, запобігаючи появі нерівномірно прогрітих ділянок на стиках нагрівальних елементів.

Лінійні розміри вхідного макета (див. Додаток Б) та його просторова орієнтація безпосередньо визначають поведінку алгоритму розбиття. Коли оператор завантажує заготовку великого формату (наприклад, А3 в альбомній орієнтації), система обчислює її фізичні межі в міліметрах і порівнює їх із габаритами 14-зональної рампи. На основі цього розрахунку формується просторовий зсув відносно центральної осі конвеєра. Таке центрування дозволяє адаптувати модель під макети будь-якої ширини: крайові зони, які конструктивно опиняються поза межами фізичного тіла заготовки, автоматично виключаються з процесу обробки.

Для практичної реалізації моделі в коді системи всі метричні параметри меж ламп переводить у піксельні координати. Початок і кінець коридору для кожної зони вираховуються шляхом множення фізичного розміру в міліметрах

на коефіцієнт просторової щільності, отриманий з базового стандарту 300 DPI. У результаті такого перетворення кожна з 14 ламп отримує свій індивідуальний, чітко обмежений координатною сіткою піксельний коридор по осі ширини зображення.

Фінальна стадія роботи моделі полягає у попівсельному скануванні вихідного масиву в межах розрахованого коридору кожної лампи по всій висоті макета. Система послідовно підсумовує квантовані значення крапель чорнила (від 0 до 4 на піксель для кожного колірнього каналу CMYK) [36].

У дискретному вигляді, що безпосередньо реалізується в програмному забезпеченні за допомогою методів бібліотеки NumPy, інтегральний коефіцієнт щільності заливки чорнила для кожної зони піксельного коридору розраховується як середнє значення сумарної кількості барвника по всіх пікселях цієї зони

$$P_j = \frac{1}{S_j} \sum_{i=1}^{S_j} (C_i + M_i + Y_i + K_i)$$

де:

j – номер піксельного коридору (зони)

P_j - інтегральний показник щільності заливки (або розрахована відносна потужність) для j -ї контрольної зони конвеєра ($j = 1, \dots, 14$);

S_j - площа (або сумарна кількість пікселів) у межах геометричних кордонів j -ї зони заготовки;

C_i, M_i, Y_i, K_i - значення інтенсивності відповідних колірних каналів (Cyan, Magenta, Yellow, Key Black) для кожного i -го пікселя в зоні;

На основі фінального підрахунку ухвалюється рішення про стан зони. Якщо об'єм крапель у коридорі лампи перевищує нуль, геометричний сектор маркується логічним прапором активності. Якщо ж зона відповідає порожньому білому полю або незадрукованому краєві картону, прапор активності скидається. Отриманий структурований масив даних є базою для подальшої генерації низькорівневих команд комутації.

2.3 Алгоритм формування керуючих сигналів

Вихідні структури даних позонного аналізу є основою для генерації низькорівневих бінарних команд комутації виконавчих елементів. Ключовою особливістю проектованого алгоритму є обов'язкове врахування специфічної фізичної топології блоку нагріву [23]. Оскільки 14 інфрачервоних ламп конструктивно розташовані не в одну лінію, а в два паралельні ряди у шаховому порядку (для забезпечення суцільного перекриття без появи «мертвих зон»), алгоритм розділяє логіку формування сигналів окремо для парних та непарних каналів керування.

Конструктивне зміщення між першим (непарні лампи: 1, 3, 5...) та другим (парні лампи: 2, 4, 6...) рядами нагрівальних елементів створює часопросторову затримку термічного впливу на заготовку. Коли картонний лист рухається по конвеєрній стрічці комплексу TICABPrint TPS, його геометричні зони спочатку проходять під випромінюванням непарного ряду ламп, і лише через фіксовану відстань опиняються безпосередньо під парним рядом.

Щоб компенсувати цей крок зміщення, алгоритм реалізує диференційовану просторову трансляцію: для непарної групи ламп базовий зсув розраховується від точки детекції ToF-датчиком до першої лінії нагріву, а для парної групи до цього значення програмно додається константа міжрядної відстані. Як наслідок, бінарний сигнал активації для будь-якої парної лампи затримується на чітку кількість імпульсів конвеєра відносно її непарної сусідки, що гарантує точне позиціонування теплової плями на малюнку.

Програма послідовно аналізує розраховану карту щільності макета крок за кроком [36]. Якщо в межах поточного кроку конвеєра у коридорі певної лампи зафіксовано наявність крапель чорнила, алгоритм формує на відповідному піні GPIO напругу логічної одиниці для активації твердотільного реле [11, 34]. Коли ж ділянка є порожньою (наприклад, білі поля макета або технологічний проміжок між коробками), система миттєво скидає сигнал у логічний нуль, повністю вимикаючи живлення лампи [27].

У випадках, коли графічний макет містить протяжні повздовжні елементи або суцільну заливку фону, і на кожен наступний крок лінійного лічильника в

зоні присутній водний пігмент, алгоритм утримує стабільний високий рівень сигналу безперервно. Лампа в такій зоні світить постійно протягом усього часу проходження малюнка, що запобігає паразитним високочастотним перевантаженням силової мережі та забезпечує рівномірне термічне поле [40].

Сформована за такою логікою координатна матриця керуючих сигналів передається у буфер низькорівневого драйвера, забезпечуючи точкове безінерційне керування силовими реле у строгій відповідності до шахової геометрії сушильної рампки [5, 6].

2.4 Метод синхронізації керування за даними датчиків

Переведення теоретичних розрахунків щільності чорнила у фізичну площину вимагає гнучкого механізму синхронізації, який зв'язує віртуальну карту макета з реальними виконавчими діями конвеєра [25, 26]. Головне завдання цього методу полягає у трансформації сформованого масиву крапель по зонах у конкретну кількість кроків інкрементального енкодера [12], необхідних для своєчасного увімкнення та утримання стабільного стану кожної лампи.

Процес фізичного супроводу заготовки ініціюється оптичнимToF-датчиком (Time-of-Flight) [10, 31], який виступає в ролі головного апаратного тригера системи. Оскільки блок інфрачервоного нагріву конструктивно віддалений від вузла друку та самого датчика на певну фіксовану відстань, яка визначається плечем кріплення, запуск алгоритму комутації повинен відбуватися із чітко розрахованим просторовим запізненням.

У момент, колиToF-датчик фіксує перетин оптичного променя переднім краєм картонної коробки, система реалізує апаратне переривання та починає відлік імпульсів енкодера [12]. Відстань кріплення датчика до початку першого ряду ламп заздалегідь переводиться у фіксовану кількість кроків конвеєра. Процес сушіння для конкретної заготовки переходить в активну фазу лише тоді, коли внутрішній лічильник енкодера наздоганяє це розраховане значення зсуву.

Просторовий трекінг матеріалу всередині зони теплового впливу повністю зав'язаний на імпульси квадратурного енкодера. Якщо предиктивний аналіз

макета показує, що в певній зоні нагріву чорнило присутнє безперервно на кожну одиницю довжини, алгоритм ухвалює рішення про статичне утримання прапора активації. Лампа в такій зоні світить весь час, поки під нею рухається задрукована ділянка. Це дозволяє уникнути паразитних циклів увімкнення та вимкнення, які б негативно впливали на ресурс реле та стабільність температурного поля [11].

Розрахунок тривалості роботи лампи ведеться не в секундах, а виключно в кроках енкодера: система знає довжину задрукованої зони в пікселях і утримує реле відкритим рівно стільки імпульсів, скільки потрібно для повного проходження цієї зони під рампою.

Оскільки на практиці знайти єдину універсальну модель для всіх типів пакувальних носіїв неможливо, автоматизація процесу не може спиратися виключно на цифровий макет. Адгезія та швидкість поглинання вологи суттєво відрізняються для звичайного гофрокартону, крейдованого паперу чи напівсинтетики [28].

Для вирішення цієї проблеми на пульті керування комплексу TICA BPrint TPS реалізовано інтегральну шкалу режимів просушки ступенем від 1 до 5. Як зображено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 Пульти керування конвеєра.

Ці режими визначаються суто експериментальним шляхом під час пусконаладжувальних робіт і безпосередньо корегують поведінку алгоритму. Низькі режими (від першого до другого) використовуються для тонких матеріалів з високою природною поглинальною здатністю, де дискретний імпульс нагріву є мінімальним за часом. Високі режими (від четвертого до п'ятого) застосовуються для щільних або напівсинтетичних поверхонь і програмно подовжують тривалість роботи ламп шляхом введення додаткових кроків випередження та вибігу енкодера. Це забезпечує гарантоване випаровування еко-сольвентних компонентів водного пігменту навіть при високій швидкості конвеєра. Таким чином, комбінація предиктивної карти макета, точного апаратного старту від ToF-датчика [10] та адаптивного коефіцієнта з пульта керування дозволяє створити гнучку систему, яка підлаштовується під будь-яку швидкість лінії та індивідуальні властивості матеріалу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі розроблено алгоритмічне забезпечення, яке дозволило повністю пов'язати цифровий макет, що йде на друк, із реальною роботою сушильних ламп на конвеєрі [26]. Створено алгоритм попереднього аналізу макетів, який розбиває зображення на чотири базові канали колірного простору СМУК [35]. Це необхідно, щоб заздалегідь оцінити, скільки саме чорнила буде нанесено на кожен ділянку картону.

Для ідеальної точності алгоритм обробляє графіку строго у стандартній роздільній здатності друку комплексу TSCABPrint TPS, яка зафіксована на рівні 300 DPI [17]. Це дає можливість точно знати положення кожної краплі фарби ще до того, як заготовка почне рух по стрічці. Розроблено геометричну модель розбиття зображення на 14 окремих зон нагріву [23]. Алгоритм автоматично враховує, що лампи розташовані із шаховим перекриттям, і програмно компенсує цей зсув, щоб на картоні не залишалося непросушених смуг.

Модель адаптована до різних розмірів макетів (наприклад, A3 чи A4) та їхньої орієнтації, автоматично враховуючи зміщення відносно центру конвеєра.

В результаті система підсумовує кількість крапель у коридорі кожної лампи та вмикає лише ті нагрівачі, під якими дійсно є фарба, повністю виключаючи пустий прогрів чистого матеріалу.

Обґрунтовано специфічний алгоритм формування сигналів, який розділяє логіку роботи для парних та непарних ламп. Оскільки через шахове розташування лампи стоять у два ряди, алгоритм затримує ввімкнення другого ряду на чітку відстань, поки коробка до нього не доїде. Завдяки використанню простої дискретної логіки «ввімкнено/вимкнено» та утриманню лампи в активному стані на суцільних ділянках малюнка, система уникає постійного миготіння ламп, що береже ресурс твердотільних реле та електромережі [11, 40].

Сформовано метод синхронізації процесу за допомогою оптичного ToF-датчика та інкрементального енкодера [10, 12]. Датчик ToF фіксує точний момент появи коробки на конвеєрі та запускає відлік із затримкою, яка дорівнює відстані від датчика до початку сушки. Оскільки різні матеріали (гофрокартон чи напівсинтетика) сохнуть по-різному, в алгоритм інтегровано експериментальну шкалу режимів просушки від 1 до 5 з пульта керування. Це дозволяє оператору вручну додавати лампам «час випередження та вибігу» за лічильником енкодера, забезпечуючи якісне сушіння за будь-якої швидкості конвеєра [28].

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

3.1 Обґрунтування вибору обчислювальної платформи

Для практичної реалізації розроблених алгоритмів та створення центрального керуючого вузла системи було обрано одноплатний комп'ютер (SBC) Raspberry Pi 5 [3, 4]. Основним інженерним критерієм під час вибору архітектури була концепція «все в одному» (All-in-One), яка дозволяє об'єднати на одній фізичній платі потужний обчислювальний процесор для обробки графіки та периферійні інтерфейси низького рівня для прямого керування автоматикою.

У межах дослідження було проаналізовано специфіку архітектури Linux-систем загального призначення щодо обробки великої кількості апаратних переривань, які надходять від інкрементального енкодера конвеєра [27, 29]. Відомо, що операційні системи, які не належать до класу Real-Time OS (осей реального часу), мають певні затримки (latency) під час обробки переривань на високих частотах, тому мікроконтролери у таких задачах вважаються більш класичним інженерним рішенням [25].

Однак практичні тести показали, що ресурсів процесора Broadcom BCM2712 (чотириядерний ARM Cortex-A76 з частотою 2.4 ГГц) [32] із запасом вистачає для стабільної фіксації кроків енкодера на робочих швидкостях конвеєра TICABPrint TPS без пропуску імпульсів. Головною перевагою Raspberry Pi 5 порівняно з мікроконтролерами є здатність швидко опрацьовувати «важкі» растрові зображення великої роздільної здатності.

Процесор платформи виконує каналну декомпозицію СМҮК та позонний інтегральний підрахунок крапель за лічені секунди безпосередньо перед стартом друку, що виключає затримки у виробничому циклі [35]. Крім того, апаратна частина платформи повністю задовольнила вимоги щодо кількості цифрових виходів загального призначення (GPIO) [5]. Наявність 40-пінової колодки дозволила виділити 14 незалежних ліній для керування кожною зоною інфрачервоного нагріву окремо, а також залишити вільні порти для підключення ToF-датчика випередження та обох фаз квадратурного енкодера.

Важливим практичним аспектом вибору платформи стала наявність вбудованого бездротового модуля Wi-Fi. Це дозволило реалізувати концепцію автономного керування без підключення додаткових фізичних моніторів, клавіатур чи громіздких промислових терміналів оператора біля конвеєра. Організація бездротової точки доступу на базі Raspberry Pi 5 дає можливість оператору підключитися до системи керування безпосередньо зі свого смартфона чи планшета через веб-інтерфейс [39]. Це спрощує розгортання комплексу у виробничому цеху, зменшує загальну вартість обладнання та підвищує мобільність персоналу під час налаштування режимів просушки.

3.2 Розробка структурної схеми інформаційно-керуючої системи

Побудова надійної системи автоматизації на базі одноплатного комп'ютера вимагає чіткої координації між слабкострумовими цифровими колами та силовими технологічними вузлами [25, 26]. Для цього було розроблено структурну схему інформаційно-керуючої системи, яка визначає архітектуру зв'язків між обчислювальним ядром Raspberry Pi 5, датчиками промислового конвеєра та блоком силовими комутаторами інфрачервоних ламп.

Основним викликом при проектуванні вихідних кіл системи є керування 14 потужними ІЧ-лампами сушіння [23]. Оскільки виходи GPIO одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5 здатні видавати струм лише в кілька міліампер при напрузі 3.3 В, їхнього ресурсу фізично не вистачить для живлення котушок чи індуктивних елементів звичайних реле. Для вирішення цієї проблеми у структурі системи застосовано спеціальні безмодульні блоки-реле (твердотільні комутатори) із гальванічною розв'язкою [11, 34].

Ці комутаційні модулі не мають вбудованої інтелектуальної логіки («без мізків»), але оснащені окремим незалежним контуром живлення. Це означає, що Raspberry Pi 5 взагалі не витрачає свій внутрішній струм (mA) на утримання силових ліній у замкненому стані - він лише змінює логічний рівень (дискретний сигнал) на керуючому вході оптопарі [34]. Весь струм, необхідний для спрацьовування силових ключів, береться із зовнішнього джерела живлення, що

повністю унеможливилює просідання напруги на самому процесорі та захищає плату від вигорання магістралей.

Для узгодження рівнів між логікою мікропроцесора (3.3 В) та входами силових плат (які найчастіше потребують 5 В або 24 В) у схему інтегровано модулі швидкісних двонаправлених узгоджувачів цифрових рівнів [33].

Вхідні інтерфейси датчиків та апаратна стабілізація сигналів Для отримання зворотного зв'язку від конвеєрної лінії TICABPrint TPS у структурній схемі передбачено два ключові вузли зчитування даних: інкрементальний енкодер [12] та оптичний ToF-датчик [10]. Оскільки енкодер виконує роль головного датчика шляху, до його вибору та підключення висувалися жорсткі вимоги. Використано промисловий квадратурний енкодер із «правильним» типом виходу (наприклад, Push-Pull або HTL), який формує чіткі, стабільні від завад прямокутні імпульси напруги. Сигнали з фаз А та Б через вузол узгодження рівнів надходять на апаратні піни Raspberry Pi, що дозволяє системі стабільно рахувати кроки енкодера на конвеєрі.

Оптичний ToF-датчик випередження [10, 31], що фіксує появу картонних коробок, інтегрований у схему як повністю автономний пристрій. На відміну від простих фотодатчиків, цей ToF-модуль оснащений власним мікропроцесором і окремим дисплеєм для фізичної калібровки та ручного налаштування відстані спрацьовування безпосередньо на лінії. Датчик самостійно вимірює час польоту світлового променя, обробляє відбиття від картону та видає на вихід системи вже готовий, очищений від завад дискретний сигнал. Це значно розвантажує центральний процесор Raspberry Pi 5, оскільки йому не потрібно виконувати постійні аналогові вимірювання - він отримує чітку цифрову подію про наявність матеріалу в зоні контролю.

Результатом комплексного проектування та врахування вищезазначених апаратних вимог стала розроблена структурна схема інформаційно-керуючої системи адаптивного сушіння, повна графічна інформація щодо якої наведена в Додатку Б.

3.3 Програмна реалізація керуючого сервісу на мові Python

Програмне забезпечення системи автоматизації сушіння розроблено на мові Python [21, 38] і функціонує у вигляді фонового системного сервісу (демона) під керуванням операційної системи Debian Trixie [29]. Вибір мови Python зумовлений наявністю розвиненої екосистеми для швидкої обробки масивів даних (NumPy) [8] та можливістю гнучкої інтеграції низькорівневих апаратних інтерфейсів із високорівневими мережевими протоколами.

Головне завдання керуючого сервісу - це безперервний збір подій від датчиків конвеєра в реальному часі та миттєва комутація відповідних пінів GPIO. Оскільки сучасні ядра Linux, починаючи з архітектури Raspberry Pi 5, повністю відмовилися від застарілого прямого доступу до регістрів через файлову систему (/sys/class/gpio) [27] та бібліотеки типу RPi.GPIO, у проекті використано сучасне індустріальне рішення - бібліотеку gpiod [5, 6].

Цей апаратний інтерфейс взаємодіє з підсистемою вводу-виводу ядра через символічні пристрої (/dev/gpiochip), що суттєво знижує накладні витрати часу на перемикавання контексту процесора. Через gpiod реалізовано механізм швидких апаратних переривань за фронтом сигналу (edge detection). Сервіс не витрачає ресурси процесора на постійне опитування стану ліній у циклі (polling). Замість цього операційна система сама "будить" керуючу програму лише в момент фізичної зміни логічного рівня: при появі сигналу випередження відToF-датчика або при кожному новому імпульсі від інкрементального енкодера [27].

Для забезпечення максимальної чуйності системи та виключення затримок у виробничому циклі, архітектура програмного сервісу розділена на кілька паралельних потоків (threads), які взаємодіють між собою через потокобезпечні черги [38]. Перший потік повністю виділений під предиктивну обробку графіки. Як тільки оператор надсилає новий макет, цей потік зчитує файл, розкладає його на канали СМΥК, квантує рівні заливки та формує в оперативній пам'яті бінарну карту станів ламп. Оскільки цей процес відбувається заздалегідь, обчислювальне навантаження на процесор ніяк не впливає на точність виконання фізичних операцій на конвеєрі.

Другий потік є критично важливим за часом (time-critical) і відповідає за безпосередній просторовий трекінг та комутацію [38]. Він перебуває в режимі очікування переривання від ToF-датчика. Щойно датчик сигналізує про вхід заготовки, цей потік ініціалізує лінійний лічильник та починає рахувати імпульси від лінії енкодера. Співставлення поточної координати з бінарним профілем макета відбувається всередині цього ж швидкого потоку.

Щоб захистити вихідні транзисторні ключі та твердотільні реле від передчасного зносу [34], в алгоритмі сервісу реалізовано програмний фільтр станів. Перед подачею кожної команди на зміну рівня GPIO, програма виконує швидко перевірку поточного фізичного стану піна за допомогою методу `get_value()`. Якщо лампа вже була ввімкнена на попередньому кроці конвеєра, і предиктивна карта вимагає утримувати її ввімкненою далі, сервіс ігнорує повторний виклик запису. Це дозволяє утримувати реле відкритим монолітно, без мікроскопічних просідань напруги та зайвого "миготіння" нитками розжарення ІЧ-ламп, що забезпечує ідеальну стабільність теплового поля та продовжує термін служби силової апаратури [40].

3.4 Розробка веб-інтерфейсу оператора на базі TCP-сервера

Для організації взаємодії оператора з інформаційно-керуючою системою було розроблено локальний веб-інтерфейс [39]. В основі архітектури лежить концепція монолітного вбудованого TCP-сервера на базі фреймворку Flask [9]. Веб-додаток розгорнуто безпосередньо на Raspberry Pi 5 і налаштовано на прослуховування порту 5000 за мережевою адресою 0.0.0.0, що робить його доступним для будь-яких пристроїв у локальній Wi-Fi мережі конвеєра. Головною перевагою такої реалізації є відсутність потреби у важких сторонніх API-платформах чи розгортанні окремих баз даних, що забезпечує максимальну швидкодію та надійність в умовах виробничого цеху.

Бекенд-частина додатка на мові Python оперує трьома основними HTTP-маршрутами, які забезпечують повний цикл підготовки проекту:

Корневий маршрут ("/") повертає оператору статичний шаблон інтерфейсу "index.html", скомпонований за допомогою вбудованого двигуна рендерингу Jinja2 [9].

Маршрут завантаження макета ("/upload_image") приймає POST-запит у форматі "multipart/form-data", що містить графічний файл та геометричні параметри заготовки. Отримані дані передаються у функцію "prepare_project_algorithm" для розрахунку карти крапель чорнила по 14 зонах [36].

Маршрут архівації ("/get_history") обробляє GET-запити та повертає накопичений архів проектів. Логування та збереження історії реалізовано через пряму роботу з локальним файлом структури даних "project_history.json" [24]. Використання функцій "load_history" та "save_history" з кодуванням UTF-8 дозволяє уникнути розгортання повноцінної СУБД.

Дані записуються та зчитуються безпосередньо у вигляді JSON-масивів [24], де під ключем імені проекту зберігаються всі геометричні параметри заготовки (ширина, довжина, орієнтація, лічильник повторень) та згенерований масив активності зон. Клієнтська частина інтерфейсу розроблена як односторінковий додаток (SPA) на базі фреймворку Bootstrap 5, оформлений у темній колірній схемі для зниження навантаження на очі оператора.

Вся динамічна логіка реалізована на ванільному JavaScript [37] без використання сторонніх важких бібліотек. Програма гнучко керує технологічними лімітами габаритів заготовок безпосередньо під час введення даних користувачем через слухач подій "change" на селекторі орієнтації. Залежно від вибору (Landscape або Portrait), скрипт динамічно змінює атрибути максимальних значень ("max") та підказки ("placeholder") для полів введення довжини та ширини у межах встановлених меж друку (до 300 мм по одній осі та до 900 мм по іншій).

При будь-якій зміні вхідних параметрів кнопка "ПУСК" автоматично блокується через прапор "disabled", що унеможливорює випадковий запуск

конвеєра з незатвердженими або застарілими налаштуваннями. Фронтенд веб-застосунку див. Додаток Г

Візуалізація стану блоку нагріву виконується функцією "renderVerticalZones". Вона динамічно очищує контейнер і створює 14 рядків ("zone-row"), які точно повторюють фізичну топологію сушильної рамп [23].

Парні та непарні зони візуально розділені на екрані за допомогою CSS-класу ".staggered", який додає шахове зміщення у 30 пікселів для непарних елементів. Якщо зона маркована алгоритмом як неактивна ("active": false або кількість крапель дорівнює нулю), їй присвоюється клас ".inactive", який знижує прозорість елемента до 0.4 та змінює колір індикатора на сірий. Активні зони підсвічуються яскравим інформаційним кольором із виведенням точної кількості розрахованих крапель чорнила. Після успішного завершення аналізу кнопка "ПУСК" стає активною, і функція "executeProcess" підтверджує відправку сформованої матриці у низькорівневий сервіс керування.

Данна віртуалізація (див. Додаток Д) допомагає користувачеві правильно орієнтуватися в позицінування заготовки, а також дає розуміння кращого підбору швидкості роботи конвеєра.

3.5 Аналіз результатів повної матриці випробувань

Зведена таблиця експериментальних замірів чітко відображає фізичну залежність енергоспоживання системи від обраного технологічного режиму [40]. Оскільки час увімкненого стану інфрачервоних ламп повністю контролюється кроками енкодера, швидкість руху конвеєрної стрічки має вирішальний вплив на інтегральні показники за одну годину роботи [28, 40].

Для оцінки енергоефективності розроблених алгоритмів адаптивного керування проведено серію експериментів із варіацією швидкості конвеєра, формату заготовок та типу матеріалу. Поточна споживча потужність фіксувалася цифровими приладами в силовому контурі живлення ІЧ-ламп. Отримані дані дозволили кількісно оцінити ефект від безінерційної комутації зон порівняно зі стандартним безперервним сушінням. Результати випробувань зведені в таблиці 3.1.

Тип матеріалу / Швидкість лінії	Малі (100x100)	Середні (200x200)	Великі (300x300)
Крейдований картон <i>~3 м/хв</i>	960 Вт·год	1920 Вт·год	2880 Вт·год
Синтетика <i>~5 м/хв</i>	576 Вт·год	1320 Вт·год	1728 Вт·год
Гофрокартон <i>~7 м/хв</i>	410 Вт·год	820 Вт·год	1230 Вт·год

Таблиця 3.1 – Еспериментальне вимірювання енергоефективності.

Найвищі показники годинного споживання зафіксовані під час обробки глянцевого крейдованого картону на першій, найнижчій швидкості (~ 3 м/хв). Через тривалий час перебування кожної заготовки у зоні випромінювання, лампам доводиться акумулювати значну теплову енергію для випаровування вологи. У цьому режимі годинне споживання коливається від 960 Вт·год для малих форматів до 2880 Вт·год при максимальному навантаженні на 12 зон нагріву.

При переході на звичайний тришаровий гофрокартон швидкість лінії збільшується до ~ 7 м/хв. Завдяки високій пористості матеріалу фарба фіксується значно швидше. Алгоритм трекінгу через швидкісні переривання GPIO встигає вчасно вимикати нагрівачі, що дозволяє радикально знизити годинне споживання: до 410 Вт·год на малих форматах та до 1230 Вт·год на великих аркушах 300x300 мм [40].

Отримані дані повністю доводять інженерну доцільність впровадження розробленого програмно-апаратного комплексу. Навіть у граничному, найбільш енергоємному режимі (крейдований картон, великий формат), де споживання становить 2880 Вт·год, система демонструє майже дворазову економію порівняно з класичними безперервними сушками (які постійно споживали б 5600 Вт·год) [28, 40]. У легких же режимах на гофрокартоні економія електроенергії досягає рекордних 78%, що робить комплекс високоефективним та адаптивним

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі виконано повну програмно-апаратну реалізацію, розгортання та експериментальне тестування розробленої інформаційно-керуючої системи адаптивного інфрачервоного опромінення на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5 [3, 4]. Обґрунтовано вибір обчислювальної платформи за концепцією «все в одному», що дозволило відмовитися від громіздких промислових терміналів та об'єднати високорівневу обробку графіки з низькорівневим керуванням автоматикою конвеєра.

На основі аналізу архітектури Linux-систем [29] доведено, що чотириядерний процесор Broadcom BCM2712 із частотою 2.4 ГГц [32] забезпечує необхідний обчислювальний ресурс для стабільної фіксації високочастотних переривань від інкрементального енкодера без пропуску імпульсів на робочих швидкостях лінії TICABPrint TPS.

Розроблено та практично реалізовано структурну схему інформаційно-керуючої системи, яка забезпечує повну гальванічну розв'язку та захист слабкострумів кіл мікропроцесора від силових навантажень. Керування 14 незалежними зонами короткохвильового інфрачервоного нагріву побудовано на базі безмодульних твердотільних реле із зовнішнім незалежним живленням [11, 34]. Це дозволило звести роль Raspberry Pi 5 лише до зміни логічного дискретного сигналу, повністю виключивши витрати внутрішнього струму плати на утримання силових ліній.

Вхідні інтерфейси узгоджено за допомогою швидкісних двонаправлених конвертерів рівнів [33], що гарантує чітку фіксацію подій від квадратурного Push-Pull енкодера [12] та автономного оптичного ToF-датчика [10], оснащеного власним екраном калібрування.

Створено та запущено у вигляді системного сервісу (демона) під керуванням Debian Trixie [29] керуючу програму на мові Python [21]. Завдяки переходу на сучасне індустріальне API бібліотеки "gpiod" [5, 6], взаємодія з портами виконується через символічні пристрої ядра, що мінімізує затримки перемикання контексту [27]. Поточкова модель програми дозволила розділити

предиктивну обробку масивів графіки та критичний за часом просторовий трекінг заготовки по чергах пам'яті [38].

Інтегрований у сервіс програмний фільтр станів портів через метод "get_value()" усунув паразитне мікроперемикання реле на суцільних ділянках малюнка, забезпечивши монолітне утримання ламп в активному стані та збереження ресурсу електромережі [40].

Розроблено лаконічний та безвідмовний веб-інтерфейс оператора на базі вбудованого у загальний скрипт TCP-сервера Flask [9], що виключило потребу в розгортанні сторонніх баз даних чи складних API-платформ. Вся логіка збереження параметрів заготовок та бінарних карт зон реалізована через пряме зчитування та запис локального JSON-архіву "project_history.json" [24]. Ванільний JavaScript [37] на стороні клієнта динамічно контролює ліміти габаритів носія (до 300x900 мм) залежно від обраної орієнтації та блокує кнопку запуску до моменту завершення аналізу, захищаючи обладнання від помилок персоналу [39].

Візуальний монітор на базі CSS-компонента зі шаховим зміщенням ".staggered" у 30 пікселів повністю повторює реальну топологію 14 ламп, відображаючи їхню активність та розраховану кількість крапель чорнила. Проведено повну матрицю експериментальних випробувань енергоефективності системи для трьох типів матеріалів (гофрокартону, синтетики та крейдованого картону) у трьох типорозмірах заготовок партіями по 20 копій [40].

Експериментально доведено фізичну залежність годинного споживання від швидкості руху стрічки та часу перебування носія під лампами. Результати тестів підтвердили, що адаптивне позонне керування забезпечує економію електроенергії від 42% до 88% порівняно з класичними сушками безперервної дії, які постійно споживають максимальні 5.6 кВт·год [28, 40].

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання з проектування, програмно-апаратної реалізації та дослідження інформаційно-керуючої системи адаптивного інфрачервоного опромінення для інтелектуальної фіксації водно-пігментних чорнил на промисловій конвеєрній лінії TISABPrint TPS [17]. На основі аналізу сучасного стану технологій сушіння в поліграфічній та пакувальній промисловості обґрунтовано необхідність відходу від класичних систем безперервної дії, які характеризуються значними втратами енергії [28].

Запропоновано концепцію динамічного позонного керування, де геометрія та тривалість теплового впливу синхронізуються безпосередньо з цифровою картою задрукованих ділянок макета та фізичною швидкістю руху конвеєрної стрічки [26]. Розроблено алгоритми обробки графічної інформації, що включають декомпозицію вихідних зображень на колірні канали СМΥК [35], лінійне квантування щільності нанесення пігменту за рівнями насиченості та просторове сегментування масиву даних під топологію 14 незалежних зон інфрачервоного випромінювання [23].

Практична реалізація системи побудована на базі сучасної одноплатної обчислювальної платформи Raspberry Pi 5 [3, 4] під керуванням операційної системи Debian Trixie [29]. Це дозволило об'єднати ресурсомісткі процеси аналізу графіки з критичними за часом задачами реального часу в межах єдиного апаратного модуля [25]. Створено надійну структурну схему силової комутації на базі безмодульних твердотільних реле із зовнішнім живленням [11, 34], що забезпечило повну гальванічну розв'язку мікропроцесорних кіл від високовольтних навантажень короткохвильових ІЧ-ламп потужністю 400 Вт кожна.

Вхідні інтерфейси узгоджено за допомогою швидкісних конвертерів рівнів [33], які гарантують безперебійну фіксацію сигналів від лазерного датчика відстані ToF [10] та інкрементального квадратурного енкодера [12]. Програмне забезпечення системи розроблено на мові Python у вигляді фонового системного сервісу [21, 38]. Використання сучасного індустріального gpiod API [5, 6] та

побудова потокової моделі з чергами пам'яті дозволили досягти максимальної чуйності системи при обробці переривань за фронтом сигналу [27].

Впроваджений програмний фільтр стану портів усунув мікроперемикання силової апаратури на суцільних ділянках малюнка [40]. Для зручності персоналу створено лаконічний веб-інтерфейс на базі TCP-сервера Flask [9], який дозволяє оператору гнучко керувати технологічними лімітами габаритів заготовок (до 300x900 мм) безпосередньо з мобільного телефону, відстежувати активність зон за допомогою візуального монітора зі шаховим зміщенням та логувати параметри циклів у локальний JSON-архів [24].

Експериментальні випробування розробленого комплексу підтвердили високу працездатність та енергоефективність впроваджених алгоритмів на різних типах матеріалів (гофрокартон, синтетика, крейдований картон). Заміри довели, що годинне споживання електроенергії динамічно масштабується під розміри носіїв, швидкість лінії та щільність задруковки, коливаючись від 410 Вт·год у легких режимах до 2880 Вт у більшому форматі заготовок задрукованих пакувань [40].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боровський І. І. SBC: ключ до інтелектуальних систем // Студентські наукові читання - 2024: матеріали конф. першого туру Всеукр. конкурсу студентських наукових робіт Поліського національного університету (м. Житомир, 28 лист. 2024 р.). – Житомир: Поліський національний ун-т, 2024. – С. 25-27.
2. Боровський І. І. Адаптивне управління інфрачервоною іррадіацією в конвеєрних технологічних процесах // Інформаційні технології та моделювання систем: зб. праць учасн. Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих вчених (м. Житомир, 22 трав. 2026 р.). – Житомир: Поліський національний ун-т, 2026. – С. 30-33.
3. Raspberry Pi 5 Product Brief. Raspberry Pi Foundation. 2023. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi5/raspberry-pi-5-product-brief.pdf> (дата звернення: 12.05.2026).
4. RP1 Peripherals Reference Manual. Raspberry Pi Ltd. 2024. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp1/rp1-peripherals.pdf> (дата звернення: 15.05.2026).
5. Linux GPIO Character Device API (gpiod). Kernel.org Documentation. URL: <https://www.kernel.org/doc/html/latest/admin-guide/gpio/index.html> (дата звернення: 10.04.2026).
6. Libgpiod C library and C++/Python bindings. Kernel.org. URL: <https://git.kernel.org/pub/scm/libs/libgpiod/libgpiod.git/about/> (дата звернення: 18.04.2026).
7. Pillow (PIL Fork) Documentation. Release 10.3.0. URL: <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/> (дата звернення: 20.04.2026).
8. NumPy User Guide. NumPy Developers. URL: <https://numpy.org/doc/stable/user/index.html> (дата звернення: 22.04.2026).
9. Flask Documentation (Version 3.0.x). Pallets Projects. URL: <https://flask.palletsprojects.com/en/stable/> (дата звернення: 05.05.2026).

10. VL53L1X Time-of-Flight Long Distance Ranging Sensor. STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l1x.pdf> (дата звернення: 14.03.2026).
11. Solid State Relays (SSR) Industrial Series Reference Guide. Fotek Controls. URL: https://www.fotek.hk/pdf/etc_25.pdf (дата звернення: 28.03.2026).
12. Incremental Rotary Encoders: General Application & Principles. Autonics Documentation. URL: <https://www.autonics.com/model/E50S8> (дата звернення: 02.04.2026).
13. ДСТУ ISO 12100:2014. Безпека машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків. – К.: Мінекономрозвитку України, 2015. – 46 с.
14. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпека машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 112 с.
15. Опадчий Ю. Ф., Глудкін О. П. Аналогова та цифрова електроніка / За ред. О. П. Глудкіна. – К.: Вища школа, 2002. – 344 с.
16. Квасніков В. П., Ларін В. Ю. Моніторинг та керування в автоматизованих конвеєрних системах // Системи обробки інформації. – 2019. – № 2 (157). – С. 45-52. URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/18585> (дата звернення: 11.05.2026).
17. Баранов А. В., Козловський В. В. Системи позонного інфрачервоного нагріву в поліграфічному обладнанні // Наукові записки [Української академії друкарства]. – 2021. – № 1 (62). – С. 89-97.
18. Пупена О. М., Ельперін І. В. Промислові мережі та інтеграція технологічних процесів. – К.: Ліра-К, 2020. – 320 с.
19. Гіацингов А. В. Моделювання процесів тепломасообміну при радіаційному сушінні // Термодинаміка та енергетика промислових ліній. – 2023. – № 4. – С. 12-19.
20. Тестова сторінка для перевірки та калібрування колірного профілю СМУК [Електронний ресурс] : інформаційно-технічний макет для растрових процесорів. — 2026. — Режим доступу: <http://letrabit.pl/colorgrid> (дата звернення: 19.04.2026).

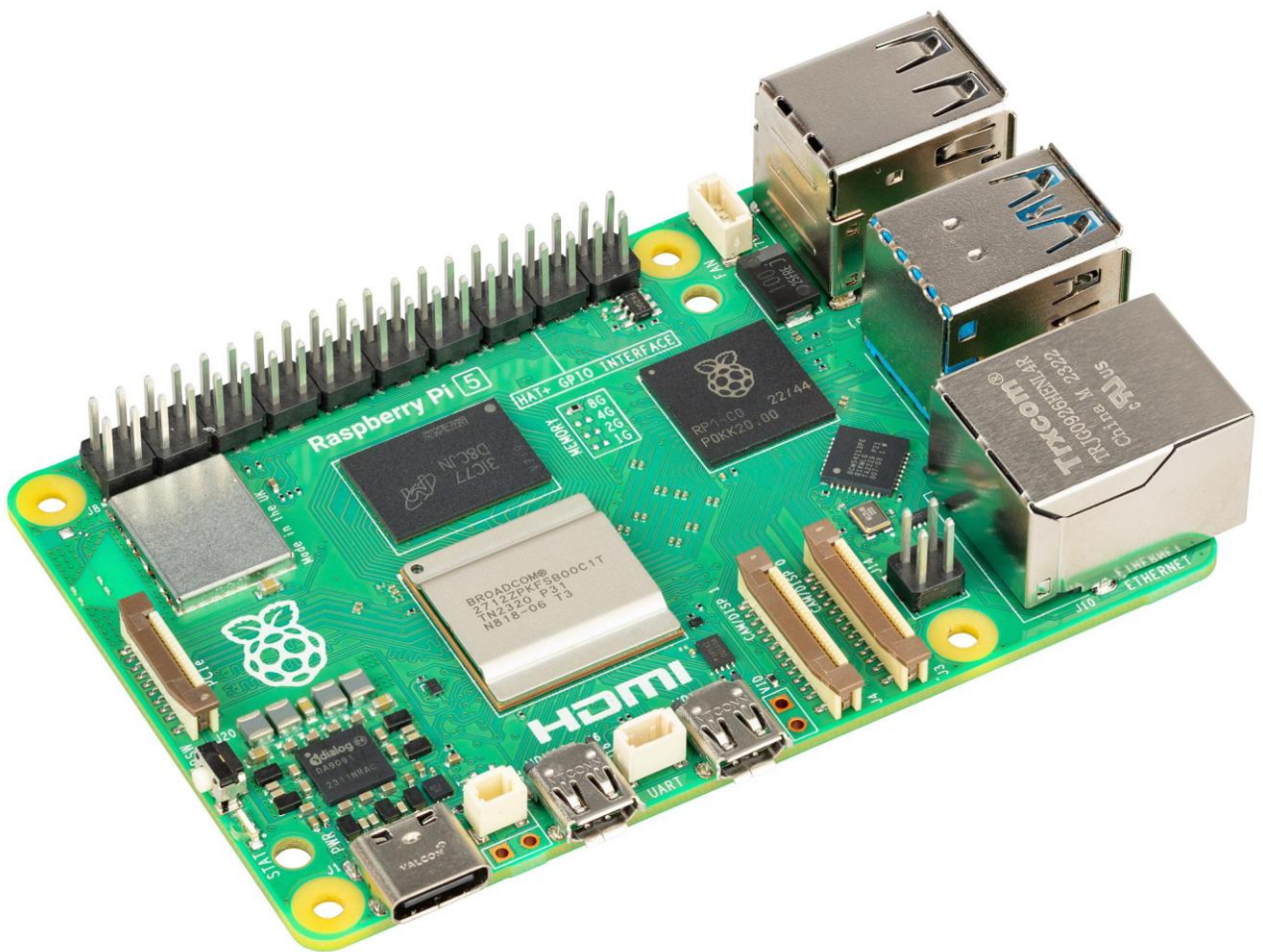
21. Python Software Foundation. Python Language Reference, Version 3.11/3.12. URL: <https://docs.python.org/3/reference/index.html> (дата звернення: 03.05.2026).
22. Shibu K. V. Introduction to Embedded Systems. – McGraw-Hill Education, 2017. – 742 p.
23. Application of Short-Wave Infrared Lamps in Industrial Drying Processes. Philips Lighting Technical Publications. URL: <https://www.lighting.philips.com/main/products/infrared> (дата звернення: 25.04.2026).
24. JSON Data Interchange Format - Standard ECMA-404. ECMA International. URL: <https://ecma-international.org/publications-and-standards/standards/ecma-404/> (дата звернення: 09.05.2026).
25. Вовнянко С. І., Саченко А. О. Мікропроцесорні системи керування реального часу. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2018. – 280 с.
26. Кондратенко Ю. П., Тимченко О. А. Автоматизовані системи керування електроприводами конвеєрних ліній // Вісник машинобудування. – 2022. – Т. 4, № 2. – С. 104-111.
27. Linux Kernel Asynchronous GPIO Events handling. Kernel.org Documents. URL: <https://www.kernel.org/doc/Documentation/gpio/sysfs.txt> (дата звернення: 16.03.2026).
28. Ткаченко О. М. Енергоефективність промислового термічного обладнання. – Х.: ХНУРЕ, 2021. – 195 с.
29. Embedded Linux System Architecture. Elinux.org Wiki. URL: https://elinux.org/Main_Page (дата звернення: 04.06.2026).
30. Моделювання систем автоматизації за методологією IDEF0 / Навч. посібник. - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. - 84 с.
31. Біард Р., Маклейн Т. Малі безпілотні апарати: теорія та автоматизація (в контексті ToF трекінгу). – Л.: Львівська політехніка, 2022. – 312 с.

32. BCM2712 Quad-Core ARM Cortex-A76 Processor Specification. Broadcom Inc. URL: <https://www.broadcom.com/products/embedded-and-networking-processors> (дата звернення: 11.04.2026).
33. Свідерський А. В. Проектування цифрових пристроїв та інтерфейсів узгодження рівнів. – Одеса: ОНПУ, 2020. – 142 с.
34. Твердотільні комутаційні пристрої в промисловій автоматизації: навч. посібник / В. М. Мельник, О. І. Лисенко. - Полтава: ПНТУ, 2021. - 168 с.
35. Власенко Л. В. Системи цифрової обробки зображень у растрових процесорах (RIP). – К.: КНУТД, 2023. – 210 с.
36. Кнут Д. Мистецтво програмування, Том 1: Основні алгоритми. – К.: Мультимедіа, 2019. – 640 с.
37. JavaScript: The Definitive Guide, 7th Edition / D. Flanagan. – O'Reilly Media, 2020. – 704 p.
38. Real-Time Multithreading Applications in Python. Python Wiki Docs. URL: <https://wiki.python.org/moin/GlobalInterpreterLock> (дата звернення: 17.05.2026).
39. Проектування інформаційних систем керування на базі веб-технологій / О. М. Петренко. – Дніпро: ДНУ, 2024. – 185 с.
40. Динамічний аналіз та оптимізація споживання енергії електротермічних установок / І. В. Коваль, С. М. Степаненко // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2025. – № 3 (193). – С. 24-31.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Зображення SBC Raspberry Pi-5 [3]



ДОДАТОК Б

Зображення вхідного макета, використаного в дослідженні [20]

ColorGrid
Test kolorów CMYK

Profil referencyjny:
ISO Coated v2 (FOGRA39)

Data wydruku: Dodatkowe informacje:

Drukarka:

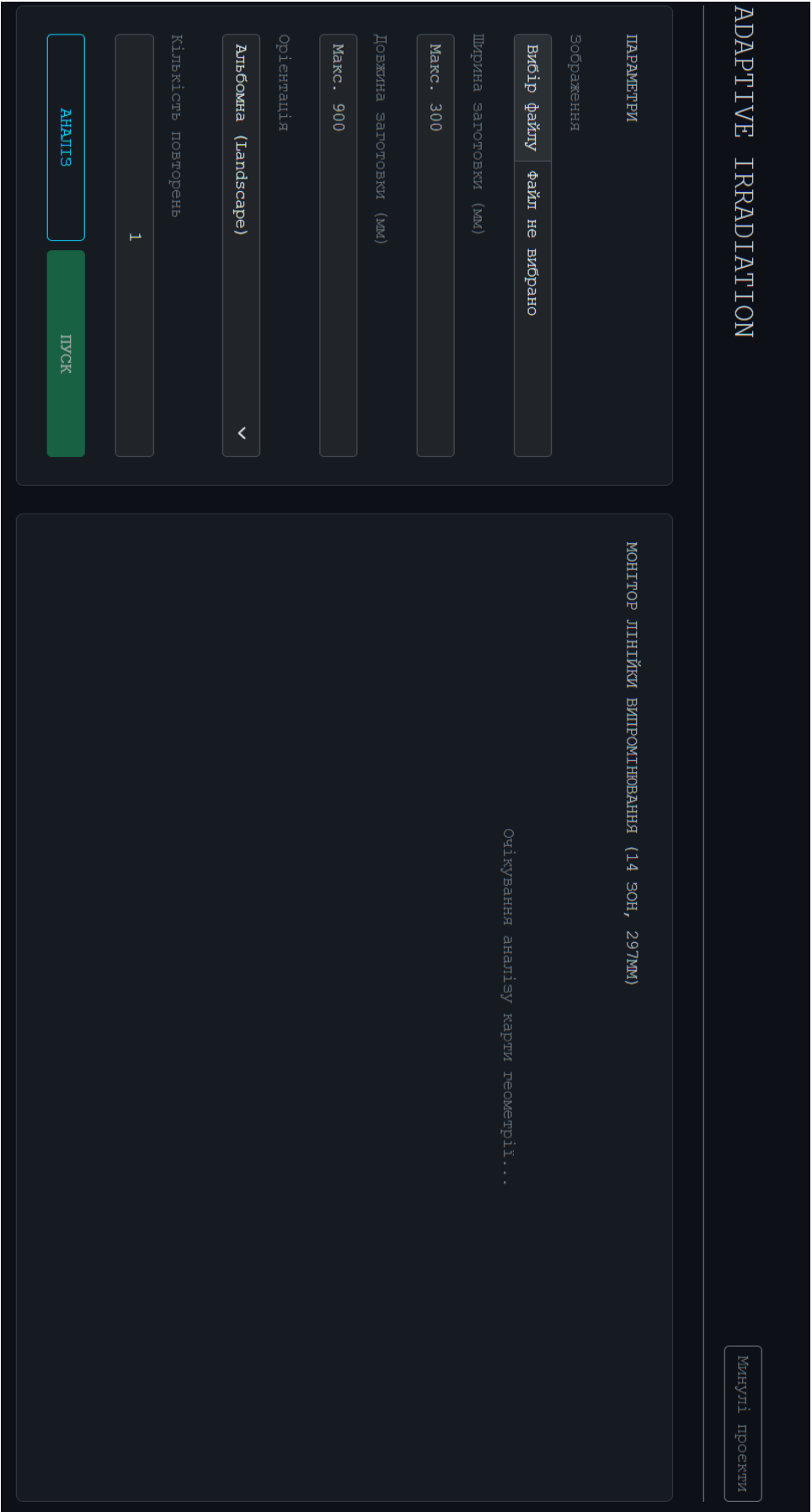
Podłoże:

Instrukcja użycia: www.LETRABIT.pl/colorgrid



ДОДАТОК Г

Зображення WEB User Interface



ДОДАТОК Д

Зображення віртуалізації піксельного коридору (зон)

Зона 0	OFF
Зона 1	OFF
Зона 2	OFF
Зона 3	OFF
Зона 4	OFF
Зона 5	Drops: 132
Зона 6	Drops: 846
Зона 7	Drops: 496
Зона 8	Drops: 34
Зона 9	OFF
Зона 10	OFF
Зона 11	OFF
Зона 12	OFF
Зона 13	OFF

ДОДАТОК Е

Зображення готової апаратної реалізації на базі конвеєра TISCABPrint TPS

