

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-  
КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ОЛЕЙНІКОВ ІВАН АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 004.89:681.5:004.77

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОД ТА МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО  
КЕРУВАННЯ 3D-ДРУКОМ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ**

123 «Комп'ютерна інженерія»

12 «Інформаційні технології»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_  
І.А. Олейніков

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

**Аронов Андрій Олексійович**

кандидат технічних наук

Київ 2025

## АНОТАЦІЯ

Олейніков І. А. Метод та модель інтелектуального автоматизованого керування 3D-друком на основі машинного навчання. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» (галузь знань 12 «Інформаційні технології»). Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2025.

Роботу присвячено підвищенню надійності та якості FDM/FFF-3D-друку шляхом розроблення методу та моделі інтелектуального автоматизованого керування, що спираються на мультимодальний моніторинг і глибинні моделі комп'ютерного зору. Побутовий та напівпромисловий FDM-принтер розглянуто як багатоконтурний технічний об'єкт із відкритими інтерфейсами, у якому штатні засоби контролю здебільшого обмежуються пороговими перевірками та оцінюванням готового виробу. Показано, що за таких умов значна частка дефектів виявляється лише після завершення тривалого циклу друку, що зумовлює втрати матеріалу, часу та електроенергії.

Актуальність дослідження визначається поширенням FDM-технологій у прототипуванні, малосерійному виробництві та освіті за високої чутливості процесу до відхилень режимів, стану механіки, властивостей філаменту й умов експлуатації. Запропоновано розв'язувати проблему шляхом побудови автоматизованого наглядного контуру, що використовує відеопотік підвищеної роздільної здатності, телеметрію приводів і термоконтурів та моделі глибинного навчання класу ResNet, розгорнуті на вбудованій платформі Raspberry Pi 5 на краю мережі.

Метою роботи є створення та експериментальне обґрунтування методу і моделі інтелектуального автоматизованого керування FDM-друком на основі мультимодального моніторингу та моделей ResNet, які забезпечують своєчасне виявлення дрібномасштабних дефектів, формування ризикоорієнтованих керувальних дій і дотримання часових обмежень контурів керування за умов обмежених ресурсів Raspberry Pi 5. Для досягнення мети розроблено узагальнену

архітектуру комплексу, що поєднує відеопідсистему, конвеєр попереднього оброблення та підготовки тензорів, модуль оцінювання ризику, блок політик втручання та засоби інтеграції з прошивками Marlin і Klipper через стандартизовані інтерфейси передавання команд і даних.

Наукова новизна полягає в удосконаленні моделі інтелектуального наглядового контролю процесу FDM-друку, яка реалізує каскад тригерного виявлення, уточнювальної верифікації та адаптивної дії з урахуванням поточного ризику технологічних відхилень. Запропоновано формалізований ризикоорієнтований підхід, за яким оцінки візуального стану, телеметрії та контексту G-коду відображаються в скалярні індикатори ризику і узгоджуються з політиками «м'яких» та «жорстких» дій із гістерезисом і підтвердженням. Розвинено модель мультисенсорної інтеграції відеосигналів і технічної телеметрії для підвищення стійкості до змін освітлення, матеріалів і кінематичних конфігурацій принтера. Сформовано спеціалізований корпус даних для задач автоматизованого контролю FDM-друку, що відображає нерівномірний розподіл ризиків у просторі побудови та часі й містить дрібномасштабні дефекти, зокрема локальні провисання, ниткоутворення, деламінацію, «спагеті»-структури та мікрозсуви шарів. Запропоновано принцип вибірки з урахуванням ризику та удосконалено протоколи розмітки на основі поєднання кадрових міток, рамок детекції, піксельних масок і часових позначок розвитку дефектів.

Розроблено архітектурні модифікації моделей ResNet для виявлення дрібних дефектів FDM-друку на основі багатомасштабного декодера ознак та адаптивного аналізу локальних ділянок із підвищеною роздільною здатністю. Обґрунтовано доцільність каскаду, у якому легка модель ResNet-18 виконує швидкий тригерний аналіз, а модифікована ResNet-34 забезпечує уточнену класифікацію та локалізацію дефектів у вибраних областях інтересу. Досліджено вплив квантування, прунінгу та оптимізації конвеєра на точність і латентність інференсу на Raspberry Pi 5 і сформовано рекомендації щодо вибору конфігурацій для режимів поточного та міжшарового аналізу.

Удосконалено метод інтеграції модуля комп'ютерного зору з контурами

керування 3D-принтера шляхом подання політик втручання як системи контекстних правил, що враховують оцінений ризик, тип дефекту, фазу друку та експлуатаційні вимоги. Реалізовано сценарії «м'яких» втручань у вигляді локальних корекцій швидкості, температури та інтенсивності обдуву і сценарії «жорстких» втручань у вигляді паузи з паркуванням голови та контрольованим охолодженням. Показано, що каскадна політика з подвійними порогами зменшує частоту хибних пауз за збереження високої чутливості до небезпечних ситуацій і знижує узагальнену вартість помилки.

Практичне значення результатів полягає у створенні прототипу інформаційної технології інтелектуального автоматизованого керування FDM-друком на базі Raspberry Pi 5 з відкритим програмним стеком. Технологія забезпечує зменшення частки відбракованих виробів, скорочення непродуктивних витрат філаменту та часу, підвищення відтворюваності геометричних характеристик і стабільності термічних режимів. Запропонований комплекс може бути використаний як еталонна платформа для впровадження наглядових систем у парках 3D-принтерів малого та середнього бізнесу, а також як навчальний полігон для підготовки фахівців з інтелектуального керування адитивними технологіями, комп'ютерного зору та інженерії програмного забезпечення на краю мережі. Результати дослідження впроваджено в навчальний процес та апробовано на лабораторних стендах FDM-друку.

Ключові слова: FDM/FFF-3D-друк, інтелектуальне автоматизоване керування, Raspberry Pi 5, ResNet, комп'ютерний зір, машинне навчання, мультимодальна телеметрія, політики втручання, інференс на краю, адитивні технології.

## SUMMARY

Oleinikov I. A. Method and Model of Intelligent Automated Control of 3D Printing Based on Machine Learning. Qualification scientific work as a manuscript. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 123 Computer Engineering (Field of Knowledge 12 Information Technologies). State University of Information and

Communication Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The thesis aims to improve the reliability and quality of FDM/FFF 3D printing by developing a method and a model of intelligent automated control based on multimodal monitoring and deep computer vision models. A consumer and semi-industrial FDM printer with open interfaces is considered as a multi-loop technical system where built-in control is mainly limited to simple threshold checks and inspection of finished parts. Under such conditions, a substantial portion of defects is detected only after a long printing cycle, which results in waste of material, time, and energy.

The relevance of the research is driven by the wide adoption of FDM technologies in prototyping, small-batch manufacturing, and education, along with the high sensitivity of the process to deviations in regimes, mechanical state, filament properties, and operating conditions. The proposed solution is an automated supervisory loop that uses high-resolution video, motion and thermal telemetry, and ResNet-based deep models deployed on a Raspberry Pi 5 edge device and integrated with Marlin and Klipper firmware through standard communication interfaces.

The aim of the thesis is to develop and experimentally justify a method and a model of intelligent automated control of FDM printing based on multimodal monitoring and ResNet models that provide timely detection of small-scale defects, risk-oriented control actions, and compliance with real-time constraints under the limited resources of Raspberry Pi 5. An integrated architecture is designed that combines a video subsystem, preprocessing and tensor preparation pipeline, a risk estimation module, rule-based intervention policies, and mechanisms for safe interaction with printer firmware.

Scientific novelty includes an improved model of intelligent supervisory control that implements a cascade of trigger detection, refined verification, and adaptive actions driven by a current risk estimate. A formal risk-oriented framework is proposed in which visual state, telemetry, and G-code context are mapped to scalar risk indicators and then to soft or hard actions with hysteresis and confirmation. A specialized dataset reflecting the non-uniform risk distribution in build volume and time is formed, together with risk-aware sampling and refined labeling protocols (frame-level labels, detection boxes, pixel-

level masks, and time stamps of defect onset and evolution). ResNet-based architectural modifications with a multi-scale feature decoder and adaptive local analysis are proposed, including a cascade where a lightweight ResNet-18 provides fast triggering and a modified ResNet-34 performs refined classification and localization. The influence of quantization, pruning, and pipeline optimization on inference accuracy and latency on Raspberry Pi 5 is investigated. A method for integrating the vision module with printer control loops is improved by formalizing context-dependent intervention policies and implementing both soft interventions (local corrections of speed, temperature, cooling) and hard interventions (pause with head parking and controlled cooling).

The practical significance lies in the development of an open-stack prototype technology for intelligent automated control of FDM printing on Raspberry Pi 5. The technology reduces scrap rate and waste of filament and time, improves geometry reproducibility, and stabilizes thermal regimes. The system can serve as a reference platform for supervisory control in fleets of 3D printers and as an educational testbed for courses on intelligent control of additive technologies, computer vision, and edge software engineering. The research has been carried out at the State University of Information and Communication Technologies, and the results have been introduced into the educational process and tested on laboratory FDM printing benches.

Keywords: FDM/FFF 3D printing, intelligent automated control, Raspberry Pi 5, ResNet, computer vision, machine learning, multimodal telemetry, intervention policy, edge inference, additive manufacturing.

## Список опублікованих праць за темою дисертації

### Матеріали і тези наукових конференцій

1. Олейніков І. А. Підвищення ефективності процесу управління 3D принтером з використанням машинного навчання // Науково-практична конференція «Проблеми комп'ютерної інженерії» (1 грудня 2023 року). Збірник тез. – К.: ДУІКТ, 2023. – С. 38–39.
2. Олейніков І. А. Процес управління 3D принтером з використанням машинного навчання // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і Світу» (28 листопада 2023 року). Збірник тез. – К.: ДУІКТ, 2023. – С. 168–170.
3. Олейніков Іван, Аронов Андрій. Метод пошуку дефектів 3D-друку на основі моделі RESNET // «Математика. Інформаційні технології. Освіта»: тези доповідей XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (13–15 червня 2025 р.). – Луцьк–Світязь, 2025. – С. 125.
4. Олейніков, І. А., Аронов, А. О. Модель нейромережі, яка використовує комп'ютерний зір для пошуку дефектів 3D-друку. *Тези доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Математика. Інформаційні технології. Освіта»*. – Луцьк–Світязь : Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2024. – С. 147–148

### Статті у наукових фахових виданнях

1. Олейніков, І. А., Бондарчук, А. П., Бажан, Т. О. Застосування методів машинного навчання до управління 3D-принтером. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. – 2024. – № 1. – С. 4–15.
2. Дзюба В. В., Колодюк А. В., Олейніков І. А., Бугайов Д. М. Моделювання згортання білків з використанням методів машинного навчання // *Зв'язок*. 2025. №3. ст. 101–107.
3. Ніщеменко Д.О., Олейніков І.А. Проактивна архітектура керування розумним будинком на основі контекстуальних намірів користувача та

багатоцільової оптимізації // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2025. №3(88). ст. 141–149.

4. Олейніков, І. А., Срібна, Т. В. Розробка методики для пошуку дефектів 3D-друку на основі моделі ResNet. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. – 2025. – № 1. – С. 111–119.

5. Олейніков, І. А., Хорольська, К. В. Експериментальна генерація підтримок на принципах генерації Lightning Infill для 3D-друку. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка* : електронне фахове наукове видання. – 2025. – Т. 1, № 29.

6. Читулян, В., Олейніков, І., Ананченко, О., Дзюба, В. WEB-програмування і мобільна розробка: UX/UI-рішення для захисту персональних даних користувачів. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка* : електронне фахове наукове видання. – 2025. – Т. 2, № 30. – С. 543–554.



## ЗМІСТ

ВСТУП .....	12
РОЗДІЛ I. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ .....	17
1.1 Аналіз конструкції та функціонування 3D-принтера як автоматизованого технічного об'єкта .....	17
1.2 Механічна архітектура та кінематика .....	19
1.3 Аналіз наявного програмного забезпечення та способів його застосування у дослідженні .....	28
1.4 ResNet як базова архітектура контролю зображень.....	32
1.5 Програмне забезпечення та сервіси що вже реалізують ШІ контроль ..	36
1.6 Застосування у цій роботі запропонована схема .....	37
Висновки до розділу 1 .....	46
РОЗДІЛ II. МАШИННЕ НАВЧАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ 3D-ДРУКУ .....	48
2.1. Огляд методів машинного навчання .....	48
2.2. Класифікація зображень FDM-друку .....	51
2.3. Стратегії навчання моделей .....	57
2.4. Робастність та узагальнюваність нейромережевої моделі.....	62
2.5. Удосконалення методів машинного навчання для контролю роботи 3D- принтера .....	65
2.6. Адаптація архітектур під дрібні дефекти .....	69
2.7. Навчання моделей та забезпечення узагальнюваності.....	72
2.8. Інтеграція з контуром керування та оптимізація під Raspberry Pi 5 .....	77
2.9. Алгоритми роботи 3D-принтера у контурі керування.....	85
2.10. Темпоральна логіка втручання на основі ШІ модуля.....	92
Висновки до розділу 2 .....	96
РОЗДІЛ III. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ .....	97
3.1. Розробка програмного забезпечення та налаштування роботи 3D- принтера .....	97
3.2. Вимоги до апаратури системи контролю 3D друку.....	103
3.3. Оцінювання використання апаратних ресурсів центрального процесора та оперативної пам'яті .....	110
3.4 Підсумкові висновки щодо вибору Raspberry Pi 5 як хост рівня .....	113
3.5. Базове програмне середовище хоста.....	114
3.6. Склад програмних модулів.....	117
3.7. Інтеграція з прошивкою принтера.....	119

3.8. Веб інтерфейс і програмний інтерфейс доступу. Політики втручання .....	121
3.9. Профілі телеметрії .....	131
3.10. Безперервність роботи та відновлення .....	135
3.11. Захист хоста Raspberry Pi 5 .....	140
3.12. Безпека доступу та спостережуваність комплексу керування.....	142
3.13. Методика налаштування.....	145
3.14. Інтегроване налаштування програмно апаратного комплексу .....	149
3.15. Аналіз типових збоїв відеотракту та інформаційного контуру .....	151
3.16. Випробування інтелектуального комплексу та приймальні критерії	154
3.17. Набори даних та сценарії випробувань .....	158
3.18. Узагальнені критерії приймання інтелектуального комплексу .....	159
3.19. Спостерігачі стану та узгодження каналів руху й екструзії .....	160
3.20. Інтеграція модуля штучного інтелекту в замкнений наглядний контур .....	165
3.21 Технічні аспекти інференсу на Raspberry Pi 5.....	167
3.22 Експлуатаційна автоматизація спостережності, відновлення, резервування .....	170
3.23. Роботизація завершення друку .....	171
3.24. Безперервна валідація та тестування .....	173
3.25. Автоматизація робочих сценаріїв.....	178
3.26. Експериментальні дослідження.....	179
3.27. Метрики та критерії успіху .....	187
3.28. Експерименти з аналізу внеску компонентів .....	192
3.29 Статистичний аналіз .....	194
3.30 Оцінювання часових, енергетичних та ресурсних характеристик комплексу на вбудованій платформі.....	195
3.31. Наукові результати та їх практичне значення .....	202
Перший науковий результат. Удосконалена модель інтелектуального наглядового контролю FDM-друку.....	202
Другий науковий результат. Метод інтелектуального автоматизованого керування процесом 3D-друку .....	206
Третій науковий результат. Модель адаптивного вибору керувальних рішень у процесі 3D-друку .....	208
Висновки до розділу 3 .....	222
ВИСНОВКИ.....	223

	11
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	226
Додаток А. Акти впровадження.....	236

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Інтенсивне поширення технологій FDM/FFF-друку у швидкому прототипуванні, малосерійному виробництві, освітніх і прикладних інженерних застосуваннях супроводжується зростанням вимог до відтворюваності геометричних і механічних характеристик виробів, технологічної безпечності, а також економного використання матеріалів і енергетичних ресурсів. Процес пошарового формування виробу наплавленням термопласту є багатоконтурним: якість результату визначається узгодженою роботою кінематичної системи переміщення, екструзії, термоконтурів, алгоритмів керування та умов експлуатації. Навіть незначні відхилення температури, подачі філаменту, стану механіки, якості електроживлення або параметрів охолодження здатні спричиняти дефекти, що швидко розвиваються та накопичуються упродовж друку.

Разом із тим, аналіз практики експлуатації побутових і напівпромислових 3D-принтерів з відкритими прошивками засвідчує наявність низки невирішених проблем, які обмежують керованість процесу. По-перше, штатні засоби контролю здебільшого зводяться до порогових перевірок параметрів та базових алгоритмів стабілізації температури, тоді як дефекти формування виробу часто виявляються запізно — після суттєвих витрат часу та матеріалу або навіть після завершення друку. По-друге, значний обсяг потенційно інформативних даних (відеопотік з робочої зони, телеметрія приводів, термоконтурів, інколи вібраційні сигнали) залишається недостатньо задіяним у контурі прийняття рішень, а отже не формує повноцінного наглядового зворотного зв'язку. По-третє, практичне впровадження інтелектуального нагляду потребує узгодження вимог функціональної безпечності з часовими обмеженнями «кадр → дія» та з ресурсними обмеженнями обчислювальних платформ класу Raspberry Pi 5, що ускладнює пряме перенесення важких моделей комп'ютерного зору у реальний виробничий процес. Отже, актуальність дослідження визначається необхідністю створення узгодженого методу та моделі інтелектуального автоматизованого керування FDM/FFF-друком, здатних забезпечувати своєчасне виявлення дрібномасштабних дефектів, формування безпечних ризик-орієнтованих керувальних дій і зниження частки

браку за умов обчислень на краю мережі та підвищених вимог до спостережуваності й надійності.

Таким чином, створення та експериментальне обґрунтування методу і моделі інтелектуального автоматизованого керування FDM/FFF-друком на основі мультимодального моніторингу та моделей глибинного навчання, які забезпечують своєчасне виявлення дефектів, ризик-орієнтоване формування керувальних дій і дотримання часових та ресурсних обмежень контуру керування, є актуальним науково-прикладним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота була виконана в рамках науково-дослідної роботи кафедри Технологій цифрового розвитку Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій на тему "Підвищення ефективності процесу управління 3D принтером з використанням методів машинного навчання" (Державний реєстраційний номер РК 0124U001849).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення надійності та якості процесу FDM/FFF-3D-друку шляхом створення узгодженого інтелектуального наглядного контуру керування, який інтегрує мультимодальний моніторинг стану процесу, моделі глибинного навчання для раннього виявлення дефектів та формалізовані політики безпечних керувальних втручань в умовах невизначеності, обмежених обчислювальних ресурсів і жорстких часових вимог.

Для досягнення поставленої мети розв'язано взаємопов'язані задачі:

1. Виконано аналіз конструкції, кінематики, електроніки та програмного забезпечення FDM/FFF-принтера як багатоконтурного об'єкта керування з ідентифікацією типових джерел дефектів і ризиків.
2. Узагальнено сучасні підходи машинного навчання для контролю 3D-друку та визначено їхні обмеження щодо польових умов і розгортання на вбудованих платформах.
3. Сформовано спеціалізований корпус даних і протоколи розмітки для виявлення та локалізації дрібномасштабних дефектів із урахуванням нерівномірного розподілу ризиків у часі та просторі побудови.

4. Розроблено архітектурні модифікації моделей класу ResNet та супутні конвеєри обробки даних, орієнтовані на підвищену чутливість до локальних аномалій і роботу в режимі, наближеному до реального часу.

5. Побудовано формалізовану модель інтелектуального наглядного контуру, у якій оцінки стану та ризику узгоджуються з правилами безпечних втручань і механізмами стійкості рішень у часі.

6. Розроблено інформаційну технологію та програмно-апаратний комплекс із засобами інтеграції з прошивками Marlin і Klipper.

7. Проведено експериментальну верифікацію запропонованих рішень на лабораторних стендах друку з оцінюванням якості, часових і ресурсних характеристик.

**Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження є процес FDM/FFF-3D-друку як багатоконтурний технічний процес адитивного виробництва з відкритими інтерфейсами керування та спостереження, у якому поєднуються координатні, екструзійні, теплові та наглядові підсистеми.

**Предмет дослідження.** Предметом дослідження є методи, моделі та програмно-апаратні засоби інтелектуального автоматизованого керування FDM/FFF-друком на основі глибинних архітектур комп'ютерного зору, мультимодального моніторингу, оцінювання ризику дефектів і політик втручання у контури керування 3D-принтера.

**Методи дослідження.** У роботі застосовано методи системного аналізу та теорії автоматичного керування для формалізації структури принтера і наглядного контуру; елементи теорії ймовірностей, математичної статистики та теорії ризику для побудови показників якості, невизначеності й вартості помилки; методи машинного та глибинного навчання для синтезу і навчання моделей класу ResNet та пов'язаних конвеєрів обробки даних; методи цифрової обробки сигналів і зображень для виділення ознак із відео та телеметрії; методи імітаційного та натурного експерименту для верифікації запропонованих рішень на прототипі інформаційної технології.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Удосконалена модель інтелектуального наглядного контролю процесу 3D-друку, яка, на відміну від відомих, використовує каскадну структуру детекції та верифікації дефектів на основі глибинних моделей машинного навчання, що дозволяє формувати високоточні оцінки стану та визначати ймовірність дефектів у реальному часі. Запропонована модель забезпечує інтелектуальне відстеження критичних відхилень і підвищує достовірність прийняття рішень в автоматизованих системах FDM/FFF-друку.

2. Розроблено метод інтелектуального автоматизованого керування процесом 3D-друку, наукова новизна якого полягає у використанні динамічної політики втручання, що базується на оцінці ризику та результатах машинного навчання, що забезпечує адаптивну зміну параметрів друку відповідно до ідентифікованих аномалій. Запропонований метод дає можливість зменшити частку відбракованих виробів, підвищити технологічну відтворюваність і забезпечити безпечне втручання у процес формування шарів у режимі реального часу.

3. Набула подальшого розвитку модель мультисенсорної інтеграції інформації про стан технологічного процесу, яка, на відміну від традиційних локальних підходів, поєднує візуальну, температурну, координатну та телеметричну інформацію в єдиній вимірювальній структурі та використовує методи машинного навчання для удосконаленої локалізації джерел дефектів. Це забезпечує реалізацію інтелектуальних циклів корекції та уточнення параметрів друку на основі комплексних даних у системах автоматизованого керування.

**Практичне значення одержаних результатів.** Удосконалена модель інтелектуального наглядного контролю процесу 3D-друку завдяки використанню машинного навчання для автоматичного визначення та верифікації технологічних відхилень дозволяє забезпечити більш точну діагностику стану обладнання та своєчасне виявлення потенційної дефектності, що сприяє мінімізації технологічних ризиків та підвищенню якості друку у промислових і навчально-лабораторних умовах.

2. Розроблений метод інтелектуального автоматизованого керування 3D-друком на основі динамічної політики втручання, сформованої за результатами

аналізу аномалій, дає можливість адаптивно коригувати параметри друку та запобігати поширенню дефектів у режимі реального часу, забезпечуючи стабільність технологічного процесу та підвищуючи відтворюваність отриманих виробів.

3. Запропонована модель мультисенсорної інтеграції інформації про стан технологічного процесу, яка об'єднує візуальні, температурні, координатні та телеметричні показники на базі методів машинного навчання, дає змогу оперативно локалізувати джерела появи технологічних аномалій та обґрунтовано змінювати параметри друку, забезпечуючи підвищення надійності та безпечності функціонування 3D-друкувального обладнання.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 31 рисунок, 38 таблиць та 5 сторінок додатків. Список використаних джерел налічує 91 найменування. Загальний обсяг дисертації становить 238 сторінок, з них 221 сторінка основного тексту.



## РОЗДІЛ I. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

### 1.1 Аналіз конструкції та функціонування 3D-принтера як автоматизованого технічного об'єкта

3D-принтер з технологією FDM або FFF розглядається як автоматизований технічний об'єкт адитивного виробництва, що перетворює цифрову модель на фізичний виріб шляхом послідовного нашарування розплавленого термопласту. Філамент у гарячому кінці нагрівається до вязкопластичного стану, далі крізь сопло подається на платформу або на попередній шар, охолоджується та твердне, формуючи шов [1].

Функціонально машина поєднує механіку високоточного позиціонування, теплові процеси плавлення і кристалізації, підсистеми керування подачею матеріалу та охолодженням, а також сенсорні канали, що відображають стан вузлів [2]. Блок керування інтерпретує G-код, формує траєкторії з обмеженнями швидкості, прискорення і ривку, синхронізує переміщення з екструзією, підтримує температурні режими сопла і платформи [3]. Утворюється ієрархія контурів керування, де верхній рівень задає маршрути і профілі руху, координатний рівень відтворює положення та подачу, фізичний рівень забезпечує тепловий і адгезійний стан шва. Усі ці рівні чутливі до зміни властивостей матеріалу, стану механіки та впливу навколишнього середовища.

Узагальнена структурна схема FDM або FFF 3D-принтера як об'єкта керування включає підсистему слайсера та генерації G-коду, планувальник рухів, контури приводів, теплові контури гарячого кінця і платформи, сенсорні канали та наглядову підсистему аналізу якості [4]. На такій схемі видно шлях інформації від цифрової моделі до виконавчих вузлів, а також зворотні зв'язки від сенсорів до контролера і алгоритмів аналізу [5]. Саме на цю структурну схему доцільно надалі посилатися під час опису окремих модулів системи. Узагальнений вигляд взаємодії підсистем подано на рисунку.

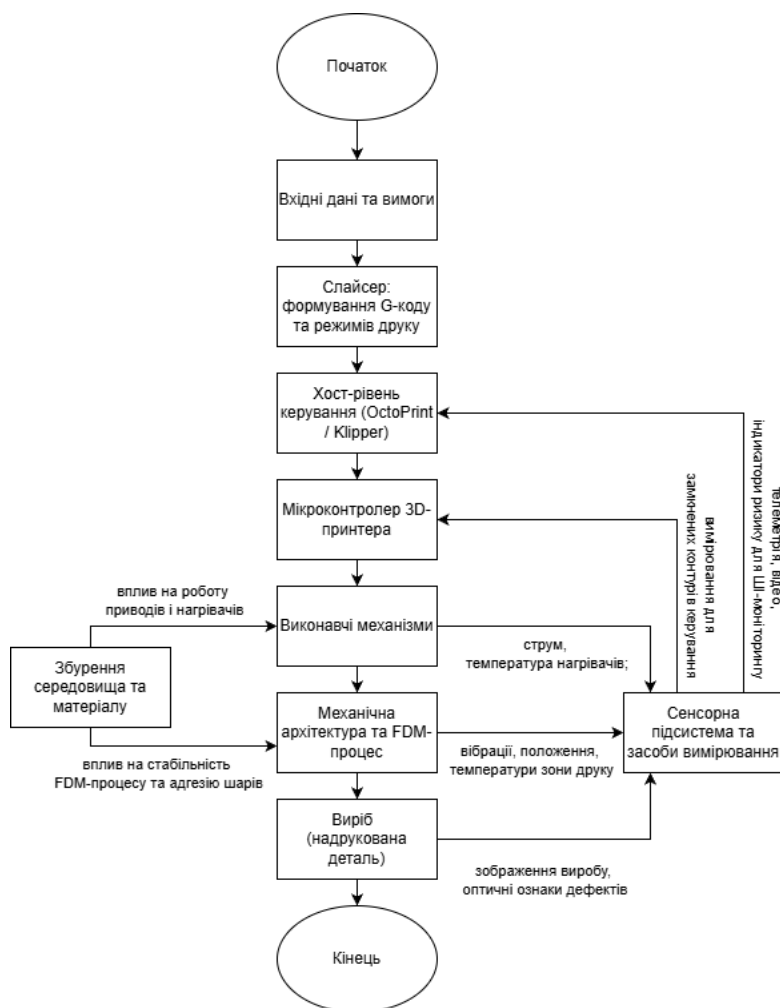


Рис. 1.1. Узагальнена структурна схема FDM або FFF 3D-принтера як автоматизованого об'єкта керування

Процес друку принципово залежить від умов, які неможливо задати один раз і більше не змінювати. Вологість філаменту впливає на пористість і міцність виробу, діаметр та овальність нитки відрізняються між партіями, барвники і технологічні добавки змінюють реологію розплаву [6]. Температурні режими сопла і платформи визначають міжшарову адгезію, стабільність перших шарів та усадку виробу. Швидкість, прискорення і інтенсивність охолодження впливають на ширину, форму і стабільність шва [7]. Для термополіуретану з підвищеною вязкістю і стисливістю тракту особливо важливі знижені швидкості, підвищені температури та індивідуально підібрана витрата, інакше неминучі пропуски подачі, зажовування філаменту та переекструзія. Жоден набір параметрів не є універсальним, тому

кожна конфігурація принтера, гарячого кінця, сопла і матеріалу потребує власного налаштування, що з часом втрачає актуальність через знос і варіації партій [8].

До технологічних чинників додається людський і апаратний фактор. Забуте сушіння, помилкові температури після швидкої зміни матеріалу, випадкові зміни роздільної здатності слайсера, дефекти філаменту, старіння ременів, напрямних, сопел і датчиків, збої контролера, драйверів та інтерфейсів зв'язку, короточасні провали напруги живлення створюють широкий спектр ризиків [9]. Навіть добре налаштована механіка не компенсує помилки у стратегії підтримок або в параметрах перших шарів та мостів, які задаються ще на етапі формування G-коду [10].

Отже, 3D-принтер як об'єкт керування доцільно розглядати не лише через номінальну модель, а через множину невизначеностей матеріалу, середовища і апаратної частини. Керувальні дії мають узгоджуватися з реологією розплаву, динамікою приводів і теплоперенесенням, а сама система повинна містити сенсори та наглядові алгоритми, здатні виявляти аномалії у режимі, наближеному до реального часу, підтримувати оператора або автоматично ініціювати захисні дії. Це обґрунтовує подальшу увагу до розширеного візуального, теплового і вібраційного моніторингу, методів машинного навчання для раннього виявлення дефектів та політик безпеки у мережевому керуванні [11].

## **1.2 Механічна архітектура та кінематика**

Механічна частина 3D-принтера охоплює раму, напрямні, приводи, екструзійний тракт і платформу побудови. Цей комплекс забезпечує відтворення просторової траєкторії інструмента та стабільність шва. Якість поверхні залежить не лише від температури і подачі, а також від жорсткості конструкції, точності геометрії, відсутності люфтів і правильності калібрування. Навіть невеликі пружні деформації ременів, перекося напрямних або коливання рами породжують хвилястість стінок, регулярні пояси за висотою та мікроссуви шарів, які оператор часто помилково приписує виключно налаштуванням слайсера [12].

У декартових принтерах з рухомим столом по осі Y значна маса платформи спричиняє інерційні коливання під час розгону та гальмування. На поверхні це проявляється як примарні контури біля різких ребер і характерний рельєф на довгих прямолінійних стінках. Такі артефакти зменшують завдяки підвищенню жорсткості рами, коректному натягу ременів, зваженому вибору прискорень і швидкостей. Приводи типу CoreXY зменшують рухому масу, оскільки двигуни закріплені на рамі, однак висуюють суворі вимоги до симетрії ремінних контурів і співвідношенні шківів [13]. Неправильний натяг або перекося шківів призводять до анізотропних спотворень геометрії, що добре помітні на колах та діагоналях. Принтери з дельта-кінематикою мають дуже легкий руханий вузол і плавні профілі прискорень, проте є надзвичайно чутливими до точності геометричної калібровки, тому навіть невеликі похибки довжин тяг чи паралельності напрямних трансформуються у систематичні відхилення по всьому полю друку [14].

Вертикальна вісь формує окремий клас дефектів. Кривизна гвинта, децентрування муфти чи перекося гайки відносно напрямних спричиняють явище типу Z-wobble з періодичними смугами по висоті [15]. Люфт або пружність підйомного вузла призводить до нерівномірного кроку по висоті, коли шар укладається трохи вище або нижче номіналу і утворює тонкі сходинки. Такі дефекти не усуваються корекцією температур або швидкостей і потребують саме механічного втручання.

Механіка екструзії визначає точність подачі матеріалу. У конфігурації direct drive філамент проходить короткий тракт, що полегшує керування ретракціями та друком еластомерів, проте збільшує масу каретки та підвищує чутливість до коливань на розворотах. У варіанті Bowden рухома маса менша, однак довгий еластичний канал працює як пружний елемент, який накопичує і віддає тиск із запізненням, що сприяє появі ниток пластику, локальних недоекструзій і запізненого наростання тиску [16]. Неправильно налаштований притиск подаючого ролика викликає або прослизання і просідання шва, або деформацію філаменту і періодичні заклинювання. Раптовий зсув моделі по осях X чи Y зазвичай свідчить

про проскок зубця ременя, недостатній затиск шківа або підклинювання ролика в певному діапазоні переміщення.

Таким чином, характер візуальних дефектів безпосередньо пов'язаний з механічними причинами. Регулярні пояси, примарні контури, хвилястість, ступеневі зсуви шарів формують типовий набір зображувальних патернів. Для систем візуального контролю ці патерни є інформативними ознаками, які дають змогу не лише виявляти брак, а й локалізувати джерело відхилення у конкретному вузлі конструкції, що безпосередньо пов'язує механічну архітектуру з подальшим синтезом алгоритмів машинного навчання для діагностики [17].

Приводи, виконавчі механізми, сенсори та електроніка 3D принтера. Рух у технологіях FDM або FFF забезпечують координатні приводи та теплові виконавчі елементи, які працюють узгоджено з електронікою та програмним забезпеченням. На лінійних осях зазвичай застосовують двофазні крокові двигуни з мікрокрокуванням. Точність позиціонування визначають фазний струм, жорсткість кінематичного ланцюга та тип передавальних елементів. Занизький струм спричиняє втрату кроків під час розгону й гальмування, завищений призводить до перегріву, спрацьовування захисту драйверів і раптових зсувів шарів [18].

Кожну вісь розглядають як ланку, у якій положення накопичується через послідовні прирости, що залежать від швидкості, а сама швидкість визначається вибраним профілем прискорення та ривку. Тому надто різкі зміни профілю неминуче викликають механічні коливання, резонанси та погіршення якості поверхні. Граничні значення швидкості, прискорення та ривку задають з урахуванням моменту двигунів і жорсткості конструкції, щоб уникнути пропусків кроків і надмірних вібрацій [19].

Кутовий рух двигунів перетворюють на лінійне переміщення ремінні або гвинтові передачі. Ремінний привід забезпечує високі швидкості та малу рухому масу, проте вимагає коректного натягу. Недостатній натяг призводить до проскоку зубців і зсувів шарів, надмірний збільшує тертя, навантаження на підшипники та нагрів приводів. Гвинтові пари дають стабільніший крок, але чутливі до втрати

співвідності. Навіть незначний ексцентриситет формує періодичні хвилі на стінках, які майже не усуваються зміною режимів друку [20].

Екструдер утворює окремий канал подачі філаменту. У конфігурації *direct drive* шлях від шестерні до зони плавлення є коротким, тому команда на подачу швидко перетворюється на зміну тиску у гарячому кінці. Це підвищує точність ретракцій і спрощує друк еластомерів, але збільшує масу каретки та чутливість до коливань. У конфігурації *Bowden* двигун розміщують на рамі, рухома маса зменшується, зате довгий канал поводить як пружний елемент [21]. Тиск змінюється із запізненням, що дає нитки пластику, локальні недоекструзії та помітну залежність якості від налаштувань ретракцій і швидкісних режимів.

Щоб компенсувати інерційно в'язкі властивості тракту подачі, екструзію узгоджують з динамікою руху інструмента. Номінальну подачу, отриману з геометрії траєкторії, доповнюють випереджувальними поправками, які враховують миттєву швидкість та прискорення [22]. Під час розгону подача збільшується завчасно, щоб тиск у гарячому кінці встиг зрости до початку довгих ліній. Під час гальмування подачу зменшують раніше, щоб уникнути розширення шва в кінці доріжки. Значення випереджувальних коефіцієнтів підбирають експериментально для кожного матеріалу й тракту подачі, оскільки їх надмірне збільшення так само призводить до переекструзії.

Теплові виконавці гарячого кінця та платформи утворюють окремі контури регулювання. Гарячий кінець має малу теплову інерцію й швидко реагує на зміну потужності, подачу філаменту та обдув, натомість нагрівна платформа є масивним елементом зі значною сталою часу [23]. Для практичних налаштувань вважають, що гарячий кінець описується простою моделлю з одним домінуючим часом реакції і невеликим запізненням, а платформа має щонайменше дві характерні складові, швидко і повільно. Параметри таких наближених моделей отримують експериментально та використовують під час налаштування регуляторів, щоб уникнути як затягнутого виходу на режим, так і коливань температури.

Сенсорна підсистема перетворює принтер на об'єкт із вимірюваними станами. До базових засобів належать датчики температури гарячого кінця та платформи,

кінцеві вимикачі, сенсори нульового положення, детектори закінчення філаменту та іноді енкодери подачі. У розширеному варіанті застосовують акселерометри, мікрофони, тензодатчики, вагові модулі, камери видимого спектра та тепловізійні камери[24]. Кожен сенсор задає власний канал перетворення фізичної величини на цифровий сигнал із притаманними похибками та шумом, тому виміряні значення розглядають як непряму проєкцію реального стану.

Термодатчики типу термісторів мають нелінійну залежність опору від температури, яку апроксимують відомими аналітичними виразами з трьома калібрувальними коефіцієнтами [25]. Неправильно вибрані коефіцієнти або таблиця відповідності створюють сталу похибку в усьому робочому діапазоні, отже реальна температура може суттєво відрізнитися від показів прошивки.

Результати автонівелювання платформи інтерпретують як карту висот, що задає уточнення координати по осі  $Z$  залежно від положення у площині друку. Контролер у реальному часі додає цю поправку до командного значення, завдяки чому сопло зберігає потрібний зазор навіть за невеликої нерівності столу [26]. Якість карти визначають точність вимірювань та коректність інтерполяції між опорними точками.

Сигнали камер, акселерометрів, мікрофонів і телеметрія з приводів утворюють часові послідовності з корисними даними й випадковими сплесками. Щоб зменшити вплив одиничних артефактів, скалярні індикатори ризику згладжують рекурентними правилами. Нове значення індикатора обчислюють як зважене поєднання поточного виміру та попереднього згладженого значення [27]. Більша вага поточного виміру підвищує чутливість до швидких подій, менша вага робить індикатор інерційним і стійким до короткочасних відхилень.

Для узгодження інформації з різних сенсорів застосовують фільтри стану. У випадку близької до лінійної динаміки використовують коректор типу Калмана, який поєднує прогноз моделі з новими вимірами [28]. Прогноз стану формують за математичною моделлю принтера, потім коригують за різницею між очікуваним і фактичним вектором вимірів з вагами, що враховують співвідношення дисперсій

шумів моделі та сенсорів. Такий підхід дозволяє одночасно згладжувати шум, оцінювати приховані змінні та зменшувати вплив поодиноких аномальних вимірів.

Електроніка принтера організована як ієрархія хост система - мікроконтролер - виконавчі вузли та сенсори. Мікроконтролер архітектур AVR, ARM або RISC V інтерпретує потік команд G коду, планує рух, генерує імпульси для крокових двигунів, керує нагрівачами та вентиляторами. Хост рівень реалізують у вигляді середовищ з веб інтерфейсом, наприклад OctoPrint або Klipper, які забезпечують мережевий доступ, керування чергою завдань, збір телеметрії та синхронізацію відео [29].

Траєкторний планувальник перетворює ламану послідовність відрізків G коду на безперервний у часі профіль руху, який не перевищує допустимі значення швидкості, прискорення і ривку. На стиках відрізків вводять згладжування у вигляді заокруглення або невеликого допуску на відхилення від ідеальної траєкторії. Це зменшує збудження власних частот рами. Для подальшого приглушення резонансів застосовують вхідні шейпери, що формують керувальний сигнал так, щоб енергія збудження на критичних частотах була мінімальною [30].

Термоконтури сопла й платформи стабілізують регуляторами пропорційно інтегрально диференціального типу з обмеженням швидкості наростання потужності та захистом від інтегрального насичення. Пропорційна частина забезпечує швидку реакцію на поточну похибку, інтегральна зменшує сталий відхил температури, диференціальна пригнічує різкі зміни. Під час тривалого насичення інтегральну складову штучно обмежують, а після виходу у робочу область поступово зменшують, щоб уникнути перерегулювання [31].

Комунікаційний стек містить інтерфейси USB, UART, SPI для обміну між хостом і мікроконтролером, а також протоколи HTTP, WebSocket, MQTT для віддаленого керування та потокової телеметрії [32]. У прошивках типу Klipper значна частина обчислень виконується на хості, який формує точні часові мітки для кроків, а мікроконтролер лише детерміновано їх відпрацьовує. У прошивках типу Marlin основна логіка зосереджена на мікроконтролері, тому особливо важливі частота переривань і розмір буферів.



Масова витрата матеріалу пов'язана з густиною полімеру, діаметром філаменту та лінійною швидкістю подачі. Будь-яка помилка у калібруванні екструдера безпосередньо перетворюється на недоекструзію або переекструзію, змінює реальну ширину і висоту шва та форму профілю доріжок. Для кількісної оцінки загальної якості друку вводять інтегральний критерій, який об'єднує геометричні відхилення, стабільність температурних режимів та частоту серйозних збоїв [33]. Завдання налаштування полягає у мінімізації цього критерію за умови дотримання апаратних і технологічних обмежень.

Узагальнюючи, приводи, екструзія, сенсорика, термоконтури та програмно алгоритмічне забезпечення формують багатоконтурну систему керування. Її узгоджена робота є основою для подальшого впровадження інтелектуальних наглядових модулів, які зменшують ймовірність браку та підвищують відтворюваність процесу друку [34].

Надійність, безпека та наглядовий контроль. Надійність 3D принтера визначається здатністю завчасно виявляти небезпечні відхилення, зменшувати їх наслідки та переводити установку у безпечний стан. До типових небезпечних подій належать термічний розгін і перегрів, розрив або коротке замикання термодатчика, втрата живлення чи зв'язку з хостом, заклинювання осей, пропуски кроків, обрив або клин філаменту [35]. Для інженерної оцінки ризику використовують показник, який зростає із збільшенням імовірності події та тяжкості наслідків. Зменшення ризику досягають одночасним зниженням імовірності завдяки ранній детекції та зниженням тяжкості завдяки швидкому відключенню, паркуванню виконавчих вузлів і локалізації аварійної зони.

Термозахист гарячого кінця та платформи реалізують на апаратному і програмному рівнях. Апаратний рівень утворюють термозапобіжники й плавкі вставки у силових колах нагрівачів, які фізично переривають ланцюг за надмірного перегріву. Програмний рівень реалізує мікроконтролер, що безперервно оцінює темп зміни температури та досяжність уставок [36]. Якщо температура у заданому часовому вікні не зростає з мінімально допустимою швидкістю, ситуацію трактують як обрив датчика, деградацію нагрівача або поганий контакт і негайно

відключають силову частину. Додатково контролюють досяжність цільової температури за граничний час. Якщо уставка не досягнута, система переходить у безпечний стан із вимкненими нагрівачами, паркуванням головки поза моделлю та фіксацією інциденту.

Розрив або коротке замикання термодатчика виявляють за виходом вимірюного опору чи напруги за межі допустимого діапазону [37]. У такому випадку мікроконтролер блокує подальшу подачу потужності на відповідний канал, зберігає код помилки та вимагає сервісної перевірки. Захист силовій електроніки доповнюють контролем струму транзисторів, що керують нагрівачами. Перевищення порогового значення трактують як коротке замикання або пробій ізоляції, після чого живлення каналу негайно відсікають і блокують повторне вмикання.

Зв'язок з хост системою та працездатність прошивки контролюють апаратні й програмні сторожові таймери [38]. Якщо протягом дозволеного інтервалу не надходять сигнали життєдіяльності або нові команди, приводи координат плавно гальмують, головку паркують у безпечній зоні, нагрівачі та подача філаменту вимикаються, а у журналі подій фіксують факт втрати зв'язку. Це запобігає ситуаціям, коли приводи продовжують рух за застарілими командами після зависання хоста чи контролера.

Заклинювання осей та пропуски кроків виявляють за непрямыми індикаторами. Аналізують раптові зміни споживаного струму драйверів, рівень вібрацій, акустичний фон, а також розбіжність між командною та фактичною подачею філаменту за даними енкодера [39]. Якщо відхилення між командною і вимірюною швидкістю подачі тривалий час перевищує порогове значення, тракт подачі вважають несправним, друк переводять у контрольовану паузу, головку паркують, а температуру вузлів знижують за безпечним профілем.

Процедури паркування та відновлення друку визначають послідовність дій у разі збою чи планового вимкнення. Під час паркування головку відводять у заздалегідь визначену безпечну зону, подачу філаменту зупиняють, температуру сопла і платформи зменшують до рівнів, які не спричиняють коксування полімеру

й не руйнують адгезію. Для можливого відновлення система зберігає журнал виконаних шарів, позицію у файлі G коду, контрольну суму вхідного файлу, а також стан термоконтурів і приводів[40]. Перед рестартом перевіряють цілісність файлу, стан шару, до якого планують повернутися, якість адгезії деталі та коректність координати по осі Z. Якщо хоча б одна умова не виконується, автоматичне відновлення забороняють і рекомендують повторний старт завдання.

Енергетична безпека за зникнення живлення потребує резервного джерела енергії, якого достатньо для виконання мінімального набору дій [41]. До такого набору належать паркування головки у безпечну зону, запис службової інформації, первинне охолодження гарячого кінця, платформи та силової електроніки. Якщо доступний енергетичний запас менший за необхідний, функцію відновлення друку після зникнення живлення не активують, система виконує тільки грубе вимкнення без претензії на збереження деталі.

Кібербезпеку та цілісність комунікацій забезпечують захищені протоколи із шифруванням і автентифікацією, а також контроль цілісності файлів G коду та профілів налаштувань [42]. Для цього обчислюють і перевіряють контрольні суми або інші теги цілісності. У разі невідповідності сесію переривають, інцидент реєструють, а повторний доступ дозволяють лише після успішної автентифікації.

Запобігання прихованій деградації вузлів базується на регулярних самотестах і довготривалому моніторингу. Оцінюють дрейф показів термодатчиків, натяг ременів, характер смугастості за віссю Z, ефективність охолодження, зміни резонансних частот, струми приводів, а також стан поверхні виробу за даними камер. Для компактного подання результатів формують агрегований індекс технічного стану як зважену суму нормованих діагностичних ознак [43]. Перевищення індексом заданого порога інтерпретують як сигнал про потребу у плановому технічному обслуговуванні до виникнення критичної відмови.

Наглядовий рівень безпеки використовує багатоканальний сенсорний синтез температур, струмів, вібраційних та акустичних сигналів, показів енкодерів, відеоспостереження та термографії. До класичних порогових правил дедалі частіше додають моделі машинного навчання. Згорткові нейронні мережі типу ResNet та

візуальні трансформери аналізують відеопотоки, згорткові та рекурентні моделі обробляють спектрограми вібрацій і шумів, а регресійні моделі виконують роль м'яких сенсорів для оцінки тиску у гарячому кінці, фактичної ширини шва та ефективної висоти шару [44].

Нормальний режим друку часто описують автоенкодерами, які навчають відтворювати типову поведінку системи [45]. Якщо похибка реконструкції поточного стану перевищує встановлений поріг, ситуацію розглядають як аномалію та ініціюють або корекцію режимів, або переведення процесу у безпечну паузу. Оскільки ресурси краєвих обчислювальних пристроїв є обмеженими, інференцію таких моделей виконують поза високопріоритетними перериваннями планувальника і терморегуляторів, а час прийняття рішення обмежують тривалістю мікросегмента траєкторії та часом формування одного шару.

У підсумку поєднання класичних контурів керування, профілів руху з обмеженням ривку, термоконтурів з якісними регуляторами, випереджальної компенсації тиску в екструдері та інтелектуальних наглядових модулів забезпечує прийнятний компроміс між якістю друку, стійкістю до збурень і вимогами до обчислювальних ресурсів[46]. Така архітектура легко переноситься на поширені кінематичні конфігурації декартового типу, CoreXY та Delta і слугує основою для подальшого розвитку інтелектуальної системи наглядового керування.

### **1.3 Аналіз наявного програмного забезпечення та способів його застосування у дослідженні**

Сучасне програмно апаратне середовище FDM та FFF друку доцільно розглядати як багаторівневу ієрархію. Нижній рівень формують прошивки мікроконтролера типу Marlin, Klipper, RepRapFirmware, які інтерпретують команди G коду, реалізують планування руху з трапецієподібними та S подібними профілями, згладжування траєкторії, терморегулювання на основі ПД, збирання базової телеметрії та механізми безпеки. У Klipper значна частина планування

винесена на хост, мікроконтролер детерміновано відпрацьовує послідовності кроків, у Marlin основні функції локалізовано безпосередньо на контролері [47].

Хост рівень представлений веб оболонками OctoPrint, Mainsail, Fluidd, OctoEverywhere. Вони забезпечують веб інтерфейс оператора, програмні інтерфейси типу REST та WebSocket, систему плагінів для інтеграції камер, формування таймлапс відео, журналювання подій і взаємодію з зовнішніми сервісами типу MQTT або вебхуків[48]. Через ці інтерфейси можливий обмін даними між модулем штучного інтелекту та прошивкою принтера, включно з отриманням синхронізованих подій про шари, типи елементів, паузи та завершення завдань, а також передаванням команд безпечного втручання пауза, паркування, корекція швидкості, обдуву, температур.

Важливою складовою є слайсери Cura, PrusaSlicer, OrcaSlicer, SuperSlicer. Вони виконують офлайнове планування траєкторій і технологічних профілів, формують файл G коду зі службовими коментарями про номер шару та тип контуру периметр, заповнення, міст, тонка стінка. Ці коментарі використовуються як часові якорі для узгодження відеокадрів та вікон вібраційних даних з відповідними фазами процесу друку [49].

Таблиця 1.1

Рівні програмно апаратного середовища FDM та FFF друку

Рівень	Типові представники	Основні функції
Прошивка мікроконтролера	Marlin, Klipper, RepRapFirmware	Інтерпретація G-code, планування руху, термоконттури, базова безпека, телеметрія
Хост-рівень, веб-інтерфейси	OctoPrint, Mainsail, Fluidd, OctoEverywhere	Веб-керування, API, плагіни, журналювання, інтеграція з модулем III
Слайсери	Cura, PrusaSlicer, OrcaSlicer, SuperSlicer	Офлайн-планування траєкторій, маркування G-code коментарями
Сенсори й прискорювачі	USB/CSI-камери, ІЧ-модулі, акселерометри; Raspberry Pi 5, Jetson, Coral	Збір мультимодальних сигналів, прискорення інференції

Рівень сенсорів і апаратних прискорювачів включає камери стандартів USB та CSI, інфрачервоні модулі, мікрофони, акселерометри, а також мінікомпютери Raspberry Pi п'ятої серії, модулі Jetson, прискорювачі Coral. Такі платформи дають змогу виконувати згорткові моделі у режимі, наближеному до реального часу, або переносити складніші обчислення у міжшарові інтервали[50]. Типовий конвеєр оброблення даних включає надходження сигналів, попередню обробку, інференцію моделі, формування індикатора ризику та застосування політики втручання з урахуванням допустимої затримки.

Узагальнення основних рівнів програмно апаратного середовища FDM та FFF друку наведено в таблиці 1.1.

Таблиця описує чотири основні рівні: прошивки мікроконтролера, хост рівень і веб інтерфейси, слайсери, сенсори та апаратні прискорювачі. Для кожного рівня наведені типові представники та ключові функції. [51]

Існуючі підходи до контролю якості на основі штучного інтелекту. Підходи до інтелектуального контролю FDM та FFF друку спираються на візуальний, акустико вібраційний, тепловий та гібридний моніторинг. Візуальні методи використовують послідовності зображень у видимому та інфрачервоному діапазонах і розв'язують задачі класифікації стану норма дефект, детекції аномалій типу спагеті, відривів, зсувів шарів, а також семантичної сегментації провисань, ниткоутворення, деламінації, артефактів типу elephant s foot. Як екстрактори ознак широко застосовують ResNet, MobileNet, EfficientNet, модифіковані версії YOLO та сегментатори родини U Net і DeepLab. Для урахування часової динаміки використовують оптичний потік, тривимірні згортки, рекурентні блоки LSTM, GRU та часові трансформери [52].

Акустико вібраційні методи аналізують сигнали мікрофона чи акселерометра, які перетворюють у спектрограми та мел спектрограми та подають на згорткові та рекурентні мережі. Вони ефективно виявляють ковзання екструдера, пропуски кроків, резонансні явища, заклинювання механіки і майже не залежать від умов освітлення, проте чутливі до фонового шуму, що потребує спеціальної фільтрації і гістерезисних порогів [53].

Теплові методи використовують інфрачервоні камери та тепловізійні модулі для побудови карт температур у зоні друку. Їх аналіз дозволяє виявляти перегрів або недогрів, зони слабкої міжшарової адгезії, переплавлення тонких елементів [54]. Інтеграція теплового моніторингу з контурами керування температурою й обдувом дає змогу реалізовувати замкнені корекції режимів у режимі, близькому до реального часу.

Гібридні методи поєднують відеодані, телеметрію координатних приводів і термоконтурів, вібраційні ознаки. Часто використовують каскадну схему: швидкий детектор формує попередній тригер, більш точний, але повільніший модуль виконує верифікацію. Така організація знижує очікувану вартість помилки та підвищує робастність системи щодо варіацій принтерів, матеріалів, сценаріїв освітлення [55]. Узагальнення каналів інтелектуального контролю, типових моделей, переваг та обмежень подано в таблиці 1.3.

Таблиця 1.2

Канали інтелектуального контролю та їх особливості

Канал	Типові моделі	Переваги	Обмеження
Візуальний	ResNet, YOLO, U-Net, DeepLab	Висока інформативність, локалізація дефектів	Чутливість до освітлення і ракурсу
Акустико-вібраційний	2D-CNN, 1D-CNN, GRU	Незалежність від оптики, чутливість до механіки	Чутливість до фонового шуму
Тепловий (ІЧ)	CNN, автоенкодери	Оцінка теплових режимів, контроль адгезії	Вартість сенсорів, обмежена роздільна здатність
Гібридний	Каскади, мультимодальні мережі	Зниження загальної вартості помилки, робастність	Складність інтеграції та налаштування

У таблиці 1.2 візуальний, акустико вібраційний, тепловий та гібридний канали порівнюються за типовими моделями, перевагами та обмеженнями. Це використовується для вибору поєднання каналів, яке найкраще відповідає вимогам конкретної установки.

Якість моделей оцінюють за стандартними метриками задач класифікації, детекції та сегментації, такими як площа під ROC кривою, площа під PR кривою, середня точність для детекції, показники mIoU і Dice для сегментації [56]. Для інтегрованих систем контролю враховують не лише значення метрик, а й очікувану вартість помилки, що відображає співвідношення ризиків пропуску дефекту та зайвих втручань [57]. Це дає змогу налаштовувати пороги прийняття рішень з урахуванням технологічних вимог до безпеки та якості.

#### **1.4 ResNet як базова архітектура контролю зображень**

Архітектура ResNet належить до класу глибоких згорткових нейронних мереж і застосовується для аналізу зображень у найрізноманітніших задачах від загальної класифікації до детекції й сегментації об'єктів [58]. Її ключова ідея полягає у використанні залишкових зв'язків між шарами. Замість того щоб навчати кожен блок виконувати складне перетворення з нуля, мережа навчається коригувати вже наявні ознаки. Завдяки цьому глибокі моделі з великою кількістю шарів краще оптимізуються, стійкіше передають градієнти під час навчання і не втрачають точність при збільшенні глибини.

Особливістю ResNet є поєднання простої структури кожного блоку з можливістю будувати дуже глибокі мережі. Залишковий зв'язок дає блоку можливість, за потреби, поводитися як майже тотожне перетворення, а корекція ознак концентрується лише на тих аспектах зображення, де це справді потрібно. Це зменшує ризик деградації якості, який був характерний для більш ранніх архітектур без таких зв'язків. Крім того, ResNet добре переносить початкове навчання на великих загальних множинах зображень і подальше донавчання на вузьких прикладних задачах.

Сімейство ResNet складається з кількох основних варіантів, що відрізняються кількістю шарів та обчислювальною складністю [59]. ResNet-18 і ResNet-34 мають помірну глибину і відносно невелику кількість параметрів, завдяки чому придатні для роботи на пристроях з обмеженими ресурсами, зокрема на одноплатних



комп'ютерах. ResNet-50 є класичним компромісом між глибиною і продуктивністю, забезпечує помітно багатші ознаки, але вимагає більше пам'яті й обчислень. ResNet-101 та ResNet-152 переважно застосовують на серверних платформах і у хмарних сервісах, де критичними є не обмеження за ресурсами, а максимальна якість глибинних ознак. У практичних системах комп'ютерного зору ResNet часто виступає базовою мережею ознак у складніших моделях, таких як детектори та сегментатори, де до неї додаються верхні рівні, що відповідають за локалізацію й уточнення контурів об'єктів.

У задачах 3D друку ResNet зручно розглядати як універсальний екстрактор візуальних ознак шва, поверхні та оточення друку [60]. На виході базових блоків мережа формує багатовимірні представлення, у яких кодуються текстура ниток, регулярність шарів, наявність потовщень, провисань, пустот, фрагментів типу спагеті. Далі ці ознаки можна використовувати для розв'язання різних задач. Найпростішим варіантом є класифікація кадру на норма та дефект. Більш розвинуті варіанти включають детекцію локальних артефактів з поверненням координат зон ризику або семантичну сегментацію, коли для кожного пікселя визначається, чи належить він до дефектної ділянки.

Щоб ResNet ефективно працювала саме з дрібними дефектами FDM друку, її доцільно модифікувати кількома узгодженими кроками [61]. По-перше, потрібне підвищення просторової роздільної здатності ознак. Для цього використовують багатомасштабні представлення на зразок піраміди ознак, коли ознаки з кількох рівнів глибини поєднуються в один спільний простір. Це дає змогу одночасно бачити загальний контекст моделі та тонкі структури ниток. По-друге, дрібні дефекти вигідно аналізувати у режимі розбиття кадру на плитки. Мережа при цьому отримує на вхід не зменшене до низької роздільної здатності повне зображення, а окремі фрагменти з вищою деталізацією, де маленькі артефакти займають більше пікселів. По-третє, бажано адаптувати архітектуру до квантування та структурного прунінгу, щоб модель зберегла точність після перенесення на малопотужну платформу, наприклад у форматі з цілими вагами.

У межах задачі періодичного аналізу зображення приблизно один раз на хвилину обмеження на швидкість є порівняно м'якими. Це дозволяє використовувати модель з дещо більшою глибиною, ніж у випадку обробки кожного кадру потоку в режимі реального часу. У такому сценарії найбільш доцільною базовою моделлю можна вважати ResNet-50 у модифікованому вигляді з пірамідою ознак та легким верхнім модулем детекції або сегментації дрібних дефектів[62]. Вона надає багатші проміжні представлення, ніж ResNet-18 та ResNet-34, що підвищує імовірність виявлення тонких артефактів нитки, нерівностей на мостах та локальних недоекструзій. При цьому однохвилинний інтервал між запусками дає змогу вписати її обчислення у ресурсний бюджет Raspberry Pi п'ятої серії за умови оптимізованої реалізації та квантування.

Навчання ResNet для контролю 3D друку будується як поетапний процес. Спочатку використовують попередньо натреновану на великій множині природних зображень модель, яка вже вміє виділяти загальні візуальні структури [63]. Далі виконують донавчання на спеціалізованому корпусі кадрів FDM друку з ретельно розміченими дефектами. Важливим є баланс між класами норма та різні види браку, а також наявність прикладів з різних принтерів, матеріалів і умов освітлення. Для підвищення стійкості застосовують аугментації, що імітують зміни яскравості, контрасту, шуму, неідеальне освітлення. Під час навчання мережа поступово навчається відрізняти дрібні реальні артефакти від випадкових відблисків і текстур, які не мають технологічного значення. Валідація та тестування на відкладених вибірках дозволяють оцінити чутливість, специфічність і якість локалізації дефектів.

Порівняно з іншими архітектурами ResNet має кілька важливих переваг у контексті контролю 3D друку [64]. Вона поєднує передбачувану поведінку під час збільшення глибини з відносно невисокими вимогами до пам'яті у варіантах з помірною кількістю шарів. На відміну від більш старих архітектур типу VGG, які швидко стають надто важкими для краєвих пристроїв, залишкові блоки ResNet дозволяють компактніше розподіляти параметри між шарами і краще використовувати їх виразну потужність. Порівняно з надлегкими мобільними

архітектурами ResNet забезпечує більш стабільну якість ознак після квантування і прунінгу, що особливо важливо, коли потрібно впевнено розпізнавати дуже дрібні дефекти за складних умов освітлення та текстури. Крім того, ResNet добре інтегрується у складніші каскадні схеми, де легка модель на основі ResNet-18 або ResNet-34 відфільтровує явно нормальні кадри, а більш потужна ResNet-50 з пірамідою ознак аналізує лише підозрілі фрагменти з метою максимально точного виявлення і локалізації дефектів.

У підсумку ResNet виступає природною базовою архітектурою для інтелектуальної системи візуального контролю FDM друку [65]. Вона забезпечує поєднання високої якості ознак, стійкості до різноманітності даних і можливості оптимізації під обмежені обчислювальні ресурси, що робить її придатною як для експериментальних досліджень, так і для впровадження на промислових краєвих платформах.

Таблиця 1.3

Архітектури глибокого навчання та сфери їх доцільності

Архітектура	Сфера застосування	Особливості
ResNet-18/34/50	Базовий екстрактор ознак, класифікація, детекція	Баланс «точність/ресурси», добра придатність до стиснення
EfficientNet-Lite, MobileNetV3	Легкі класифікатори для роботи «на краю»	Висока швидкодія, нижча точність на дрібних дефектах
YOLOv8-n/s, RT-DETR-r18	Швидка детекція великих аномалій	Низька латентність, обмежена піксельна точність
Mask-RCNN, DeepLabv3+	Детальна сегментація поверхневих дефектів	Висока точність, значні обчислювальні витрати
Автоенкодери, PaDiM, SPADE	Виявлення аномалій «одного класу»	Мінімальні вимоги до розмітки, чутливість до зміни сцени

Інші архітектури та сфери їх доцільності. Поряд з ResNet використовуються енергоефективні архітектури, орієнтовані на роботу на краю мережі. EfficientNet Lite та MobileNet третього покоління мають невелику кількість параметрів, високу швидкодію та добру придатність до квантування у формат цілочисельних ваг, завдяки чому забезпечують аналіз відео з частотою, достатньою для безперервного

моніторингу[66]. Водночас точність на дрібних або слабкоконтрастних дефектах зазвичай нижча, тому результати доцільно верифікувати точнішою, хоча й ресурсомісткою моделлю у каскадній схемі.

Архітектури родини YOLO у легких модифікаціях забезпечують низьку латентність і придатні для швидкої детекції аномалій значних розмірів, таких як відриви моделі, великі структури спагеті, грубі зсуви шарів [67]. Піксельна точність меж об'єктів обмежена, тому для оцінювання площі дефекту їх комбінують із сегментаторами або евристичними методами розширення зон підозрілих ділянок.

Сегментатори Mask RCNN, DeepLab v третя плюс демонструють високу точність побудови масок для задач виявлення провисань, деламінації та дефектів на кромках, проте потребують значних обчислювальних ресурсів [68]. Практичним компромісом є використання ResNet з декодером FPN, квантування до цілочисельного формату та рідша інференція між шарами.

Моделі одного класу, до яких належать автоенкодери, методи типу PaDiM, SPADE, потребують мінімальної розмітки та добре переносяться між близькими доменами, але чутливі до зміни сцени, ракурсу або освітлення [69]. Зменшити цю чутливість можна через інтеграцію з телеметрією процесу та адаптивні пороги, що залежать від режиму друку. Підходи самонавчання SimCLR, BYOL, SwAV дають змогу покращити стійкість моделей на невпорядкованих відеоданих і скоротити обсяг спеціалізованої розмітки для задач контролю дефектів. Узагальнення сфер доцільного застосування різних архітектур глибокого навчання наведено в таблиці 1.3.

У таблиці 1.3 порівнюються ResNet, EfficientNet Lite, MobileNet, легкі версії YOLO, сегментатори та моделі одного класу з точки зору сфери застосування і ключових особливостей. Це слугує орієнтиром для вибору архітектури у залежності від доступних ресурсів, вимог до точності та латентності.

### **1.5 Програмне забезпечення та сервіси що вже реалізують ШІ контроль**

У практиці FDM та FFF друку вже існує низка інженерних рішень, які реалізують базовий нагляд за процесом з використанням методів штучного інтелекту. До них належать плагіни і надбудови для OctoPrint та екосистеми Klipper з інтерфейсами Mainsail і Fluididd, які інтегрують локальні моделі класифікації та детекції, формують тригери пауз і паркування, генерують сповіщення та ведуть журнали подій [70].

Поширеними є локальні скриптові рішення мовою програмування Python з використанням PyTorch або TensorFlow, що запускаються на мінікомп'ютерах типу Raspberry Pi, взаємодіють з принтером через REST або MQTT та реалізують користувацькі алгоритми аналізу відеопотоку й телеметрії [71]. Існують також комерційні локальні та хмарні сервіси, які виконують інференцію на віддалених обчислювальних ресурсах і повертають оператору узагальнений індикатор ризику через веб інтерфейс або мобільні застосунки.

Ефективність подібних рішень критично залежить від латентності інференції, якості детекції та коректно спроектованої процедури безпечного відновлення друку [72]. Для відеосигналу з роздільною здатністю сімсот двадцять пікселів по вертикалі частота аналізу має бути достатньою для своєчасного виявлення аномалій, а політика прийняття рішень повинна враховувати ризики хибних спрацьовувань і пропусків дефектів. Особливо придатними для наукових і експериментальних задач є локальні скриптові рішення з власною моделлю на основі ResNet та мультимодальним злиттям ознак, які забезпечують контрольовану затримку, гнучкість налаштувань і можливість донавчання на нових даних.

### **1.6 Застосування у цій роботі запропонована схема**

У цій роботі пропонується схема модуля нагляду, що працює безпосередньо на краю та контролює процес FDM та FFF друку у зв'язці з мінікомп'ютером Raspberry Pi п'ятої серії [73]. Система перетворює відеопотік і телеметрію на числовий індикатор ризику дефекту та формує безпечні керувальні дії, які через програмний інтерфейс передаються прошивці принтера і впливають на режими

руху, екструзії, обдуву та нагріву. Узагальнена блок схема модуля нагляду, що відображає послідовність оброблення даних у реальному часі, злиття оцінок ризику та сценарії реагування, наведена на рисунку 1.2.

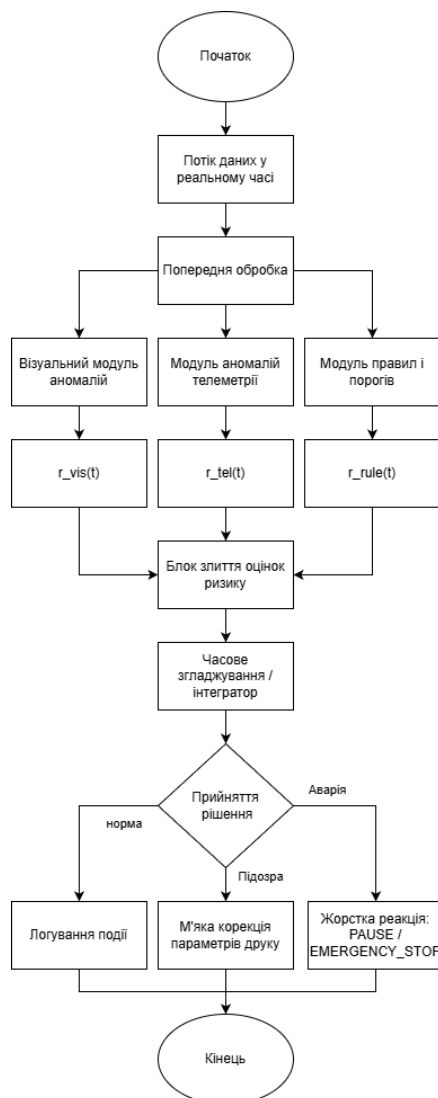


Рис. 1.2. Узагальнена блок схема модуля нагляду та прийняття рішень під час FDM друку

На блок схемі виділено вхідний рівень, який включає RGB відео з фіксованими параметрами експозиції та підсвічування, синхронізоване з мітками G коду про шари і типи елементів, а також телеметрію температур сопла і платформи, швидкостей, інтенсивності обдуву, подій пауз. Далі розташовано етапи попередньої обробки виділення області інтересу, нормалізації та масштабування, а за потреби розбиття кадру на фрагменти. Ядром є модель ResNet у конфігурації

вісімнадцять шарів, налаштована на бінарну класифікацію стану норма дефект, доповнена легкою головою детекції для виявлення структур спагеті, відривів, зсувів шарів [74].

Отримані значення міри ризику агрегуються на рівні шару з урахуванням контексту G коду та телеметрії. Використовується політика подвійного порогу з гістерезисом, яка дає змогу відокремлювати короточасні артефакти від стабільних дефектів та зменшує кількість хибних пауз і зупинок [75]. Залежно від рівня ризику формуються керувальні дії пауза, паркування, корекція швидкості, подачі, обдуву або температур. Латентність одного кроку інференції обмежують так, щоб вона не перевищувала характерної тривалості сегмента траєкторії та допустимої частки часу формування шару, що гарантує коректну інтеграцію модуля у загальну структуру керування.

Процедура навчання моделі передбачає ініціалізацію ваг на наборі типу ImageNet та подальше донавчання на спеціалізованому наборі даних, сформованому для задачі контролю FDM друку [76]. Формування навчальної вибірки виконується з балансуванням за матеріалами, діаметрами сопел, кінематичними схемами принтерів, умовами освітлення, що підвищує переносимість моделі. Для детекції та сегментації застосовують комбіновані функції втрат; валідацію організують за схемою виключення одного принтера або матеріалу. Ефективність оцінюють за стандартними метриками та за емпіричною частотою хибних втручань у реальних експериментах.

У підсумку запропонована схема поєднує можливості сучасних прошивок, хост рівня, слайсерів та апаратних прискорювачів з базовою архітектурою ResNet і наглядною політикою, орієнтованою на раннє виявлення небезпечних дефектів [77]. Це створює основу для подальшої розробки інтелектуальної системи наглядового керування процесом FDM друку, яка буде детально розглянута у наступних розділах.

Ризики та шляхи їх помякшення. До ключових ризиків під час впровадження запропонованого комплексу належать залежність результатів від сцени спостереження, хибні спрацювання та пропуски дефектів, обмежені можливості

обчислювальної платформи Raspberry Pi п'ятої серії, інтеграційні та кібербезпекові ризики, а також небажаний вплив втручань на геометрію та якість друку. Сценова залежність визначається оптикою, освітленням і ракурсом зйомки, тому її помякшення досягається стабілізацією підсвічування з розширеним динамічним діапазоном, жорсткою фіксацією положення камери, добором експозиції та використанням аугментацій під час навчання, що моделюють зміни яскравості, контрасту, кольору, шумів і поворотів [78].

Ризики хибних спрацювань та пропусків дефектів знижуються завдяки каскадній верифікації, коли легкий тригер доповнюється більш деталізованим модулем перевірки, застосуванню подвійних порогів із гістерезисом, вимозі мінімальної тривалості підтвердження події, а також фільтраційним правилам, побудованим з урахуванням телеметрії процесу. Обмежені ресурси Raspberry Pi п'ятої серії компенсуються квантуванням ваг до цілочисельного формату, структурним та каналним прунінгом, злиттям згорткових і нормувальних шарів, використанням асинхронних черг оброблення, груповою обробкою кадрів у межах шару та рознесенням обчислювально складних операцій у міжшарові інтервали [79].

Безпечність втручань забезпечується плавними змінами технологічних режимів, дотриманням апаратних обмежень, обов'язковим журналюванням усіх дій і наявністю режиму випробування, у якому керувальні впливи не передаються на реальний принтер, а лише фіксуються для аналізу. Переносимість системи на різні моделі принтерів підтримується тонким донавчанням під конкретну конфігурацію, нормалізацією даних за сценаріями друку, створенням профілів порогів і політик для різних матеріалів та режимів. Це дає змогу адаптувати модуль нагляду до широкого спектра FDM та FFF систем без істотної зміни архітектури.

#### **1.4 Мета, гіпотеза, завдання та обмеження дослідження**

Метою дослідження є створення та експериментальне обґрунтування інформаційної технології інтелектуалізованого керування поширеним FDM-



принтером на базі мінікомп'ютера Raspberry Pi п'ятої серії, здатної забезпечити візуальний контроль процесу друку за зображеннями підвищеної роздільної здатності, виявлення дрібномасштабних дефектів з високою ймовірністю та автоматичний перехід у паузу у разі небезпечних відхилень. Додатково ставиться вимога збереження стабільної роботи протягом тривалих друків за умови дотримання часових обмежень контуру керування, що формалізується нерівністю:

$$\Delta t_{\text{tot}} \leq \Delta t_{\text{max}}. \quad (1.1)$$

Об'єктом дослідження є побутовий FDM-принтер як багатоконтурний автоматизований технічний об'єкт з координатною кінематикою, приводами, термоконтуром, трактом екструзії, сенсорною підсистемою та програмно-алгоритмічними засобами планування і регулювання. Предметом дослідження є програмно-апаратні методи інтеграції мінікомп'ютера, операційної системи, серверного програмного забезпечення і вебзасобів з прошивкою принтера, нейромережеві алгоритми комп'ютерного зору для аналізу зображень і виявлення дефектів у масштабі часу процесу друку, методи синхронізації відео з контекстом G-коду, політики безпечного втручання та протоколи відновлення друку.

Робоча гіпотеза полягає у припущенні, що існує конфігурація апаратно-програмного комплексу на базі Raspberry Pi п'ятої серії, яка під час оброблення відеопотоку не нижче формату 720p у поєднанні з контекстом G-коду та телеметрією забезпечує своєчасне виявлення критичних дефектів, формування безпечних коригувальних дій і зниження імовірності незворотних зупинок друку без порушення часових обмежень контуру керування. Очікуваний ефект доцільно виразити через зменшення узагальненої вартості помилок порівняно з базовим режимом без візуального контролю:

$$E[C] = C_{\text{FN}}P_{\text{FN}} + C_{\text{FP}}P_{\text{FP}}. \quad (1.2)$$

У цьому співвідношенні  $C_{\text{FN}}$  та  $C_{\text{FP}}$  задають ваги для пропуску дефекту та хибної паузи, а  $P_{\text{FN}}$  та  $P_{\text{FP}}$  є емпіричними частотами відповідних помилок у робочому протоколі. Досягнення зменшення  $E[C]$  пов'язується з використанням екстрактора ознак класу ResNet, стабільної оптики та освітлення, квантування моделей і

структурного проріджування параметрів, а також із політиками втручання, що узгоджують ризики пропуску дефектів і хибних спрацьовувань.

Для перевірки гіпотези передбачається комплекс взаємопов'язаних завдань. На апаратному рівні необхідно проаналізувати електронні компоненти принтера, розробити схему підключення Raspberry Pi п'ятої серії до однієї чи двох камер, вібраційних та, за потреби, інфрачервоних сенсорів, обґрунтувати топологію з'єднань, живлення і захисних елементів. На рівні операційної системи та серверних компонентів потрібно вибрати дистрибутив, драйвери і засоби апаратного прискорення, побудувати служби відеозахоплення та планування завдань, розгорнути мережеві служби і серверний модуль взаємодії з прошивкою, сформувавши відтворюваний образ системи. Вебінтерфейс має забезпечувати автентифікацію, захищений транспорт на основі криптографічних протоколів, рольову модель доступу, керування завданнями друку, корекцію режимів, роботу з G-кодом, відображення телеметрії та відео, а також журнал подій.

Для конвеєра комп'ютерного зору слід визначити оптичну підсистему, параметри експозиції, поле зору та підсвічування, побудувати ланцюжок попередньої обробки з виділенням областей інтересу, нормалізацією та масштабуванням, підібрати аугментації, придатні для довготривалих друків у форматі 720p, з можливістю використання підвищених роздільних здатностей у міжшаровому режимі. На алгоритмічному рівні необхідно порівняти декілька архітектур модулів зору, серед яких ResNet різної глибини, EfficientNet, MobileNet, моделі типу YOLO, U-Net, DeepLab, оцінити середню точність, показники прийняття рішень, якість локалізації, латентність та споживання пам'яті і обґрунтувати вибір базової архітектури. У межах навчання передбачається попередня ініціалізація на універсальній множині, подальше тонке налаштування на доменному наборі, дослідження багатозадачних схем спільного навчання класифікації та локалізації і побудова відтворюваного протоколу.

На етапі впровадження на Raspberry Pi п'ятої серії потрібно дослідити середовища інференсу типу ONNX Runtime та OpenVINO, реалізувати квантування, структурне проріджування та злиття шарів і досягти прийнятної

частоти аналізу відео у форматі 720p з урахуванням часових обмежень. Окремим завданням є формалізація політик втручання у вигляді каскаду тригер, перевірка, дія з гістерезисом порогів, мінімальною тривалістю підтвердження, фільтрацією за телеметрією, режимом контрольного прогону без втручань та повним журналюванням критичних рішень. Додатково розглядається напівавтоматичне зняття виробу з платформи з аналізом варіантів механіки, міжконтурних інтерлоків, синхронізації із завершенням друку та інтеграції у вебінтерфейс. Завершальний блок становить методика експериментів, що поєднує оцінювання якості детекції, часових характеристик, впливу втручань на тривалість та якість друку і формування підсумкового звіту.

Дослідження обмежується класом FDM-принтерів з відкритими інтерфейсами обміну через USB, UART, CAN та сумісними прошивками типу Marlin, Klipper, RepRapFirmware, які надають телеметрію та дозволяють програмно ініціювати паузи, паркування і корекції режимів. Припускається наявність оптичної підсистеми, що формує RGB-зображення з роздільною здатністю від 720p до вищих форматів, базовим режимом є 720p з частотою тридцять кадрів за секунду, фіксованими параметрами експозиції та стабільним освітленням. Інференція виконується повністю на локальній периферійній обчислювальній платформі без залучення хмарних сервісів, а допустима латентність обмежується тривалістю мікросегментів траєкторії та шарів. Навчальні та тестові вибірки мають містити друки з різними матеріалами, діаметрами сопел, кінематичними схемами, умовами освітлення та ракурсами і супроводжуватися мітками шарів і типів елементів згідно з G-кодом. Передбачається сумісність драйверів камер і середовищ інференсу, а також можливість квантування та структурного проріджування моделей без істотної втрати точності. Експлуатаційні умови передбачають роботу в приміщенні з контрольованим освітленням, відсутністю надмірних вібрацій та надійним живленням, бажано із застосуванням джерела безперебійного живлення.

Вхідні та вихідні дані, безпекові обмеження та показники ефективності. Інформаційний комплекс інтелектуального наглядного керування працює з розширеним набором вхідних даних. До нього належить відеопотік формату сімсот

двадцять пікселів по вертикалі з частотою тридцять кадрів за секунду, а також попередньо визначені області інтересу у полі зору камери. Додатково обробляються температури сопла і платформи, сигнали вентиляторів, вектори швидкостей та прискорень, величина екструзії, стани кінцевих вимикачів і датчика філамента, події переходу між шарами та паузами, мітки команд G-коду, системні події мережі й автентифікації.

Вихідними даними комплексу є оцінка ймовірності наявності дефекту у реальному часі, за потреби з просторовою локалізацією ділянки ризику, а також набір керувальних дій. Результат роботи модуля зору формалізують як апостеріорну ймовірність:

$$p_t = P(y_t = 1 | \mathbf{x}_t). \quad (1.3)$$

Далі  $p_t$  перетворюється на рішення політики, що визначає дію та її параметри, а також супровідний запис журналу, який містить кадр тригера, короткий відеофрагмент навколо інциденту, телеметрію, що передуює рішенням та супроводжує його, текстовий опис прийнятої дії та ідентифікатор застосованої політики безпеки.

Безпекові обмеження визначають рамки припустимої роботи комплексу. На рівні комунікацій вимагається використання захищених каналів зв'язку, механізмів автентифікації та рольової моделі доступу, мережевих політик типу списків дозволених адрес або віртуальних приватних мереж, захист від типових атак, обмеження частоти запитів, безпечне зберігання й оновлення секретів та ключів. На часовому рівні задається максимальна латентність інференсу та виконання керувальних дій, яка має бути узгоджена з тривалістю мікросегментів траєкторії та окремого шару друку. На фізичному рівні фіксуються граничні значення швидкостей, екструзії та прискорень, що не можуть бути перевищені навіть за наявності сильного сигналу від модуля штучного інтелекту. У вигляді узагальнених обмежень це подають так:

$$\Delta t_{\text{inf}} \leq \Delta t_{\text{inf,max}}, v \leq v_{\text{max}}, a \leq a_{\text{max}}. \quad (1.4)$$

Для критичних сценаріїв задається пріоритетна послідовність дій з переходом через паузу, паркування, контрольоване охолодження, міжконтурні інтерлоки і

процедури оброблення збоїв живлення з гарантованим паркуванням і записом станів.

Ефективність системи оцінюється за кількома взаємодоповнювальними групами показників. Для модуля штучного інтелекту аналізують метрики прийняття рішень на робочому порозі, зокрема точність та повноту, а також їх гармонійне поєднання. Основні співвідношення мають вигляд:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP}, \text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN}, F1 = \frac{2 \text{ Precision Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}, \quad (1.5)$$

Для задач локалізації та сегментації застосовують метрики узгодженості прогнозованих і еталонних областей, що відображають частку збігу контурів відносно їх об'єднання, а також чутливу до тонких структур метрику на основі перетину масок:

$$\text{IoU} = \frac{|Y \cap \hat{Y}|}{|Y \cup \hat{Y}|}, \text{Dice} = \frac{2|Y \cap \hat{Y}|}{|Y| + |\hat{Y}|}, \quad (1.6)$$

Окремо визначають час до спрацювання, тобто інтервал між моментом фактичної появи дефекту у полі зору та моментом формування керувальної команди. Цей показник задають як різницю часових міток:

$$T_{\text{det}} = t_{\text{cmd}} - t_{\text{def}}, \quad (1.7)$$

де  $T_{\text{det}}$  порівнюють з тривалістю шару і мінімально допустимою довжиною мікросегмента траєкторії. Система вважається придатною до практичного використання лише тоді, коли переважна більшість дефектів виявляється до того, як помилка стане незворотною для поточного виробу.

На технологічному рівні оцінюють частку врятованих завдань друку, коли дефект був коректно виявлений, а своєчасна пауза або корекція режимів дозволили уникнути повної втрати виробу. Аналізується вплив системи на загальну тривалість процесу, тобто відносне подовження або скорочення часу друку, а також частота хибних пауз і частка завдань, що містять принаймні одну необґрунтовану зупинку. Геометричну якість характеризують середньоквадратичними похибками розмірів контрольних елементів та описом поверхневих артефактів, зокрема смугастості, локальних провисань і слідів переєкструзії.

Стійкість системи оцінюють за збереженням прийнятного рівня точності і частоти істинно позитивних спрацювань за змінених умов, до яких належать складніше освітлення, інші матеріали, інші діаметри сопел і нові ракурси камери. Надійність характеризують середнім часом безвідмовної роботи та середнім часом відновлення після відмови з урахуванням як програмних, так і апаратних чинників. Ефективність роботи на локальній периферійній платформі доцільно описувати питомими показниками продуктивності й енерговитрат, які обчислюють так:

$$\eta_{FPS/W} = \frac{FPS}{P}, E_{frame} = \frac{P}{FPS}, \quad (1.8)$$

де  $P$  є споживаною потужністю,  $FPS$  є частотою аналізу кадрів,  $\eta_{FPS/W}$  є відносною продуктивністю на ват,  $E_{frame}$  є енерговитратами на один кадр.

Узагальнена оцінка будується на функції вартості, що поєднує вагові коефіцієнти для помилок детекції, часових затримок, частоти хибних пауз і числа критичних інцидентів. У вигляді прикладу таку функцію подають як лінійну композицію нормованих компонент:

$$J = w_1 E[C] + w_2 Q_{0.95}(T_{det}) + w_3 \lambda_{FP} + w_4 E_{frame}, \quad (1.9)$$

де  $Q_{0.95}(T_{det})$  є дев'яносто п'ятим перцентилем часу до спрацювання,  $\lambda_{FP}$  є частотою хибних пауз на годину друку, а  $w_1, \dots, w_4$  є ваговими коефіцієнтами, які задають пріоритети якості, швидкодії та енергоефективності. Значення  $J$  для системи з інтелектуальним візуальним контролем повинно бути меншим, ніж для базового варіанта без зорового нагляду, що підтверджує доцільність упровадження запропонованої інформаційної технології.

## Висновки до розділу 1

У розділі виконано системний огляд предметної області FDM/FFF-друку як автоматизованого технічного об'єкта, для якого якість виробу та безпечність процесу визначаються взаємодією механічної підсистеми, термоконтурів, екструзії та програмного керування. У результаті аналізу встановлено, що типові підходи контролю у поширених конфігураціях зосереджені на параметричних межах і протиаварійних механізмах, тоді як дефекти формування виробу часто мають

локальний і швидкоплинний характер та потребують візуально-орієнтованого наглядного спостереження з часовими гарантіями.

Обґрунтовано доцільність переходу від фрагментарного моніторингу до замкненого наглядного контуру, у якому зображення процесу друку та пов'язані технологічні ознаки інтерпретуються як спостережуваний стан, придатний для керованого втручання. Сформовано передумови для вибору базових архітектур комп'ютерного зору і визначено вимоги до даних та обмежень: стан може включати відеокадр, температури, швидкості, положення, подачу, обдув та параметри завдання, матеріал, профіль, ліміти прискорень.

Узагальнення цього розділу забезпечує логічний перехід до розділів II–III: від аналізу об'єкта та ризиків — до формування вимог до нейромережевої складової, критеріїв своєчасності та практично реалізованих політик втручання, які мають бути сумісними з експлуатаційними обмеженнями та роллю оператора.

Постановка задачі та узагальнене формулювання наукових результатів. Постановка задачі полягає у створенні замкненого інтелектуального наглядного контуру FDM/FFF-друку, який забезпечує раннє виявлення дефектів за візуальними ознаками, формує ризикову оцінку та ініціює керовані дії з урахуванням безпекових обмежень і часової своєчасності. Вихідним є поєднання візуальних даних, телеметрії та контексту завдання у єдиному поданні стану, придатному для політик прийняття рішень.

Перший науковий результат полягає в удосконаленні моделі інтелектуального наглядного контролю, що організує каскадну оцінку ризику та верифікацію спрацювань із подальшим регламентованим втручанням.

Другий та третій науковий результат полягає у методі та моделі прийняття керувальних рішень на основі інтегрального індикатора ризику, телеметрії та контексту G-коду, із застосуванням порогів, гістерезису та механізмів приглушення короткочасних аномалій, що зменшує частоту хибних пауз і підвищує стійкість поведінки політик у часі.

## РОЗДІЛ II. МАШИННЕ НАВЧАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ 3D-ДРУКУ

Машинне навчання в задачах контролю процесу FDM та FFF-друку розглядається як засіб побудови наглядних модулів, що перетворюють багатомодальні сенсорні дані на оцінки стану процесу, локалізацію дефектів та керувальні дії у масштабі часу друку. У цьому розділі подано узагальнену схему каскаду задач, типові входні дані, архітектурні підходи до класифікації, детекції, сегментації та виявлення аномалій, а також стратегії навчання й розгортання моделей на платформі Raspberry Pi 5 з урахуванням її обмежених ресурсів.

Основна ідея полягає у поєднанні покадрового аналізу зображень із часовою обробкою та злиттям даних з різних сенсорів, щоб своєчасно виявляти небезпечні відхилення, мінімізувати частку браку та підтримувати безпечні втручання в процес друку.

### 2.1. Огляд методів машинного навчання

Постановка задачі контролю якості FDM та FFF-друку включає кілька рівнів деталізації. На найпростішому рівні бінарний класифікатор розрізняє нормальний та дефектний стани і ініціює політику втручання. Далі моделі детекції визначають положення типових аномалій у кадрі, зокрема клубків типу spaghetti, локальних відривів моделі, зсувів шарів, зон недоекструзії та переекструзії. Для кількісної оцінки площі, периметра та форми дефектів застосовують семантичну й інстанс сегментацію, що повертає піксельні маски браку. За браку розмічених дефектів використовують однокласові моделі аномалій, які відштовхуються від еталонного нормального режиму й виділяють статистично нетипові стани.

На рисунку 2.1 схематично відображено послідовність перетворень від входного відеопотоку й телеметрії до рішення про втручання. Це дає змогу показати, як класифікація, детекція, сегментація та модулі аномалій взаємодіють у єдиному конвеєрі.



Вхідні дані для модулів машинного навчання мають багатомодальну природу. Оптичний канал у видимому діапазоні відтворює геометрію шва, текстуру поверхні та макродефекти. Інфрачервоні зображення описують температурні поля і дають змогу виявляти локальні перегріву та неоднорідне охолодження. Акустико-вібраційні сигнали чутливі до пропусків кроків, резонансів та прослизання у вузлах механіки й екструдера. Телеметрія принтера формує технологічний контекст та містить температури сопла й платформи, швидкості й прискорення, сигнали вентиляторів, стани кінцевих вимикачів і датчика філамента, а також службові мітки G-коду шару й типу елемента [80].

Коректна інтерпретація цих даних потребує жорсткої синхронізації з G-кодом. Коментарі типу LAYER та TYPE виконують роль часових маркерів, що дають змогу пов'язати кожний кадр з конкретною ділянкою траєкторії, відрізнити периметри, заповнення та мости і налаштувати пороги для різних типів структур. Це дозволяє будувати каскадні політики, де вимоги до чутливості й толерантності до хибних спрацювань змінюються залежно від фрагмента процесу.

Під час формування навчальних наборів даних розмічають не лише дефекти, а й якісні негативні приклади з візуально схожими текстурами без браку, додають метадані про матеріал, діаметр сопла, кінематику, профілі швидкості та охолодження. Важливим є стратифікований поділ даних за принтерами й матеріалами, щоб перевірити здатність моделей переноситися на нове обладнання без втрати точності.

Для підвищення стійкості до змін освітлення, кольору матеріалу та шумів сенсорів активно застосовують аугментації. Фотометричні перетворення змінюють яскравість, контраст і колориметрію, геометричні аугментації коригують масштаб і ракурс без втрати тонких ниток, а для тепловізійних даних виконують нормалізацію температурного діапазону. При цьому контролюють, щоб характерні структури залишалися представленими щонайменше кількома пікселями.

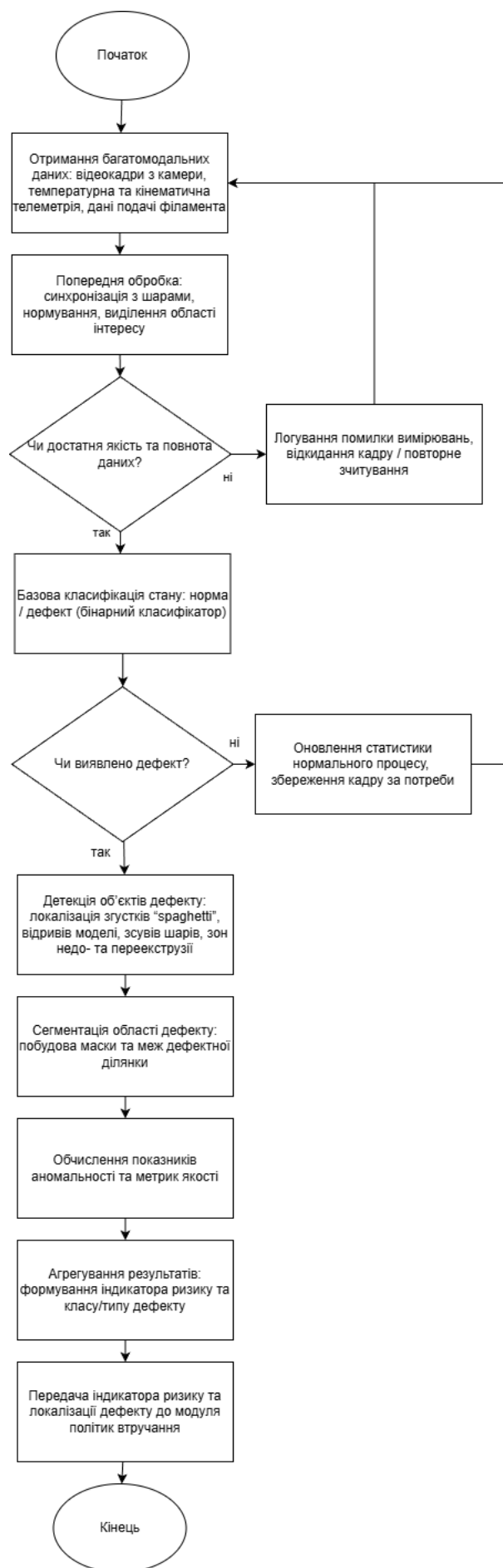


Рис. 2.1. Каскад задач машинного навчання для контролю якості FDM-друку

Часовий аспект враховують через обробку послідовностей кадрів. У найпростішому випадку миттєвий індикатор ризику згладжують у часі. Типову схему експоненційного згладжування задають так:

$$\tilde{s}_k = \lambda s_k + (1 - \lambda)\tilde{s}_{k-1}, \quad (2.1)$$

де  $\tilde{s}_k$  є згладженим показником ризику на кроці  $k$ ,  $s_k$  є миттєвим значенням, а  $\lambda$  лежить між нулем та одиницею і визначає вагу нових спостережень відносно історії. Це дає змогу зменшити чутливість до короточасних сплесків та пов'язати рішення з динамікою процесу, а не з одиничними кадрами.

## 2.2. Класифікація зображень FDM-друку

У задачі класифікації кадрів FDM або FFF-друку модель перетворює зображення або фрагмент зони друку на оцінку ймовірності дефекту чи на розподіл за кількома типами дефектів. У бінарній постановці формується оцінка ймовірності дефектного стану, яка порівнюється з порогом, у багатокласовій моделі одночасно визначається тип дефекту. Для таких задач застосовують згорткові нейронні мережі класу ResNet, EfficientNet та MobileNetV3 з вихідними головами на основі глобального усереднення та повнозв'язного шару. За наявності додаткових ресурсів використовують візуальні трансформери, проте для розгортання на краю доцільні полегшені архітектури.

У складі загального конвеєра класифікатор виконує роль швидкого скрінінгу. Він відсіює очевидно нормальні кадри та позначає ризикові фрагменти, які далі обробляє детектор або сегментатор. Це зменшує загальне обчислювальне навантаження і скорочує латентність при збереженні чутливості до дефектів.

Дисбаланс між нормальними та дефектними прикладами усувають завдяки спеціалізованим функціям втрат. Одним з ефективних підходів є фокальна втрата, яка посилює внесок складних прикладів. Вона задається так:

$$L_{\text{focal}} = -\alpha(1 - \hat{p})^\gamma y \ln \hat{p} - (1 - \alpha)\hat{p}^\gamma (1 - y) \ln(1 - \hat{p}), \quad (2.2)$$

де  $L_{\text{focal}}$  є значенням втрати для одного прикладу,  $y$  є істинною бінарною міткою,  $\hat{p}$  є передбаченою ймовірністю дефекту,  $\alpha$  керує балансом між класами, а  $\gamma$  регулює фокусування на складних прикладах.

Калібрування ймовірностей необхідне для узгодження виходів класифікатора з безпековою політикою. Для цього використовують температурне масштабування логітів, підбираючи параметр температури за валідаційною вибіркою так, щоб передбачені ймовірності добре відповідали фактичній частоті подій у робочому діапазоні порогів. Далі пороги адаптують до технологічного контексту, зокрема до типу елемента за G-кодом, швидкості руху та температурних уставок, знижуючи поріг у режимах підвищеного ризику та підвищуючи у стабільних умовах.

Для розгортання класифікаційних моделей на Raspberry Pi 5 доцільно використовувати легковагові архітектури, спеціально оптимізовані для вбудованих систем. Їх узагальнені властивості описано у таблиці.

Таблиця 2.1

Легковагові згорткові архітектури для вбудованих систем контролю FDM-друку

Модель	Архітектурні особливості	Типові переваги	Типові обмеження
MobileNet	Глибоко роздільні згортки з факторизацією просторових і каналових операцій	Висока обчислювальна ефективність і придатність до мобільних та вбудованих систем	Потреба уважного добору ширини та глибини мережі для досягнення цільової точності
ShuffleNet	Групові згортки та перестановка каналів для зменшення кількості обчислень	Дуже низьке обчислювальне навантаження, орієнтація на пристрої з малим енергоспоживанням	Складніша модифікація мережі та зниження точності у значній частині складних задач класифікації
SqueezeNet	Блоки типу fire зі стисканням і розширенням каналів через згортки розміру один на один	Дуже мала кількість параметрів і компактний розмір моделі	Обмежена точність порівняно з сучаснішими легковаговими архітектурами

У табл. 2.1 наведено порівняння трьох популярних архітектур. MobileNet використовує глибоко роздільні згортки, завдяки чому досягається висока обчислювальна ефективність за прийнятною точністю, проте потребує уважного добору ширини й глибини мережі. ShuffleNet зменшує кількість обчислень за рахунок групових згорток і перестановки каналів, що робить його придатним для пристроїв з малим енергоспоживанням, але ускладнює модифікацію й часто знижує точність на складних задачах. SqueezeNet реалізує блоки типу fire з агресивним стисканням каналів, забезпечуючи дуже малий розмір моделі ціною втрати точності порівняно з сучаснішими легковаговими мережами. З огляду на цей компроміс доцільно обирати MobileNetV3 та ResNet-18 як базові архітектури для подальших експериментів на Raspberry Pi 5.

Коли необхідно просторово точно окреслити зони браку, застосовують семантичну й інстанс сегментацію. Семантична сегментація присвоює кожному пікселю клас норми або певного типу дефекту, наприклад провисання, ниткоутворення чи відшарування. Інстанс сегментація додатково розрізняє окремі об'єкти одного класу, що важливо для опису множини клубків типу spaghetti або точок локального відриву.

Для семантичної сегментації доцільно використовувати U Net та її модифікації, які добре працюють із відносно невеликими наборами даних і зберігають деталі тонких структур. Архітектури класу DeepLab поєднують атраусні згортки та декодер і забезпечують чіткі межі масок. Для інстанс сегментації використовують Mask R-CNN з полегшеним бекбоном, наприклад ResNet-18 з пірамідою ознак.

Через малу площу багатьох дефектів класична кросентропійна втрата може виявитися недостатньо чутливою. Тому застосовують комбіновані метрики, наприклад втрату Tversky, яка підкреслює важливість істинно позитивних пікселів і дає змогу по-різному штрафувати хибнонегативні та хибнопозитивні рішення. Її задають так:

$$L_{Tv} = 1 - \frac{TP}{TP + \alpha FN + \beta FP}, \quad (2.3)$$

де  $L_{TV}$  є значенням втрати Tversky,  $TP$  є кількістю істинно позитивних пікселів,  $FN$  є кількістю хибнонегативних пікселів,  $FP$  є кількістю хибнопозитивних пікселів, а  $\alpha$  та  $\beta$  задають відносні штрафи за різні типи помилок.

Після отримання масок застосовують постобробку для усунення дрібних шумових плям, згладжування меж та відкидання невеликих артефактів, що не мають технологічного значення. Потім маски перетворюють на керувальні зони, наприклад будують буферні смуги вздовж кромки відшарування, де застосовують спеціальні режими корекції швидкості, температури або обдуву.

Для розгортання сегментаційних моделей на Raspberry Pi 5 необхідні додаткові оптимізації. Застосовують цілочисельне квантування ваг до формату з розрядністю вісім бітів, структурний прунінг каналів, злиття згорткових і нормувальних шарів, а також обмеження області інтересу до ділянки поблизу активної зони друку. Для зображень високої роздільної здатності кадр поділяють на плитки з перекриттям і зшивають результати інференсу між шарами, щоб не порушувати часові вимоги контуру керування.

Виявлення аномалій за обмежених даних про дефекти. У багатьох сценаріях точно розмічених прикладів дефектів мало, а спектр можливих ушкоджень важко охопити повною навчальною вибіркою. У такому разі використовують однокласові моделі аномалій, які моделюють розподіл нормального стану, а все, що істотно від нього відхиляється, розглядають як потенційний дефект.

Реконструкційні підходи використовують автоенкодери, які навчаються відновлювати зображення або вектори ознак лише для нормальних прикладів. На інференсі для  $k$ -го фрагмента обчислюють реконструкційну похибку:

$$s_k = \|y_k - \hat{y}_k\|_2, \quad (2.4)$$

де  $s_k$  є скалярним скором аномальності,  $y_k$  є вхідним вектором або зображенням,  $\hat{y}_k$  є результатом реконструкції. Якщо  $s_k$  перевищує поріг, спостереження вважають аномальним.

У схемах типу учитель-учень попередньо натренований екстрактор ознак, наприклад ResNet або EfficientNet, виступає в ролі учителя й формує багаторівневі карти ознак, тоді як легка модель учня вчиться відтворювати їх лише для

нормального режиму. Аномальність оцінюють за сумою відхилень між картами ознак, що дозволяє використовувати компактні моделі на краю з високою чутливістю до нетипових структур.

Методи класу PaDiM моделюють розподіли ознак у вигляді багатовимірних нормальних законів. Для кожної позиції або плитки області інтересу зберігають оцінки вектора середнього та коваріаційної матриці нормального стану, а на інференсі обчислюють відстань Махаланобіса:

$$A_p(x) = \sqrt{(z_p(x) - \mu_p)^T \Sigma_p^{-1} (z_p(x) - \mu_p)}, \quad (2.5)$$

де  $A_p(x)$  є локальним скором аномальності в позиції  $p$ ,  $z_p(x)$  є вектором ознак для цієї позиції,  $\mu_p$  є середнім значенням ознак у нормальному режимі,  $\Sigma_p$  є коваріаційною матрицею. Отримані значення використовують для побудови теплових карт з піксельною локалізацією аномальних зон.

Класичні алгоритми типу однокласового SVM та дерев ізоляції застосовують до глибинних ознак як легкі фільтри у каскаді. Вони відокремлюють область ознак, характерну для нормального стану, від решти простору й дозволяють швидко відкидати явні аномалії.

Модулі аномалій працюють з тими самими модальностями, що й загальний конвеєр контролю, і так само потребують синхронізації з G-кодом. Порогові значення та пов'язані дії роблять залежними від типу елемента, швидкості, температурних уставок і інтенсивності обдуву. Для стабілізації рішень комбінують порогову логіку з часовим згладжуванням, описаним у пункті 2.1, а у складних режимах використовують ансамблі моделей та голосування у ковзному вікні.

Моделі часових залежностей. Більшість дефектів FDM та FFF-друку розгортається у часі. Повільне відшарування кромки, накопичення ниткоутворення або зростання клубків типу spaghetti рідко фіксуються на одному кадрі, натомість проявляються у зміні текстур і контурів у послідовності кадрів. Тому покадрових моделей недостатньо, їх доповнюють часовими модулями.

Застосовують просторово-часові згорткові мережі з тривимірними ядрами, факторизованими на просторову та часову частини, а також згортково-рекурентні

моделі типу ConvLSTM. У таких структурах двовимірний бекбон, наприклад ResNet або MobileNetV3, перетворює кожний кадр на карту ознак, а часовий модуль оновлює прихований стан, що акумулює інформацію про попередні кадри. Глобальні часові залежності можуть моделювати й часові трансформери, проте для Raspberry Pi 5 частіше застосовують комбіновані схеми, де над буфером кількох останніх кадрів обчислюють прості дескриптори руху і подають їх до легких моделей.

У практичних системах важливу роль відіграють часові агрегатори, які усереднюють або згладжують миттєві шкідливі ризики. Для контролю нестабільності виходу вводять часову регуляризацию. Узагальнену форму такої втрати можна записати так:

$$L_{\text{temp}} = \lambda_{\text{temp}} \sum_t |\hat{y}_t - \hat{y}_{t-1}|, \quad (2.6)$$

де  $L_{\text{temp}}$  є додатковою часовою втратою,  $\hat{y}_t$  є прогнозним сигналом моделі на кроці часу  $t$ ,  $\hat{y}_{t-1}$  є прогнозом на попередньому кроці, а  $\lambda_{\text{temp}}$  визначає ступінь згладжування. Така регуляризація зменшує ймовірність спорадичних спалахів і робить сигнали рішень більш стабільними.

Часові моделі узгоджують з контекстом G-коду. Мітки шару та типу елемента, а також події ретрактів і переміщень без екструзії дають змогу адаптувати часові пороги до конкретних етапів побудови. Додаткове злиття відеоданих з телеметрією та віброакустичними ознаками розширює часовий контекст і дозволяє раніше виявляти кумулятивні відхилення.

Багатомодальне злиття даних. Контроль процесу FDM та FFF-друку є багатосенсорним, оскільки різні канали спостереження фіксують різні аспекти стану системи. Відеодані у видимому діапазоні та інфрачервоні зображення описують геометрію й теплові поля, акустичні та вібраційні сигнали відображають механічні події, а телеметрія принтера задає профілі швидкості, температур та обдуву, а також мітки G-коду.

Злиття модальностей може відбуватися на рівні даних, ознак або рішень. На рівні ознак кожна модальність має власний екстрактор, а потім результати поєднують у єдиний представник. На рівні рішень кожна гілка моделі повертає



власну оцінку ризику, які інтегрують у підсумковий скор. Типову схему такого злиття можна подати у вигляді:

$$S(x) = \sum_{m=1}^M w_m s^{(m)}(x), \quad (2.7)$$

де  $S(x)$  є інтегрованим скором для спостереження  $x$ ,  $s^{(m)}(x)$  є оцінкою ризику з  $m$ -ої модальності,  $w_m$  є ваговими коефіцієнтами, що відображають інформативність каналів.

Ваги модальностей доцільно робити залежними від контексту G-коду та телеметрії. На ранніх шарах, де вирішальне значення має адгезія до стола, більшу вагу надають інфрачервоному каналу, тоді як на високих шарах зростає роль RGB-каналу для виявлення ниткоутворення. За умов сильних відблисків або низького відношення сигналу до шуму у певному каналі його вагу тимчасово зменшують.

Під час навчання багатомодальних моделей використовують багатозадачні функції втрат та регуляризацию консистентності між модальностями, що обмежує паразитні розбіжності між ознаками там, де фізично очікується узгоджена поведінка. Ефект злиття оцінюють за приростом якості порівняно з найкращою одномодальною моделлю, а також за зниженням частоти хибних пауз за змін матеріалів, оптики та освітлення.

З погляду реалізації на Raspberry Pi 5 найбільш привабливими є схеми раннього або пізнього злиття з невеликою кількістю додаткових параметрів. Квантування до формату з розрядністю вісім бітів і прунінг застосовують до всіх гілок мережі, а в потоковому режимі підтримують окремі буфери для кожної модальності з єдиною часовою сіткою, синхронізованою з G-кодом.

### 2.3. Стратегії навчання моделей

Стратегії навчання моделей контролю FDM та FFF-друку мають враховувати багатомодальність, дисбаланс класів та обмежені ресурси платформи Raspberry Pi 5[81]. Основним інструментом є перенавчання попередньо натренованих екстракторів ознак. Бекбони ResNet, EfficientNet та MobileNetV3 ініціалізують вагами з великих наборів природних зображень, а потім виконують тонке

налаштування на доменному корпусі з урахуванням специфіки зони друку. Для інфрачервоних даних застосовують псевдоформат RGB або окремі легкі бекбони.

Аугментації будують так, щоб наближати реальні варіації сцени, не руйнуючи фізично правдоподібну структуру шва. Фотометричні перетворення моделюють зміни освітлення, геометричні перетворення зберігають масштаб тонких ниток, сенсорні аугментації додають шум, розмивання та відблиски. Синтетичні дефекти формують шляхом процедурної генерації ниткоутворення, провисань і структур типу spaghetti у межах реальної технологічної зони, що розширює покриття рідкісних сценаріїв.

Дисбаланс між нормою та дефектом компенсують завдяки фокальній втраті, описаній у пункті 2.2, а також завдяки класовим вагам, які враховують ефективну потужність вибірки. Для задач сегментації тонких структур застосовують втрату Tversky, наведеною у пункті 2.3. У багатозадачних постановках загальну функцію втрат задають як лінійну комбінацію складових. Узагальнений запис має вигляд:

$$L = \lambda_{\text{cls}} L_{\text{cls}} + \lambda_{\text{det}} L_{\text{det}} + \lambda_{\text{seg}} L_{\text{seg}}, \quad (2.8)$$

де  $L$  є сумарною втратою,  $L_{\text{cls}}$  є складовою для класифікації,  $L_{\text{det}}$  є складовою для детекції,  $L_{\text{seg}}$  є складовою для сегментації, а коефіцієнти  $\lambda_{\text{cls}}$ ,  $\lambda_{\text{det}}$ ,  $\lambda_{\text{seg}}$  визначають баланс між задачами.

Коефіцієнт навчання змінюють за схемами з розігрівом і подальшим плавним спаданням або за циклічними політиками, а для поетапного розморожування бекбону використовують різні значення для нижчих та вищих шарів. Для підвищення узагальнюваності застосовують згладжування міток, просторові методи відсікання ознак та дистиляцію знань, у межах якої важка офлайнова модель передає узагальнені представлення компактній моделі студенту, призначеній для роботи на краю.

Оцінювання узагальнюваності проводять за схемами розбиття даних, де окремі принтери або матеріали повністю виносять у тестовий корпус. Це дозволяє перевірити, наскільки стабільно модель працює у нових конфігураціях обладнання, оптики та освітлення без повторного навчання.

Метрики оцінювання. Оцінювання систем машинного контролю FDM та FFF-друку має враховувати не лише офлайнову точність моделей, а також експлуатаційні ризики, час реакції, стабільність роботи у різних конфігураціях і енергоефективність.

У задачах бінарної класифікації основні метрики визначають через співвідношення між істинно позитивними, хибнопозитивними та хибнонегативними спрацюваннями:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP}, Recall = \frac{TP}{TP+FN}, F_1 = \frac{2 Precision Recall}{Precision+Recall}, \quad (2.9)$$

де  $TP$  є кількістю істинно позитивних спрацювань,  $FP$  кількістю хибнопозитивних спрацювань,  $FN$  кількістю хибнонегативних рішень. Метрика  $Precision$  характеризує частку коректних спрацювань серед усіх спрацювань системи,  $Recall$  відображає частку виявлених дефектів серед усіх фактичних дефектів, а показник  $F_1$  узагальнює баланс між цими двома характеристиками. Площа під PR-кривою та ROC AUC інтегрують поведінку моделей за набором порогів; за рідкісних дефектів пріоритетною є саме площа під PR-кривою.

Для задач детекції оцінюють середню точність за набором порогів  $IoU$  з окремим виділенням середньої точності для дрібних об'єктів  $mAP_s$ . У задачах сегментації використовують показники узгодженості масок

$$IoU = \frac{|Y \cap \hat{Y}|}{|Y \cup \hat{Y}|}, Dice = \frac{2|Y \cap \hat{Y}|}{|Y| + |\hat{Y}|}, \quad (2.10)$$

де  $Y$  є множиною пікселів істинної маски дефекту,  $\hat{Y}$  множиною пікселів, що належать прогнозованій масці. Метрика  $IoU$  характеризує частку перетину масок у їх об'єднанні, тоді як коефіцієнт  $Dice$  підсилює вагу спільної частини, що є корисним для дрібних структур. Додатково аналізують  $boundary IoU$ , який чутливий до геометрії тонких ниток і провисань по краю шва.

Часову адекватність реакції описують показником  $Time to Detect$ , який задають як різницю між моментом появи дефекту та моментом застосування керувальної дії:

$$T_{det} = t_{action} - t_{defect}, \quad (2.11)$$

де  $t_{\text{defect}}$  є моментом виникнення дефекту в технологічному процесі,  $t_{\text{action}}$  моментом спрацювання політики втручання. Для повного тракту оцінюють дев'яносто п'ятий та дев'яносто дев'ятий перцентили  $T_{\text{det}}$ , а також частоту хибних пауз у перерахунку на годину друку. Надійність системи характеризують стійкістю наведених метрик до зміни принтерів, матеріалів, діаметра сопла, профілів охолодження та оптики на основі стратифікованого аналізу підкорпусів.

Інтегральну оцінку ризику визначають через очікувану вартість помилки

$$E[C] = C_{FN}P_{FN} + C_{FP}P_{FP}, \quad (2.12)$$

де  $E[C]$  є математичним сподіванням сумарних втрат,  $C_{FN}$  ваговим коефіцієнтом для невиявлених дефектів,  $C_{FP}$  ваговим коефіцієнтом для хибних спрацювань,  $P_{FN}$  емпіричною частотою хибнонегативних рішень,  $P_{FP}$  частотою хибнопозитивних спрацювань. Цей вираз інтерпретують як середню вартість помилки на один випадок друку, де невиявленим дефектам зазвичай надають значно більшу «ціну», ніж зайвим паузам. Під час настроювання порогів прийняття рішення прагнуть мінімізувати  $E[C]$  за умови дотримання жорстких вимог безпеки. Після вибору порогів додають часовий гістерезис та мінімальну тривалість підтвердження подій, щоб запобігти коливальним режимам і стабілізувати послідовність рішень.

Енергоефективність на платформі Raspberry Pi 5 описують кількістю кадрів за секунду на ват спожитої потужності та енергозатратами на один кадр:

$$\eta_{\text{FPS/W}} = \frac{\text{FPS}}{P}, E_{\text{frame}} = \frac{P}{\text{FPS}}, \quad (2.13)$$

де  $P$  є споживаною потужністю,  $\text{FPS}$  частотою обробки кадрів. Показник  $\eta_{\text{FPS/W}}$  відображає продуктивність системи за одиницю потужності, а  $E_{\text{frame}}$  визначає середню енергію, витрачену на аналіз одного кадру. Додатково відстежують стабільність частоти хибних пауз і Time to Detect протягом тривалих друків, а також каліброваність прогнозованих імовірностей за показниками Expected Calibration Error та Brier score до і після квантування та дистиляції моделей.

Реалізація системи контролю безпосередньо на тривимірному принтері або на периферійній обчислювальній платформі поруч із ним супроводжується жорсткими обмеженнями щодо обчислювальних ресурсів, енергоспоживання та допустимої затримки. Для відеопотоку формату 720p з частотою тридцять кадрів

за секунду цільовими характеристиками є стабільна робота модуля скринінгу з частотою не нижчою за діапазон від п'ятнадцяти до двадцяти п'яти кадрів за секунду та повний час реакції, співставний із тривалістю побудови шару.

Для досягнення таких вимог застосовують структурний і каналний прунінг, посттренувальне квантування ваг до формату з розрядністю вісім бітів, а за необхідності квантизаційно орієнтоване донавчання, що дозволяє зберегти чутливість до дрібних ознак. Поширеним є змішаний режим, за якого вхідні та вихідні шари виконуються у форматі підвищеної точності, а основні згорткові блоки використовують цілочисельне подання. Дистиляція знань з ресурсоемної офлайнової моделі до компактної моделі студента переносить стійкі ознаки та забезпечує прийнятний компроміс між точністю і швидкодією.

Значне скорочення обчислювального бюджету досягають за рахунок локалізації області інтересу навколо сопла та активної зони друку, а також застосування каскадної схеми, у межах якої легкий класифікатор виконує первинний скринінг, а детектор або сегментатор застосовується лише до підозрілих кадрів. Під час побудови мостів, тонких стінок та інших критичних структур частоту інференсу підвищують або використовують міжшаровий аналіз зображень високої роздільної здатності, тоді як на стабільних ділянках допустима менш щільна обробка кадрів.

Повний шлях від кадру до керувальної дії розкладають на послідовність етапів захоплення, попередньої обробки, інференсу, постобробки та виконання команди. Сумарну затримку описують співвідношенням:

$$\Delta t_{\text{tot}} = \Delta t_{\text{cap}} + \Delta t_{\text{pre}} + \Delta t_{\text{inf}} + \Delta t_{\text{post}} + \Delta t_{\text{act}}, \quad (2.14)$$

де  $\Delta t_{\text{tot}}$  є повним часом від появи ознаки дефекту до виконання команди,  $\Delta t_{\text{cap}}$  часом захоплення кадру,  $\Delta t_{\text{pre}}$  часом попередньої обробки та виділення області інтересу,  $\Delta t_{\text{inf}}$  часом інференсу моделі,  $\Delta t_{\text{post}}$  часом постобробки та формування рішення,  $\Delta t_{\text{act}}$  затримкою виконання дії прошивкою принтера. Таким чином кожна складова затримки може бути оптимізована окремо, а для превентивних політик контролюють не лише середнє значення  $\Delta t_{\text{tot}}$ , а також верхні перцентили, що визначають найгірші сценарії для критичних етапів друку.

Політики безпеки на периферійній платформі будують за принципом поєднання автоматичних рішень із участю оператора. Критичні втручання, які призводять до паузи або паркування, можуть виконуватися у двоступеневому режимі: спочатку формується пропозиція втручання, після чого оператор протягом обмеженого інтервалу часу підтверджує або скасовує дію. Для цілей аудиту та подальшого донавчання зберігають короткі відеофрагменти до і після подій разом із телеметрією та рішеннями політики.

Оновлення моделей на периферійній платформі організують через тіньовий режим. Нова версія моделі працює паралельно з робочою, не впливаючи на реальне керування, а її рішення використовують лише для накопичення статистики. Після аналізу цієї статистики переходять до поетапного увімкнення нової моделі для частини завдань. Моделі постачають у вигляді контейнеризованих артефактів з маніфестом сумісності та цифровим підписом, який перевіряють безпосередньо на пристрої. Повторне калібрування порогів і ймовірностей виконують на спеціальному доменному наборі реперних сцен, що охоплює різні типи елементів та умови освітлення, після чого уточнюють параметри гістерезису і мінімальну тривалість підтвердження подій з урахуванням цільових значень Time to Detect і допустимої частоти хибних пауз.

## 2.4. Робастність та узагальнюваність нейромережевої моделі

Робастність та здатність до узагальнення є ключовими властивостями систем візуального контролю FDM та FFF друку, оскільки в реальній експлуатації змінюються умови освітлення, матеріали, поверхні, оптика і профілі друку.[82] Стійкість починається з дисципліни формування зображення. Експозицію камери фіксують, баланс білого утримують сталим, застосовують стабільне безфлікерне освітлення, камеру калібрують з урахуванням внутрішніх параметрів та дисторсії. Площину стола описують гомографією:

$$\mathbf{x}_{\text{пл}} \sim H_{\text{geo}} \mathbf{x}_{\text{pix}}, \quad (2.15)$$

де  $\mathbf{x}_{\text{pix}}$  є вектором піксельних координат,  $\mathbf{x}_{\text{пл}}$  координатами у площині стола,  $H_{\text{geo}}$  матрицею проєктивного перетворення. Це дозволяє коригувати перспективні спотворення та переводити піксельні вимірювання у фізичні одиниці. На такій основі виділяють стабільну область інтересу навколо сопла і зони побудови, а кожну зміну оптики чи поля зору супроводжують повторним калібруванням і перевіркою метрик, зокрема boundary IoU для тонких ниток.

Щоб зменшити залежність від конкретної лабораторії, принтера або матеріалу, формують доменно інваріантні представлення. Застосовують самонавчання на великій вибірці нормальних відео, яка охоплює широкий спектр матеріалів, діаметрів сопел та оптичних схем, після чого виконують налаштування під задачі детекції, сегментації чи виявлення аномалій. На етапі узгодження з новими умовами використовують стильові аугментації, які моделюють варіації відблисків, блиску, спектрального складу освітлення та текстур фону, а також доменне рандомізування, що змушує модель спиратися на геометрично інваріантні ознаки. Для міжлабораторних сценаріїв застосовують методи узагальнення між доменами з вирівнюванням статистик нормування між корпусами даних різних принтерів і корекцією розподілів ознак.

Коли розподіл цільових даних суттєво відрізняється від навчального, виконують легку доменну адаптацію. Оновлюють лише афінні параметри шарів нормування за буфером неанотованих фрагментів або навчають додаткову компактну голову над замороженим бекбоном. Пороги ймовірностей та мінімальні площі масок пов'язують з контекстом G-коду, який враховує тип елемента, швидкість, температури та сигнали вентиляторів. Це дозволяє одній моделі зберігати узгоджену поведінку для периметрів, заповнень і мостів без повного перенавчання.

За наявності доменної варіативності особливого значення набуває калібрування ймовірностей і явне врахування невизначеності. Застосовують температурне масштабування та ізотонну регресію на спеціальних валідаційних підмножинах, оцінюють Expected Calibration Error та логарифмічну втрату, знижують надмірну впевненість моделі у граничних випадках. Для оцінювання

невизначеності використовують монте-карлівський dropout під час інференсу, ансамблі легких моделей після дистиляції та тестове аугментування з наступною агрегацією. Якщо сумарна впевненість низька або розкид прогнозів великий, система переходить до вибіркового передбачення і відмовляється від автоматичної дії, передаючи кадр на повільнішу верифікацію або операторові.

Робастна система повинна розпізнавати вихід за навчений розподіл, зокрема появу нових типів дефектів або різкі зміни сцени. Для цього застосовують щільнісні моделі у просторі ознак, відстань Махаланобіса, карти відхилень типу PaDiM та енергетичні скорингові функції. Паралельно відстежують базові статистики сцени, пов'язані з яскравістю, контрастом і текстурними індикаторами. За порогових відхилень система активує захисний профіль з підвищеним гістерезисом та зменшеною агресивністю втручання, одночасно накопичуючи буфер даних для подальшої адаптації.

Стресове тестування проводять шляхом моделювання типових корупцій, які істотно впливають на працездатність. Аналізують зміну колірної температури, локальні пересвічення, бліки, легкий дефокус, шум сенсора, вібраційне змазування, часткові перекриття поля зору та зниження частоти кадрів. Робастність оцінюють за деградацією метрик відносно чистих умов, частотою хибних пауз, а для сегментаційних задач додатково контролюють boundary IoU для тонких структур. Узагальнюваність перевіряють стратифікованими протоколами розбиття даних за типом принтера, матеріалу та оптики, аналізують різницю між внутрішньодоменими і зовнішньодоменими метриками та включають сценарний аналіз для раннього відриву, наростання spaghetti й дрібних провисань.

Важливою складовою робастності є посилення політик контекстом G-коду та телеметрії. Адаптивні пороги, допустимі шаблони текстур і тривалості аномалій визначають з урахуванням температур, швидкостей, прискорень, сигналів вентиляторів, індикаторів ретрактів і міток типу елемента. У найпростішому вигляді порогове значення можна подати як функцію контексту:

$$\theta_{\text{eff}} = f_{\theta}(v, a, T_{\text{noz}}, T_{\text{bed}}, q_{\text{fan}}), \quad (2.16)$$



де  $\theta_{\text{eff}}$  є ефективним порогом спрацювання,  $v$  та  $a$  локальними швидкістю і прискоренням,  $T_{\text{noz}}$  і  $T_{\text{bed}}$  температурами сопла та платформи,  $q_{\text{fan}}$  інтенсивністю обдуву. Такий підхід дозволяє інтерпретувати частину доменних відмінностей як керовані зміни режимів друку, а не як дефекти.

## 2.5. Удосконалення методів машинного навчання для контролю роботи 3D-принтера

Метою цього розділу є опис рішень у сфері машинного навчання, які підвищують чутливість моделей до дрібних дефектів FDM та FFF друку, зберігають працездатність за обмежених ресурсів мінікомп'ютера та безпечно вбудовуються у контур керування тривимірного принтера. Особливу увагу приділено формуванню спеціалізованого корпусу даних, організації розмітки, побудові багатомодальних ознак, структурі аугментацій і зниженню витрат ручної праці розмітників [83].

Корпус даних формують з урахуванням того, що дефекти розподілені нерівномірно за часом і по площі робочого поля. Щоб зменшити частку малокорисних прикладів, застосовують принцип вибірки з урахуванням ризику. Для кожного кадру з індексом  $i$  обчислюють індикатор ризику  $r_i$ , який поєднує інформацію про тип елемента, локальні швидкості та прискорення, режими нагрівання і обдуву. Ймовірність включення кадру до навчальної вибірки задають у нормованому вигляді:

$$p_i = \frac{r_i}{\sum_j r_j}, \quad (2.17)$$

де  $p_i$  є ймовірністю відбору кадру. Підвищену увагу приділяють першим шарам, мостам, нависанням, тонким стінкам, ділянкам різкої зміни швидкості та напрямку руху, а також зонам із підвищеною температурою сопла чи стола. Одночасно підтримують збалансоване представлення різних принтерів, матеріалів, діаметрів сопел, профілів друку та умов освітлення.

Відеозображення доповнюють віброакустичними сигналами та телеметрією. Синхронізацію між відео, акустикою та телеметрією виконують із фіксацією

похибки вирівнювання у метаданих, що дає змогу аналізувати часові залежності та уникати помилок через зміщення міток. Узгодженість часових шкал кількісно оцінюють середньою похибкою синхронізації:

$$\varepsilon_{sync} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |t_i^{vid} - t_i^{tel}|, \quad (2.18)$$

де  $t_i^{vid}$  є часовою міткою  $i$ -го кадру відео,  $t_i^{tel}$  є часовою міткою відповідного телеметричного запису,  $N$  є кількістю зіставлених пар подій. Практичну вимогу до узгодження задають як обмеження:

$$\varepsilon_{sync} \leq \varepsilon_{max}, \quad (2.19)$$

де  $\varepsilon_{max}$  є допустимою межею похибки синхронізації, що забезпечує коректну інтерпретацію причинно-наслідкових зв'язків між візуальними ознаками та технологічними параметрами. На основі G-коду додатково виділяють критичні фази друку, які використовують під час вибірки, аугментацій та налаштування порогів спрацювання.

За наявності перспективних спотворень оцінюють перетворення площини стола, щоб коректно пов'язати піксельні координати з реальними розмірами та точніше інтерпретувати геометрію дефектів. Для цього застосовують гомографію, яку задають співвідношенням:

$$\lambda \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

де  $\mathbf{H}$  є матрицею перетворення,  $(x', y)$  є координатами пікселя у вихідному кадрі,  $(x', y')$  є координатами у випрямленій площині,  $\lambda$  є масштабним множником.

Аугментації даних узгоджують із фізикою процесу. Фотометричні перетворення включають помірні зміни яскравості та кольоропередачі і появу слабких відблисків, які моделюють варіації освітлення без втрати дрібних структур. Для інфрачервоних каналів застосовують нормування температурних карт і зміни ефективної емісійності, що відображає відмінності між матеріалами та поверхнями. Геометричні перетворення обмежують так, щоб товщина нитки залишалася розрізняваною, а зміщення області інтересу не призводило до втрати критичних ділянок. У релевантних зонах вводять синтетичні дефекти у вигляді

процедурно змодельованих ниток, локальних провисань, відшарувань або фрагментів типу spaghetti, причому сценарії їх розміщення узгоджують із реальними спостереженнями.

Для поєднання глобального контексту сцени та високої роздільної здатності дрібних елементів застосовують двоступеневу організацію даних. Спочатку аналізують повні кадри з оглядом усієї області друку, після чого автоматично виокремлюють плитки помірною розміру з частковим перекриттям. Щільність плиток збільшують у зоні сопла та вздовж крамок моделі, тоді як стабільні ділянки аналізують рідше. Дисбаланс між класами норма і дефект враховують уже на етапі формування вибірки, зменшуючи частку надмірно однотипних нормальних сцен і підсилюючи представленість рідкісних типів дефектів, а також відбираючи складні негативні приклади зі значною фактурою або вираженими відблисками без реального браку.

Протоколи розмітки даних стандартизують, щоб зменшити неоднозначність. Для бінарної класифікації використовують кадрові ярлики, для детекції прямокутні рамки, для сегментації щільні маски, а для аналізу динаміки дефектів подієві мітки початку та завершення відхилення. Для тонких структур задають вимоги до мінімальної ширини контуру та масштабу, значну частину корпусу розмічають незалежно кілька фахівців із подальшим аналізом узгодженості. Суперечливі випадки розглядають спільно, формуючи єдині правила. У підсумку корпус супроводжують паспортом із описом принтерів, матеріалів, діаметрів сопел, оптики, профілів друку, освітлення, версій прошивок і програмного забезпечення та співвідношенням між нормальними і дефектними прикладами, що забезпечує коректну інтерпретацію експериментальних результатів.

Щоб зменшити витрати на ручну розмітку, застосовують активне навчання. Попередньо навчена модель аналізує нерозмічені дані, після чого для фрагмента хобчислюють інтегральну оцінку інформативності:

$$s(x) = \alpha u(x) + (1 - \alpha) d(x), \quad (2.21)$$

де  $u(x)$  є показником невизначеності моделі,  $d(x)$  є мірою різноманітності або віддаленості фрагмента від уже розміченого корпусу,  $\alpha$  є ваговим коефіцієнтом.

Фрагменти з найбільшими значеннями  $s(x)$  передають на ручну розмітку та подальше донавчання, після чого цикл повторюють, послідовно уточнюючи модель на найскладніших сценах. Такий підхід підтримує високу чутливість до дрібних дефектів за рахунок обмеженого обсягу ретельно відібраних розмічених даних і підвищує практичну придатність системи для тривалої експлуатації на реальних FDM-принтерах.

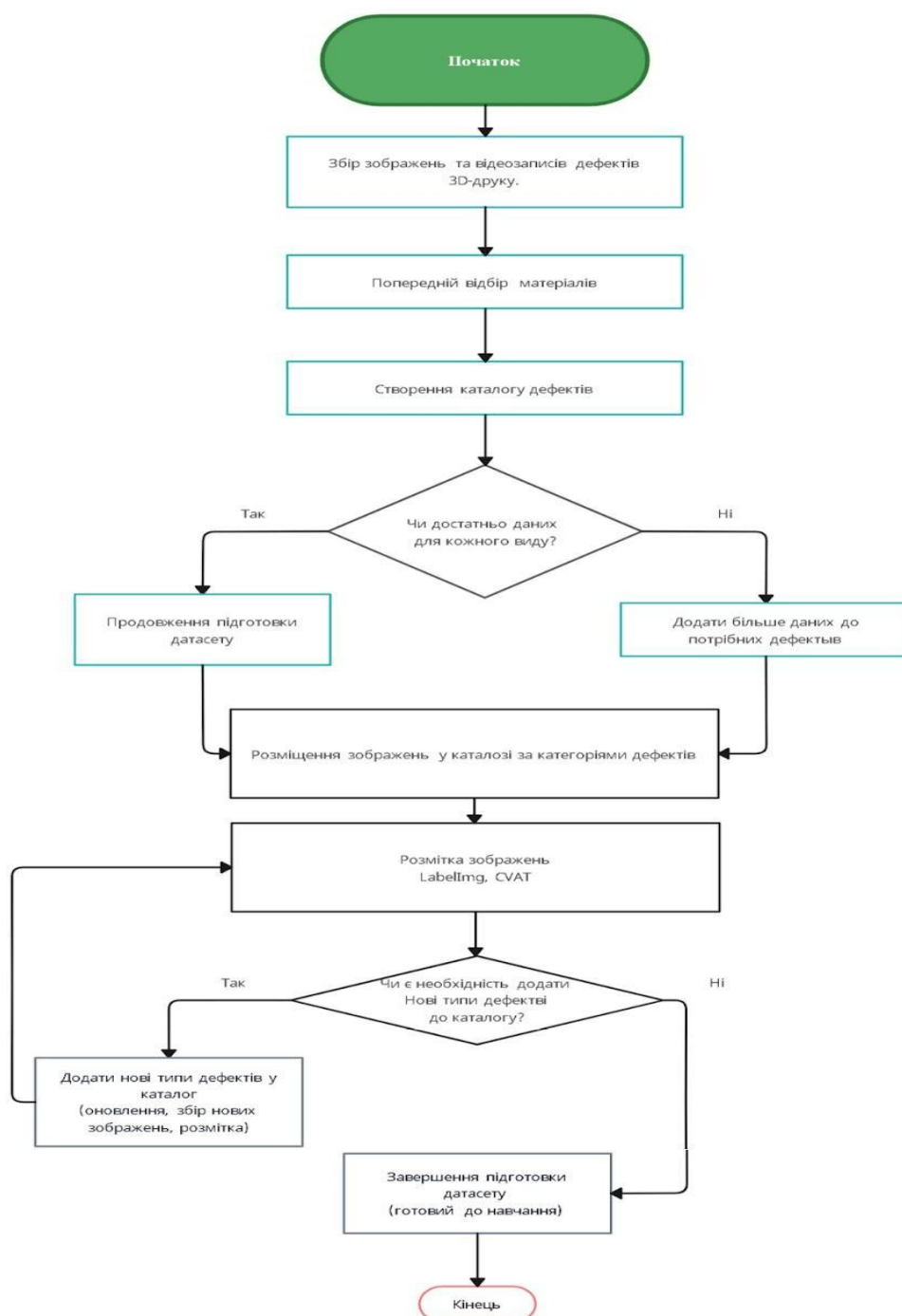


Рис. 2.2. Узагальнена блок схема формування корпусу зображень дефектів FDM друку

Узагальнена послідовність етапів формування корпусу з урахуванням ризику подана у вигляді блок схеми на рисунку 2.2, де послідовно відображено збирання зображень, попередній відбір матеріалів, формування каталогу дефектів, перевірку повноти, розмітку, розширення корпусу та випуск готового датасета.

## 2.6. Адаптація архітектур під дрібні дефекти

Адаптація архітектур нейромереж до виявлення малорозмірних дефектів пов'язана з необхідністю зберігати високу просторову роздільну здатність ознак та обмежувати обчислювальну складність. У контурі раннього скринінгу застосовують бекбони класу ResNet-18 або ResNet-34, а також легковагові модифікації EfficientNet Lite з малим початковим кроком дискретизації [84]. Перший згортковий блок налаштовують із кроком, що дорівнює одиниці, а на середніх рівнях використовують дилатовані згортки, завдяки чому зберігається детальна карта ознак при помірному зростанні кількості операцій. Голову класифікатора будують у вигляді глобального середнього агрегування ознак із компактною багат шаровою мережею, а за потреби додають механізми уваги за каналами.

Таблиця 2.2

Орієнтовні профілі моделей для розгортання на Raspberry Pi 5

Клас моделі	Основне призначення	Орієнтовна частота аналізу на Raspberry Pi 5	Типовий режим застосування
ResNet 18 або подібний класифікатор	Скринінг норма проти дефект	приблизно двадцять тридцять кадрів за секунду для області інтересу формату сімсот двадцяти рядків	безперервний аналіз області інтересу навколо сопла та зони побудови
Детектор з рівнем P2 у піраміді	Локалізація дрібних дефектів	близько десяти двадцяти кадрів за секунду в перерахунку на еквівалент повного кадру за умови вибіркового запуску	вибірковий аналіз плиток у зонах підвищеного ризику, визначених

Клас моделі	Основне призначення	Орієнтовна частота аналізу на Raspberry Pi 5	Типовий режим застосування
			скринінгом та G-кодом
U-Net або DeepLabv3 плюс на ROI	Побудова масок дефектів і керувальних зон	від одного до п'яти кадрів за секунду для локальної області інтересу	міжшаровий або локальний режим, запуск у паузах між шарами або в локальному вікні

Для детекції дрібних дефектів застосовують архітектури з пірамідою ознак, які містять низькорівневий рівень P2 для об'єктів малого розміру, реалізований за допомогою легких згорток з розділенням за каналами. Голову детектора будують за безякорним принципом, коли модель оперує центрами об'єктів і параметрами прямокутників без фіксованих анкорів, що полегшує адаптацію до змін масштабу та перспективи. Для сегментації масок дефектів ефективно застосовують U Net та DeepLabv3 плюс із полегшеним декодером і пропускними з'єднаннями, що передають дрібні деталі з ранніх шарів і можуть підсилюватися контурними гілками або модулями уваги.

Стислий огляд типових моделей для розгортання на Raspberry Pi п'ятого покоління узагальнено у таблиці 2.1. У ній класифікатор на базі ResNet 18 описано як безперервний скринер із найвищою частотою аналізу, детектор з рівнем P2 як інструмент локалізації дрібних дефектів у вибіркового режимі, а сегментатори U Net та DeepLabv3 плюс як повільніший, але точний засіб побудови масок у критичних фазах друку.

Важливий ефект дає багатозадачний дизайн, за якого один бекбон спільний для класифікації, детекції та сегментації. Загальну функцію втрат задають так:

$$L = \lambda_{\text{cls}} L_{\text{cls}} + \lambda_{\text{det}} L_{\text{det}} + \lambda_{\text{seg}} L_{\text{seg}} \quad (2.22)$$

де  $L$  є сумарною функцією втрат,  $L_{\text{cls}}$  є складовою для класифікації,  $L_{\text{det}}$  є складовою для детекції,  $L_{\text{seg}}$  є складовою для сегментації, а  $\lambda_{\text{cls}}$ ,  $\lambda_{\text{det}}$ ,  $\lambda_{\text{seg}}$  є ваговими коефіцієнтами, що визначають пріоритетність відповідних задач. У режимі роботи на вбудованій платформі пріоритет надають класифікаційній голові, тоді як

детектор і сегментатор активують з нижчою частотою або лише для підмножини кадрів, завдяки чому обчислення бекбону виконуються один раз, а узгодженість між рівнями аналізу зберігається.

Для підсилення чутливості до локальних нерівностей шва вибірково застосовують деформівні згортки у верхніх рівнях піраміди ознак або декодера, що дозволяє адаптивно підлаштовувати приймальні області до хвилястих поверхонь реальних шарів. Для кращої просторової прив'язки до координат корисними є модулі типу CoordConv на ранніх рівнях, насамперед у зоні сопла. Зважаючи на чутливість деформівних згорток до квантування, їх супроводжують коротким циклом квантизаційно усвідомленого донавання. Ефективність архітектурних рішень перевіряють абляційними дослідженнями, де порівнюють варіанти кроків дискретизації, значення дилатації, структуру піраміди ознак, типи голів детектора та наявність контурних і деформівних гілок, а оцінювання проводять не лише за точністю, а й за часом до спрацювання, частотою хибних пауз та очікуваною вартістю помилки.

Часові та багатомодальні розширення. У базовій постановці модель оцінює ризик дефекту для кожного кадру незалежно, проте практичне рішення має бути подієвим, стійким до одиничних артефактів і узгодженим з кількома інформаційними каналами. Тому до контуру розпізнавання додають часові агрегатори та багатомодальні модулі. Часовий контекст реалізують у вигляді ковзних вікон різної довжини або експоненційного згладжування скорів із подальшим голосуванням у часовому вікні та гістерезисом між порогами активації і деактивації, завдяки чому система не реагує на короточасні шуми, але швидко фіксує стійкі аномалії.

Для дефектів із виразною часовою структурою, таких як повільне відшарування кромки або наростання spaghetti, використовують легкі послідовні моделі класу ConvLSTM або ConvGRU з невеликою кількістю шарів, які працюють над картами ознак та накопичують інформацію в прихованих станах. Якість подієвих рішень оцінюють за часом до виявлення дефекту, частотою хибних пауз

у перерахунку на годину друку та залежністю цих величин від параметрів часових агрегаторів.

Багатомодальне розширення передбачає спільну обробку відео, інфрачервоних зображень, акустико вібраційних сигналів і телеметрії. Після вирівнювання каналів за часом і нормування їх перетворюють у вектори ознак, які об'єднують у єдине представлення та подають на багат шаровий перцептрон або на схему змішування експертів. Інтегральну оцінку ймовірності дефекту у схемі змішування експертів задають наступним чином:

$$\hat{p}_k = \sum_{m=1}^{M_{\text{exp}}} w_m(\xi_k) \hat{p}_k^{(m)} \quad (2.23)$$

де  $\hat{p}_k$  є об'єднаною ймовірністю дефекту у момент часу  $k$ ,  $\hat{p}_k^{(m)}$  є виходом  $m$ -го експерта,  $M_{\text{exp}}$  є кількістю експертних підмоделей,  $w_m(\xi_k)$  є ваговими коефіцієнтами, що залежать від вектора контекстних змінних  $\xi_k$ , до якого входять телеметрія та тип елемента за G кодом. Пороги та ваги модальностей роблять залежними від технологічного контексту, а м'які та жорсткі дії прив'язують до тривалості перевищення порогів у часі.

## 2.7. Навчання моделей та забезпечення узагальнюваності

Навчання моделей для виявлення дефектів FDM друку відбувається за умов обмеженої кількості анованих даних, значної варіативності оптики, матеріалів і профілів друку та потреби переносити моделі між різними принтерами без суттєвого зростання латентності [85]. Використовують перенесення навчання з поступовим розморожуванням шарів, де вихідні моделі ResNet, EfficientNet та MobileNetV3 ініціалізують параметрами, отриманими на великих загальних наборах зображень. Спочатку навчають лише вихідну голову, потім поетапно розморожують згорткові блоки з різними коефіцієнтами навчання. Для інфрачервоних каналів використовують псевдо RGB або спеціальні початкові згортки.

Додатково застосовують дистиляцію знань, коли потужна офлайнова модель вчитель формує м'які цілі у вигляді розподілів ймовірностей або просторових карт



ознак, а компактна модель учень мінімізує розбіжність між власними логітами та логітами вчителя. Самонавчальні та напівконтрольовані підходи спираються на велике зібрання нормальних сцен, де модель навчається доменно релевантному простору ознак, а потім донавчається на обмеженому наборі ручних анотацій. Для подальшого розширення корпусу використовують псевдорозмітку з контрольованою довірою, узгоджуючи рішення різних гілок і модальностей.

Проблему дисбалансу класів розв'язують спеціальними функціями втрат та стратегіями вибірки. Для бінарної класифікації застосовують фокальну функцію втрат, яку задають наступним чином:

$$L_{\text{foc}} = -\alpha(1 - \hat{p})^{\gamma} y \ln \hat{p} - (1 - \alpha) \hat{p}^{\gamma} (1 - y) \ln(1 - \hat{p}) \quad (2.24)$$

де  $L_{\text{foc}}$  є значенням фокальної втрати для одного прикладу,  $y$  є істинною бінарною міткою,  $\hat{p}$  є передбаченою ймовірністю дефекту,  $\gamma$  є параметром, що посилює внесок складних прикладів,  $\alpha$  є коефіцієнтом балансування класів. У задачах сегментації тонких масок ефективною є Tversky втрата. Індекс Tversky визначають так:

$$TI = \frac{TP}{TP + \alpha FN + \beta FP} \quad (2.25)$$

а відповідну функцію втрат задають як:

$$L_{\text{Tv}} = 1 - TI \quad (2.26)$$

де  $TI$  є значенням індексу Tversky,  $TP$  є кількістю істинно позитивних пікселів,  $FN$  є кількістю хибнонегативних пікселів,  $FP$  є кількістю хибнопозитивних пікселів, а  $\alpha$  та  $\beta$  визначають відносні штрафи за пропуски дефектів і хибні спрацювання.

Важливою складовою є вибір робочих порогів як розв'язок задачі мінімізації очікуваного ризику. Очікувану вартість помилки для порога  $\tau$  задають так:

$$\mathbb{E}[\text{Cost}(\tau)] = C_{\text{FN}} P_{\text{FN}}(\tau) + C_{\text{FP}} P_{\text{FP}}(\tau) \quad (2.27)$$

де  $\mathbb{E}[\text{Cost}(\tau)]$  є математичним сподіванням вартості помилки,  $C_{\text{FN}}$  та  $C_{\text{FP}}$  є вартостями пропуску дефекту та хибної паузи,  $P_{\text{FN}}(\tau)$  та  $P_{\text{FP}}(\tau)$  є відповідними ймовірностями. Оптимальний поріг визначають як:

$$\tau^* = \underset{\tau}{\operatorname{argmin}} \mathbb{E}[\text{Cost}(\tau)] \quad (2.28)$$

де  $\tau^*$  є значенням порога, що мінімізує очікувану вартість помилки для заданого співвідношення вартостей. Після вибору базового порога вводять гістерезис і мінімальну тривалість підтвердження події у часовому контурі.

Адаптацію в режимі виконання здійснюють переважно через оновлення параметрів нормування та калібрування виходів. Під час друку еталонних виробів, які вважаються нормальними, послідовно оновлюють афінні параметри шарів пакетного нормування, підлаштовуючись до конкретної оптики, освітлення і властивостей матеріалу. Після квантування та дистиляції виконують калібрування температурним масштабуванням, а дрейф даних контролюють методами на основі відстані Махаланобіса або карт відхилень у просторі ознак. У разі виявлення суттєвих відмінностей система переходить до консервативнішого профілю роботи або вимагає втручання оператора.

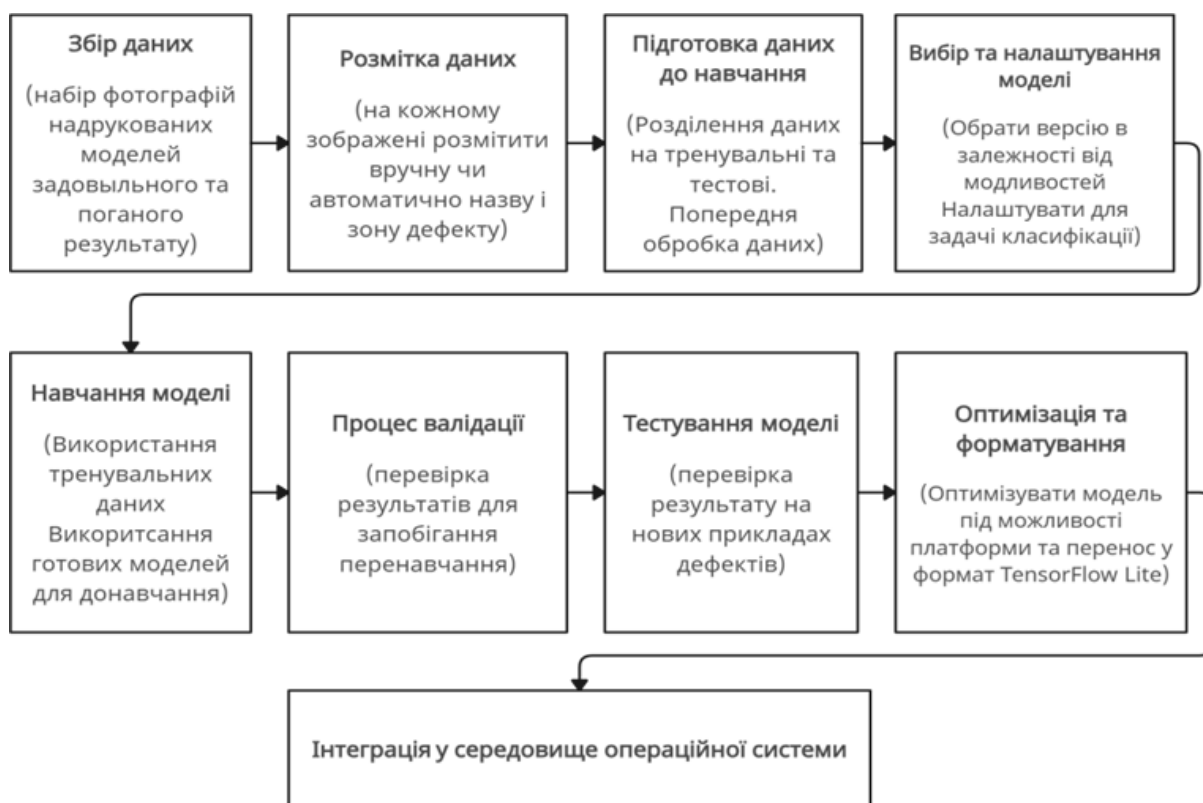


Рис. 2.3. Алгоритм навчання моделі контролю якості FDM друку методом вчителя

Загальний цикл побудови моделі контролю якості FDM друку з навчанням з учителем подано на рисунку 2.3, де блоками відображено етапи збирання та розмітки даних, їх підготовки до навчання, вибору і налаштування архітектури, подальшого навчання, валідації і тестування, оптимізації та форматування моделі під апаратні обмеження, а також інтеграції у середовище операційної системи 3D принтера.

Калібрування невизначеності та порогів. Метою цього підпункту є підвищення надійності рішень через коректну оцінку невизначеності моделей, калібрування їхніх імовірнісних виходів та формальне налаштування порогів спрацювання з урахуванням вартості помилок і технологічного контексту G коду. Для оцінювання довіри до прогнозу використовують стохастичні ансамблі або MC dropout. Нехай для одного кадру виконано  $K$  стохастичних прогонів моделі, а через  $p^{(k)}$  позначено ймовірність дефекту під час  $k$  го прогону. Тоді середню ймовірність та дисперсію оцінюють так:

$$\hat{p} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p^{(k)}, \quad \widehat{Var}(p) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (p^{(k)} - \hat{p})^2 \quad (2.28)$$

де  $\hat{p}$  є оцінкою середньої ймовірності дефекту, а  $\widehat{Var}(p)$  є оцінкою епістемічної невизначеності для даної сцени. Зростання дисперсії інтерпретують як домінування епістемічної невизначеності та підставу для ескалації події до оператора або потужнішої моделі.

Калібрування ймовірностей виконують методом температурного масштабування. Нехай  $z$  є вектором логітів, тоді калібрований вектор ймовірностей має вигляд:

$$\tilde{p} = \text{softmax}(z/T) \quad (2.29)$$

де  $\tilde{p}$  є вектором відкаліброваних ймовірностей,  $z$  є вектором логітів до калібрування, а  $T$  є параметром температури, який добирають на відкладеній вибірці, мінімізуючи негативну логарифмічну правдоподібність або показник похибки калібрування. Очікувану похибку калібрування ECE визначають через розбиття діапазону довіри на  $M$  бінів:

$$ECE = \sum_{m=1}^M \frac{|B_m|}{N} |acc(B_m) - conf(B_m)| \quad (2.30)$$

де  $|B_m|$  є кількістю прикладів у  $m$  му біні,  $N$  є загальною кількістю прикладів,  $acc(B_m)$  є емпіричною точністю у цьому біні,  $conf(B_m)$  є середньою передбаченою впевненістю. Параметр  $T$  налаштовують окремо для різних модальностей та для їх спільного виходу після квантування, прунінгу й дистиляції.

Для часової стабілізації ризику використовують експоненційне ковзне середнє миттєвих скорів  $r_t$  за формулою:

$$R_t = \alpha r_t + (1 - \alpha) R_{t-1} \quad (2.31)$$

де  $R_t$  є згладженою оцінкою ризику у момент часу  $t$ ,  $r_t$  є миттєвим скором, а  $\alpha$  є параметром, що визначає компроміс між чутливістю до нових подій і довжиною пам'яті. Подієве рішення приймають з урахуванням значення  $R_t$ , гістерезисних порогів і голосування у ковзному вікні сталої довжини, що запобігає миготінню контуру.

Таблиця 2.3

Джерела невизначеності та засоби їх калібрування

Джерело невизначеності	Приклад прояву	Інструмент оброблення
Епістемічна	Новий принтер або матеріал, недостатній обсяг даних	MC dropout, ансамблі, активне навчання
Алеаторна	Шум зображення, коливання освітлення, дрібні вібрації	Фізично обґрунтовані аугментації, робастні функції втрат
Декалібровані ймовірності	Надмірна впевненість під час помилкових рішень	Temperature scaling, мінімізація показника ECE
Контекстна невідповідність	Залежність від міток типу елемента, швидкості та температур за G кодом	Адаптивні пороги, контекстно залежні вагові коефіцієнти

У таблиці 2.3 узагальнено основні джерела невизначеності та засоби їх оброблення. Епістемічну невизначеність, пов'язану з новим принтером або матеріалом, пропонують зменшувати ансамблями, MC dropout і активним

навчанням. Алеаторну невизначеність, зумовлену шумом зображення, коливаннями освітлення або дрібними вібраціями, пропонують пом'якшувати фізично обґрунтованими аугментаціями та робастними функціями втрат. Декалібровані ймовірності усувають температурним масштабуванням та мінімізацією ESE, а контекстну невідповідність компенсують адаптивними порогами та контекстно залежними ваговими коефіцієнтами.

У практичній конфігурації для оцінки невизначеності часто використовують MC dropout із сталою кількістю проходів, наприклад  $K$  дорівнює десять. Консервативний ризик визначають за високим перцентилем розподілу, пороги добирають як мінімізатори очікуваної вартості, узгоджені з калібруванням і стабільністю, а часову стабілізацію доповнюють голосуванням більшості у ковзному вікні. Інтеграція конформного калібрування та режиму вибіркового відмов дозволяє відмовлятися від автоматичного рішення для прикладів із високою невизначеністю, передавати їх операторові або потужнішій моделі та зменшувати частоту хибних пауз без погіршення безпеки.

## **2.8. Інтеграція з контуром керування та оптимізація під Raspberry Pi 5**

Інтеграція модулів машинного навчання з контуром керування 3D принтером реалізує принцип безпеки за задумом і спирається на стратифікацію подій, регламентовану взаємодію з прошивкою, повний аудит дій та участь оператора. Події відносять до рівнів A, B та C. Для рівня A, що відповідає безумовним аварійним ситуаціям термічного або електричного характеру, негайно видають команду EMERGENCY STOP, виконують паркування вузлів і контрольоване охолодження та забороняють автоматичне відновлення друку.[86] Для рівня B, що з високою імовірністю відображає дефект і загрожує якості або безпеці, система формує команду PAUSE, паркує сопло, зберігає маркований кадр і за потреби виконує малі безпечні корекції режимів із обмеженням швидкості змін. Для рівня C, що відповідає низькій впевненості або конфлікту модальностей, система обмежується повідомленням, журналюванням і буферизацією даних для

подальшого аналізу та донавчання без втручання у процес друку. Стратифікацію подій і відповідні політики втручання подано у таблиці 2.4.

Для рівня В задають мінімальну тривалість аномалії разом із гістерезисом порогів, що зменшує кількість небажаних пауз і підвищує передбачуваність поведінки системи. Взаємодію з прошивкою організовують як транзакційний обмін командами, де сеанс друку має унікальний ідентифікатор, а критичні послідовності команд розглядають як атомарні транзакції. Підсистема аудиту фіксує часові мітки, рівень події, значення скорів до та після калібрування, застосовані пороги, контекст G коду та телеметрію, збережені кадри, список команд і відповіді прошивки, рішення оператора та віднесення події до хибнопозитивної або хибнонегативної. Роль оператора реалізують через інтерфейс із відображенням релевантного кадру з накладеними масками або рамками, поясненням причини втручання та індикаторами впевненості й невизначеності, що забезпечує кероване рішення від відновлення друку до повного переривання з оглядом виробу. Інженерні інваріанти безпеки охоплюють безпечні траєкторії з підняттям осі Z, контрольоване охолодження після аварійних зупинок, заборону відновлення без відтворення контексту, обмеження частоти пауз та незалежний модуль нагляду для виявлення зависань.

Таблиця 2.4

## Рівні подій і політики втручання

Рівень	Характер події	Типові ознаки	Дії системи
A	Безумовна аварійна ситуація режим hard stop	Перегрів, розрив термодатчика, критичні збої живлення чи електроніки	Негайна команда EMERGENCY STOP, паркування вузлів, контрольоване охолодження, заборона автоматичного повторного запуску
B	Подія, що з високою імовірністю відповідає дефекту	Стійкий високий ризик, узгоджений із G кодом і телеметрією	Команди PAUSE та PARK, збереження маркованого кадру, малі безпечні корекції з обмеженням швидкості змін режимів
C	Подія з низькою впевненістю	Значення оцінки ризику поблизу порогів, висока невизначеність, конфлікт модальностей	Повідомлення та журналювання, буферизація даних для подальшого аналізу та донавчання без втручання у процес друку

Оптимізація під Raspberry Pi 5 орієнтується на роботу, наближену до реального часу, за обмежених ресурсів обчислення. Цільовими параметрами є аналіз близько п'ятнадцяти-двадцяти п'яти кадрів за секунду для області інтересу з роздільністю 720 p та латентність від події до дії для рівня В у межах приблизно 150-300 мілісекунд за 95 перцентилем. Зниження обчислювальної складності досягають квантуванням, структурним прунінгом і дистиляцією знань. Для критичних шарів застосовують навчання з урахуванням квантування до формату INT8, тоді як найбільш чутливі вузли можуть залишатися у форматах FP16 або FP32, а на практиці використовують змішаний режим FP16-INT8 як компроміс між точністю та швидкодією. Післятренувальне квантування на репрезентативній вибірці доповнюють повторним калібруванням температурного масштабування, а структурний прунінг каналів у піраміді ознак і декодері супроводжують коротким донавчанням для відновлення точності.

Функцію втрат у режимі дистиляції подано співвідношенням:

$$L = L_{task} + \lambda D_{KL}\{p_T \parallel p_S\}, p_T = \sigma(\mathbf{z}^T/T), p_S = \sigma(\mathbf{z}^S/T) \quad (2.32)$$

де  $L$  – є сумарною функцією втрат,  $L_{task}$  є втратою основної задачі контролю,  $D_{KL}$  є дивергенцією Кульбака-Лейблера між розподілами  $p_T$  та  $p_S$ ,  $\mathbf{z}^T$  і  $\mathbf{z}^S$  є логітами моделі вчителя та моделі учня,  $\sigma$  є оператором softmax,  $T$  є температурою дистиляції,  $\lambda$  є вагою додаткового члена.

Для економії обчислень інференс обмежують областю інтересу та плитковою обробкою, коли швидкий модуль локалізує зону друку, а основна модель працює лише в межах цієї зони або на плитках фіксованого розміру з малим перекриттям, причому масштаб області інтересу змінюють відповідно до типу елемента за G кодом. Системний конвеєр реалізують із нульовим копіюванням, асинхронними чергами захоплення, препроцесингу, інференсу й постобробки та з вибірковою верифікацією спірних кадрів. Пам'ять організують на основі фіксованих буферів із прямим доступом, а енергоспоживання зменшують адаптивним інференсом, який знижує частоту викликів моделі в стабільних режимах і підвищує її за зростання ризику. Після квантування та прунінгу виконують повторну валідацію

каліброваності, метрик виявлення й латентності, після чого оптимізовану модель розгортають на Raspberry Pi 5 за умови підтвердження прийнятних характеристик.

Оптимізація моделей і програмного конвеєра орієнтується на роботу, наближену до реального часу, за обмежених ресурсів Raspberry Pi 5. Цільовими є частота аналізу приблизно п'ятнадцять двадцять п'ять кадрів за секунду для області інтересу з роздільністю сімсот двадцять p та латентність від події до дії для подій рівня B у діапазоні приблизно сто п'ятдесят триста мілісекунд за верхнім перцентилем дев'яносто п'ять. Основні засоби зменшення обчислювальної складності утворюють квантування, структурний прунінг та дистиляція знань. Для критичних шарів застосовується навчання з урахуванням квантування до формату INT8, а найбільш чутливі вузли, зокрема частини бекбону й голова регресії рамок, можуть залишатися у форматах FP16 або FP32. Після тренувальне квантування на репрезентативній вибірці доповнюють повторним калібруванням температурного масштабування, а структурний прунінг каналів у піраміді ознак і декодері супроводжується коротким донавчанням для відновлення точності. На практиці використовують змішаний режим FP16 INT8, що забезпечує прийнятний компроміс між точністю та частотою кадрів на одиницю потужності.

Додаткове скорочення моделей досягається дистиляцією знань, коли важка офлайнова модель вчитель передає інформацію компактній моделі учню. Функцію втрат у цьому режимі можна подати співвідношенням:

$$L = L_{\text{task}} + \lambda D_{\text{KL}}(\sigma(z^T/T) \parallel \sigma(z^S/T)) \quad (2.33)$$

де  $L$  описує сумарну функцію втрат дистиляції,  $L_{\text{task}}$  відображає втрату основної задачі контролю,  $D_{\text{KL}}$  означає дивергенцію Кульбака Лейблера між м'якими розподілами вчителя та учня,  $z^T$  та  $z^S$  позначають логіти вчителя і учня,  $\sigma$  є оператором softmax,  $T$  задає температуру дистиляції,  $\lambda$  визначає вагу додаткового члена, що пов'язує модель учня з поведінкою вчителя.

Для економії обчислень інференс обмежують областю інтересу та плитковою обробкою. Спочатку швидкий модуль локалізує зону друку, після чого основна модель працює лише в цій області або на плитках фіксованого розміру з малим перекриттям, причому масштаб області інтересу може змінюватися залежно від



типу елемента за G кодом. Системні оптимізації включають конвеєр з нульовим копіюванням з використанням апаратного сигнального процесора для зміни розміру та перетворення формату, асинхронні черги захоплення, препроцесингу, інференсу й постобробки, а також пакетну верифікацію лише спірних кадрів. Пам'ять організують на основі фіксованих буферів із прямим доступом, а енергоспоживання обмежують за рахунок адаптивного інференсу, який зменшує частоту викликів моделі у стабільних режимах і підвищує її за виявлення ризику. Після квантування і прунінгу обов'язково проводять повторну валідацію каліброваності, метрик якості виявлення та латентності, і лише після підтвердження прийнятних характеристик оптимізовану модель розгортають на Raspberry Pi 5.

Функції втрат і метрики оцінювання узгоджують із особливостями задачі контролю FDM друку, де важливі дрібні об'єкти, просторово часова локалізація аномалій, обмеження платформи за часом виконання та пріоритет безпеки. Для детектора прямокутних рамок регресійну складову будують на узагальненій IoU втраті типу GIoU, DIoU або CIoU, а класифікаційну частину з урахуванням дисбалансу класів задають фокальною функцією втрат:

$$L_{cls} = -\alpha y(1-p)^{\gamma} \ln p - (1-\alpha)(1-y)p^{\gamma} \ln(1-p) \quad (2.34)$$

де  $L_{cls}$  означає класифікаційну втрату,  $y$  є істинною міткою класу,  $p$  позначає прогнозовану ймовірність дефекту,  $\alpha$  задає вагу позитивного класу,  $\gamma$  більше нуля визначає ступінь фокусування на складних прикладах з проміжними ймовірностями.

У задачі сегментації масок доцільно поєднувати площезалежні та контурні втрати. Комбіновану втрату сегментації записують так:

$$L_{seg} = \lambda_{Dice} L_{Dice} + \lambda_b L_{bIoU} + \lambda_{CE} L_{CE} \quad (2.35)$$

де  $L_{seg}$  позначає сукупну сегментаційну втрату,  $L_{Dice}$  є площезалежною складовою типу Dice,  $L_{bIoU}$  описує контурну різницю через boundary IoU,  $L_{CE}$  відповідає піксельній кросентропії, а коефіцієнти  $\lambda_{Dice}, \lambda_b, \lambda_{CE}$  визначають відносну вагу кожної складової та добираються експериментально.

## Функції втрат і метрики для задач контролю FDM друку

Підзадача	Основні втрати	Ключові метрики
Детекція	Узагальнена IoU втрата типу GIoU, DIoU або CIoU, фокальна втрата	Показник виявлення дрібних об'єктів $\eta_{small}$ , час до виявлення TTD, FPS на ват
Сегментація	Dice втрата, boundary IoU, піксельна кросентропія	Середня IoU, Dice, boundary IoU, похибка відстані до кромки, temporal IoU
Системний рівень	Узагальнена вартість помилки $EC(\tau)$	TTDsignal, TTDaction, частота хибних пауз, FPS на ват, показники каліброваності

Оскільки дефекти часто мають малу площу, ключовою метрикою є частка виявлених дрібних об'єктів:

$$\eta_{small} = \frac{TP_{small}}{TP_{small} + FN_{small}} \quad (2.36)$$

де  $\eta_{small}$  характеризує частку коректно знайдених дрібних аномалій,  $TP_{small}$  означає кількість істинно позитивних спрацювань для дрібних об'єктів,  $FN_{small}$  позначає кількість хибно негативних випадків, коли дрібний дефект залишився невиявленим. На системному рівні важливою є енергоефективність, яку зручно описати відношенням:

$$\eta_E = \frac{FPS}{P} \quad (2.37)$$

де  $\eta_E$  задає кількість кадрів, оброблених за секунду на один ват споживаної потужності, FPS описує середню частоту інференсу,  $P$  означає середню споживану потужність платформи.

У таблиці 2.5 у стислому вигляді зіставлено, які функції втрат і метрики варто використовувати для детекції, сегментації та оцінювання системного рівня, що полегшує налаштування експериментів і порівняння конфігурацій.

Узагальнений алгоритм описує послідовний обробіток потоків зображень і телеметрії на Raspberry Pi 5, починаючи від синхронізації часових міток відео з G кодом та стабілізації оптичної схеми і завершуючи формуванням керувальних подій. На етапі ініціалізації фіксують експозицію і баланс білого, визначають геометрію області інтересу, гомографію площини столу, порогові профілі й параметри гістерезису, а також ініціалізують кільцеві буфери для кадрів і телеметрії. На кожному кроці часу система одержує кадр та вектор телеметрії, що включає температури сопла і платформи, швидкість, прискорення, інтенсивність обдуву та мітки типів елементів.

Первинний класифікатор працює в області інтересу та формує миттєвий скор ризику. Якщо цей скор перевищує м'який поріг, у відповідній зоні активується детектор або сегментатор, які уточнюють локалізацію та значення ризику. Для багатомодального злиття ознак формується вектор контексту, після чого остаточний ризик події визначають лінійним класифікатором з сигмоїдальним виходом:

$$r_t^* = \sigma(w^T z_t + b) \quad (2.38)$$

де  $r_t^*$  позначає остаточний ризик на час  $t$ ,  $w$  описує вектор ваг лінійного класифікатора,  $z_t$  задає вектор злитих ознак з візуальних каналів та телеметрії,  $b$  є зсувом,  $\sigma$  позначає сигмоїдальну функцію, яка перетворює лінійну комбінацію ознак на ймовірність ризику.

Часову стабілізацію реалізують експоненційним згладжуванням послідовності ризиків та голосуванням більшості у ковзному вікні фіксованої довжини, щоб зменшити чутливість до одиничних стрибків. На основі згладженого ризику, гістерезисних порогів і мінімальної тривалості епізоду алгоритм призначає подіям рівні А, В або С та активує відповідну політику безпеки. Паралельно працює підсистема журналювання, яка зберігає вихідні кадри, області інтересу, маски, значення ризику, телеметрію, рівень події, видані команди і реакцію прошивки, що створює базу для подальшого донавчання й калібрування. У режимі онлайн контролюють часовий та енергетичний бюджет, підтримуючи цільову частоту аналізу кадрів та латентність від аномалії до дії у заданому діапазоні.

Для кількісної оцінки внеску окремих складових інформаційної технології контролю проводять абляційні досліді на єдиному корпусі даних з розбиттям типу *leave one X out* за принтером, матеріалом чи оптикою та з часовою ізоляцією навчальних і тестових шарів. Для аналізу роздільної здатності та плиткового інференсу порівнюють конфігурації з базовою роздільністю сімсот двадцять  $p$ , суцільною обробкою тисяча вісімдесят  $p$ , а також варіанти тисяча вісімдесят  $p$  та чотири  $K$  з плитками фіксованого розміру. Основною метрикою у цьому блоці залишається частка виявлених дрібних дефектів  $\eta_{\text{small}}$ , до якої додають *boundary IoU*, *Dice* поблизу крамок, час до виявлення та енергоефективність у вигляді FPS на ват.

В окремій серії експериментів досліджують вплив різних бекбонів за умови фіксованої цільової частоти кадрів для області інтересу. Для досягнення порівнюваної продуктивності застосовують прунінг, квантування і зміну вхідного розміру, залишаючи спільними голови детектора, декодери, аугментації та параметри гістерезису. Порівняння проводять за PR AUC, середньою точністю, *boundary IoU*, часом до виявлення, показниками каліброваності та енергоефективності. Для сегментаційних гілок аналізують різні комбінації втрат типу BCE плюс *Dice*, *Tversky* та *Lovasz Softmax* разом з *boundary IoU* й різними декодерами, фіксуючи *boundary IoU*, коефіцієнт Hausdorff HD дев'яносто п'ять, *Dice* поблизу ниток і *temporal IoU*.

Стійкість до змін освітлення та матеріалу оцінюють у крос доменних сценаріях та *stress* тестах, будуючи PR та ROC криві, діаграми надійності й показники каліброваності до і після температурного масштабування. Окремо аналізують компроміс між латентністю та якістю у каскадній схемі для різних наборів порогів і гістерезису. Критичні перевірки стосуються пошуку витоку даних між навчанням і тестом, контролю каліброваності після квантування, виявлення позадоменних режимів, дрейфу даних, коректності анотацій, стабільності експозиції, області інтересу та гомографії, а також спеціальних сценаріїв для подій рівня A. Для забезпечення відтворюваності фіксують усі конфігурації навчання, формують

узгоджені набори кривих PR, ROC, DET та reliability, а також залежності FPS на ват і енерговитрат у джоулях на кадр.

## 2.9. Алгоритми роботи 3D-принтера у контурі керування

У замкненому контурі FDM друку 3D-принтер розглядається як багаторівнева система, у якій послідовно працюють алгоритми інтерпретації G-коду, планування траєкторій, кінематики, дискретизації та генерації кроків крокових двигунів, синхронізації екструзії й керування температурними режимами. Узгодженість цих алгоритмів визначає точність геометрії виробу, сталість параметрів шва та стійкість до збурень, пов'язаних з механікою, тепловими процесами і властивостями матеріалу, а також створює коректний контекст для ШІ модуля контролю [87].

Інтерпретація G-коду та планування руху. На першому етапі G-код перетворюють на єдине метричне представлення в абсолютних координатах з узгодженими режимами одиниць і екструзії. Геометричні оператори типу G0 і G1 трактують як лінійні відрізки, команди G2 і G3 описують дуги кола у відповідних площинах, а розширений вектор стану включає швидкість подачі, уставки температур сопла та платформи, рівень обдуву, ретракти і Z hop. Сегменти траєкторії потрапляють до буфера попереднього перегляду, де на них накладаються обмеження за швидкістю, прискоренням і ривком, а стабілізацію руху на переломах ламаної забезпечує згладжування кутів за принципом junction deviation. Граничну швидкість у вершині ламаної з урахуванням допустимого відхилення траєкторії  $J_d$  визначають співвідношенням:

$$v_c = \min(v_{\text{entry}}, v_{\text{exit}}, \sqrt{a_{\text{max}} J_d (1 - \cos\varphi)}) \quad (2.39)$$

де  $v_c$  задає швидкість у вершині ламаної,  $v_{\text{entry}}$  та  $v_{\text{exit}}$  означають швидкості на вході та виході з вершинного сегмента,  $a_{\text{max}}$  позначає максимально допустиме прискорення,  $J_d$  описує допустиме відхилення від ідеальної траєкторії,  $\varphi$  характеризує кут між сусідніми сегментами.

Порівняння профілів швидкості в планувальнику руху

Профіль швидкості	Переваги	Недоліки
Трапецієподібний	Простота реалізації, мала обчислювальна вартість	Підвищені ривкові навантаження, можливе збудження резонансів
S-крива	Обмеження ривка, зменшення вібрацій	Вища складність обчислень, складніша параметризація
Input shaping	Цілеспрямоване приглушення конкретних резонансів	Додаткове запізнення, чутливість до зміни параметрів механіки

Профілі швидкості на рівні окремих сегментів формують у вигляді трапецієподібних або S-подібних кривих. S-профіль із обмеженим ривком зменшує механічні резонанси і поверхневі артефакти, особливо на високих швидкостях. За наявності помітних резонансів додатково застосовують формування вхідного впливу input shaping, що замінює базову команду переміщення згладженим сигналом, створеним як суперпозиція кількох зсунених у часі імпульсів з попередньо розрахованими вагами для заданої резонансної частоти. У таблиці 2.6 узагальнено характеристики найпоширеніших профілів швидкості, їх переваги та обмеження для реалізації в прошивці.

На другому рівні координати інструмента у робочій області перетворюють на координати приводів, що відповідають конкретній механічній схемі. Для механіки CoreXY зв'язок між декартовими координатами інструмента та координатами приводів A і B описують формулами:

$$s_A = k_{xy}(x + y), \quad s_B = k_{xy}(x - y) \quad (2.40)$$

де  $s_A$  та  $s_B$  означають кількість кроків або мікрокроків відповідних приводів,  $k_{xy}$  описує коефіцієнт кроків на міліметр для площини XY,  $x$  та  $y$  задають координати інструмента. Таке подання дає змогу відновити положення інструмента за вимірними координатами приводів та коректно накладати обмеження за швидкістю й прискоренням у просторі приводів.

Коефіцієнти кроків на міліметр для ремінних приводів визначають з урахуванням налаштувань драйвера та геометрії шківів через співвідношення:

$$k = \frac{N_{\mu} N_{\text{step}}}{p} \quad (2.41)$$

де  $k$  задає кількість кроків на міліметр,  $N_{\mu}$  позначає кількість мікрокроків на один повний крок,  $N_{\text{step}}$  означає кількість повних кроків на оберт двигуна,  $p$  описує крок ремінної передачі як лінійне переміщення за один оберт шківів. Аналогічні співвідношення використовують для гвинтових приводів з підстановкою кроку гвинта замість  $p$ . Для дельта, SCARA та полярних кінематик опорою виступають відповідні аналітичні рівняння оберненої кінематики, що дозволяє переносити обмеження за швидкістю, прискоренням і робочою областю в простір узагальнених координат. Для компенсації нерівності поверхні столу застосовують сітку вирівнювання, а командовану координату по осі  $Z$  коригують залежно від локального профілю відхилення, що було отримано під час калібрування.

Дискретизація та генерація кроків. Рівень дискретизації реалізується у перериваннях таймера мікроконтролера й відповідає за перетворення безперервної траєкторії в послідовності імпульсів STEP і DIR для крокових драйверів. На основі заданого профілю швидкості для кожної осі ведуть фазові акумулятори типу диференціальної апроксимації, що дозволяє синхронізувати осі за часом і обмежити геометричну похибку менш ніж половиною кроку. Параметри профілю швидкості змінюють рекурентними співвідношеннями з насиченням у заданих межах, що дає змогу реалізувати трапецієподібні та S-подібні профілі в єдиній схемі. На високих швидкостях застосовують апаратну підтримку таймерів і, за можливості, DMA, а також когерентне оновлення сигналів DIR, що знижує навантаження на обробник переривань і забезпечує синхронізацію багатьох осей.

Синхронізація екструзії осі  $E$  з рухом XYZ. Метою синхронізації екструзії є забезпечення пропорційності потоку розплавленого полімеру лінійній швидкості траєкторії та параметрам шва. Нехай  $h$  позначає висоту шару,  $w$  описує ефективну ширину волокна,  $v$  задає лінійну швидкість інструмента, тоді бажаний об'ємний потік розплаву визначають виразом:

$$Q_{\text{vol}} = h w v \quad (2.42)$$

де  $Q_{\text{vol}}$  означає об'ємний потік матеріалу через сопло. У G-кодi екструзію задають у міліметрах філамента координатою E. Для філамента діаметром  $d_f$  площа поперечного перерізу дорівнює відомій геометричній формулі, а ефективна площа поперечного перерізу шва оцінюється як добуток коефіцієнта сплюснення на  $h$  та  $w$ . Диференційне співвідношення між екструзією та довжиною траєкторії  $s$  можна записати у вигляді:

$$\frac{dE}{ds} = \frac{A_{\text{eff}}}{A_f} \quad (2.43)$$

де  $dE$  по  $ds$  задає приріст екструзії у міліметрах філамента на одиницю довжини траєкторії,  $A_{\text{eff}}$  описує ефективну площу перерізу шва,  $A_f$  позначає площу перерізу філамента. Після цього екструзію переводять у кроки екструдера за каліброваним коефіцієнтом кроків на міліметр філамента.

Максимальний об'ємний потік обмежений можливостями гарячого кінця та залежить від температури сопла, діаметра сопла і типу полімеру. У разі перевищення цієї межі планувальник знижує швидкість або адаптує ширину шва й щільність заповнення. Динаміку тиску в екструзійному тракті компенсують схемами pressure advance або linear advance, коли до базової команди екструзії додають випереджальні члени, пропорційні швидкості та прискоренню вздовж траєкторії. Під час ретрактів і де ретрактів виконують контрольоване зниження й відновлення тиску, а за наявності енкодера механізму подачі можливе замикання зворотного зв'язку за екструзією з виявленням прослизання або закупорки.

Термоконтури сопла та платформи. Керування температурою сопла та платформи реалізується окремими контурами регулювання, які в робочому діапазоні температур доцільно описувати лінійною моделлю першого порядку з чистим запізненням типу FOPDT. Передавальну функцію об'єкта подають формулою:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (2.44)$$

де  $G(s)$  описує передавальну функцію термоканалу,  $K$  означає статичний коефіцієнт підсилення в кельвінах на ват,  $\tau$  задає сталу часу,  $L$  позначає ефективне



запізнення, пов'язане з тепловою інерцією та розташуванням датчика. Вхідним сигналом є потужність нагрівача, яка пропорційна нормованому керувальному впливу широтно імпульсної модуляції, а теплові втрати моделюють як суму конвективної та випромінювальної складових, що залежать від температури та геометрії. Параметри  $K$ ,  $\tau$ ,  $L$  ідентифікують за реакцією на ступінчасті зміни потужності з використанням класичних методів налаштування.

Регулятор температури реалізують як дискретизований ПІД закон. Похибку на  $k$  тіку записують як:

$$e[k] = T_{\text{set}}[k] - T[k] \quad (2.45)$$

де  $e[k]$  означає різницю між уставкою температури  $T_{\text{set}}[k]$  та вимірюваною температурою  $T[k]$ ,  $T_{\text{set}}[k]$  задає бажане значення температури,  $T[k]$  позначає поточне вимірювання. Щоб уникнути накопичення інтегральної складової в режимі насичення, застосовують схеми anti windup, обмежують швидкість зміни потужності та формують профілі уставок у вигляді лінійних ramp з обмеженою швидкістю нагрівання й охолодження. Додаткові безпекові обмеження встановлюють граничну швидкість зміни температури та допустимий діапазон температур, а алгоритм thermal runaway виявляє ситуації, коли при ненульовій потужності температура не змінюється у потрібному напрямку і ініціює аварійне вимкнення нагрівачів.

У таблиці 2.7 узагальнено відмінності між термоконтуром сопла і платформи, їх теплову інерцію, основні збурення та орієнтовні налаштування ПІД, що дозволяє обирати різні коефіцієнти для швидкого й інерційного об'єктів.

Таблиця 2.7

#### Порівняння термоконтурів сопла та платформи

Об'єкт керування	Теплова інерція	Основні збурення	Рекомендовані налаштування ПІД
Сопло	Низька	Обдув деталі, зміна витрати матеріалу	Вищий $K_P$ , помітний $K_D$ , помірний $K_I$ , feedforward за $Q_{fan}$
Платформа	Висока	Конвекція та випромінювання по краях	Більший $K_I$ , помірний $K_P$ , мінімальний $K_D$ , бажане зональне керування

Керування охолодженням і часом витримки шару. Підсистема охолодження має забезпечувати стабільну геометрію шва та достатню міжшарову адгезію, мінімізуючи провисання, ниткоутворення та деформації. Профіль керування вентилятором задають параметризованою функцією частки широтно імпульсної модуляції, яка залежить від висоти шару, типу елемента, лінійної швидкості та індикаторів кривизни або тонкостінності. Узагальнений запис профілю вентиляторів можна подати виразом:

$$Q_{fan}(z, type, v, \kappa) = \text{clip}(Q_0(z) + Q_{type}(type) + \alpha_v v + \alpha_\kappa \kappa; Q_{min}, Q_{max}) \quad (2.46)$$

де  $Q_{fan}$  описує цільову частку керування вентилятором,  $Q_0(z)$  задає базовий профіль по висоті,  $Q_{type}(type)$  позначає підсилення для окремих типів елементів, зокрема мостів і тонких стінок,  $\alpha_v$  та  $\alpha_\kappa$  визначають чутливість до швидкості та кривизни,  $Q_{min}$  і  $Q_{max}$  задають мінімальне та максимальне значення, оператор  $\text{clip}$  обмежує значення профілю у допустимому діапазоні. Зміни  $Q_{fan}$  у часі обмежують кроком, а сам профіль згладжують експоненційно, щоб уникати термошоку й різких аеродинамічних збурень.

Стратегія мінімального часу шару базується на оцінці сумарної тривалості друку поточного шару за довжинами відрізків і їх швидкостями. Якщо розрахований час менший за заданий мінімальний, система спочатку масштабує швидкості до безпечного рівня, а за потреби формує орбітальну траєкторію відводу сопла від гарячої зони, довжина якої вибирається так, щоб досягти мінімального часу формування шару без надмірного перегріву або переохолодження. Параметри профілю  $Q_{fan}$  та мінімального часу шару пов'язують з G-кодом і планувальником через мітки шарів і типів елементів, а також ознаки мостів і тонких периметрів, які надає слайсер.

У таблиці 2.8 наведено орієнтовні параметри профілю охолодження та мінімального часу шару для поширених матеріалів, зокрема діапазони частки обдуву для основних шарів і мостів, рекомендований мінімальний час шару та переважну стратегію сповільнення і орбітальних пауз.

Орієнтовні параметри профілю охолодження та мінімального часу шару

Матеріал	$Q_{fan}$ , відсоток, основні шари	$Q_{fan}$ , відсоток, мости	$T_{min}$ , секунд для дрібних елементів	Основна стратегія швидкості і орбіта
PLA,	50-70	80-100	5-8	Помірне сповільнення і орбіта
PETG	20-40	50-70	8-12	Пріоритет сповільнення, обережна орбіта
ABS, ASA	0-20,	20-40	10-15	Переважно сповільнення, низький обдув
PA,	0-20	20-40	10-15	Сповільнення, обмежене використання орбіти
TPU	0-30	30-50	8-12	Сповільнення, мінімальні орбітальні траєкторії

Компенсації динаміки та геометрії. Компенсаційні механізми прошивки спрямовані на зменшення похибок, пов'язаних з динамікою механіки, геометричними відхиленнями та нерівномірністю тепломеханічних умов. Input shaping формує згладжений керувальний сигнал як згортку з ядром шейпера, параметри якого визначають за домінантною резонансною частотою та коефіцієнтом загасання, що дозволяє зменшити амплітуди коливань без істотного збільшення часу руху. Цифрові режекторні фільтри в каналах швидкості або струму двигунів пригнічують коливання на резонансних частотах, зберігаючи низькочастотний компонент руху.

Компенсацію нерівності поверхні столу забезпечує сітка вирівнювання з інтерполяцією по вузлах та обмеженням швидкості зміни скоригованої координати Z уздовж траєкторії. Для тонкого ручного налаштування використовують babystepping, коли до скоригованого значення додають невеликий сталий зсув. Лінеаризація екструзії встановлює базову відповідність між лінійною швидкістю інструмента та об'ємною подачею матеріалу, яку коригують емпіричним коефіцієнтом для врахування в'язкопружності тракту, а також додатковими членами pressure advance. Корекцію усадки реалізують масштабуванням координат у площині XY у напрямках, де виміряні відсотки усадки відрізняються від бажаних.

Для ділянок із різкими змінами напрямку вводять локальну корекцію подачі, яка зменшує локальні надлишки матеріалу поблизу кутів.

Таблиця 2.9

Приклад налаштувань компенсації динаміки

Механіка	$f_n$ , герц	Тип шейпера	$T_d$ , секунда	$r$ режекторного фільтра	Типовий діапазон швидкостей, міліметр на секунду
Картезіанська, легка голова	35 45	ZVD	0,02 0,03	0,9-0,95	80-150
CoreXY, жорстка рама	40 60	ZVD	0,015 0,025	0,9-0,95	100-200
Дельта	30 40	ZV або ZVD	0,025 0,035	0,85-0,9	70-140

У таблиці 2.9 наведено приклад налаштувань компенсації динаміки для різних типів механіки, зокрема резонансні частоти, рекомендований тип шейпера, затримку ядра, параметри режекторного фільтра та типовий діапазон швидкостей друку.

## 2.10. Темпоральна логіка втручання на основі ШІ модуля

Темпоральна логіка втручання визначає, як покадрові оцінки ШІ модуля перетворюються на керувальні події з гарантованою мінімальною тривалістю сигналу, керованою латентністю та безпечним застосуванням дій. На першому рівні працює швидкий класифікатор у фіксованій області інтересу, який формує скор ризику і за перевищення м'якого порога активує детальніший модуль детекції або сегментації з підвищеною роздільністю [88]. На цьому рівні оцінюють площу, геометрію та стабільність дефекту у часі й приймають рішення про дію відповідно до політики рівнів довіри.

Щоб зменшити чутливість до одиничних стрибків, скор ризику проходить через експоненційне згладжування, а прийняття рішення базується на подвійних порогах з гістерезисом та вимогою мінімального часу підтвердження. Параметри порогів і часу підтвердження залежать від контексту G-коду та телеметрії, окремо

для периметрів, заповнення, мостів і перших шарів. Цільова латентність від виявленої аномалії до дії для подій рівня В становить приблизно сто п'ятдесят триста мілісекунд для області інтересу з роздільністю сімсот двадцять p та частотою аналізу п'ятнадцять двадцять п'ять кадрів за секунду. Політика дій стратифікується за рівнями А, В, С і узгоджується з раніше визначеною таблицею подій і політик втручання.

Псевдокод головного циклу виконавця. Головний цикл виконавця забезпечує детерміновану часову поведінку, пріоритизацію задач реального часу, неблокувальний ввід вивід і безпечну інтеграцію з ІІІ модулем. На рівні структур даних підтримують черги планів руху, дискретизованих кроків і подій для системи безпеки та ІІІ модуля, а глобальний стан описують скінченним автоматом із режимами RUN, PAUSE, PARK, RESUME, EMERGENCY\_STOP. На етапі ініціалізації налаштовують таймери, запускають і калібрують ПД регулятори сопла та платформи, ініціалізують вентилятори, шар безпеки та watchdog, встановлюють калібрувальну матрицю кінематики та сітку вирівнювання столу, готують підсистему камер і визначають параметри декімації кадрів і порогів спрацювання ІІІ модуля.

Фонова обробка G-коду здійснюється неблокувально, планувальник формує траєкторії з урахуванням попереднього перегляду та згладжування, а результати потрапляють до черги планів для дискретизації. Переривання таймера високого пріоритету реалізує тікер, який виконує перевірку критичних умов безпеки, оновлення watchdog, дискретизацію профілів швидкості у кроки для генератора імпульсів, інтегрування кінематики, синхронізацію екструзії, оновлення термоконтурів та вентиляторів, а також формування міток шарів і типів елементів для ІІІ модуля. Події, що потребують повільнішої обробки, накопичуються у черзі й опрацьовуються окремим обробником, який змінює стан автомата відповідно до політик безпеки. Обов'язковою вимогою є відсутність блокувань і динамічного виділення пам'яті в обробниках переривань, тоді як ІІІ та ввід вивід працюють у фоні з керованим часовим бюджетом.

Показники якості реалізації. Показники якості реалізації описують узгодженість роботи підсистем планування руху, екструзії, термоконтролю, охолодження, безпеки та ІІІ модуля у межах комплексної інформаційної технології контролю FDM друку. Точність відстеження траєкторії характеризують середньоквадратичні похибки по осях, для осі  $x$  їх обчислюють за формулою:

$$\text{RMSE}_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{\text{cmd}}[k] - x_{\text{meas}}[k])^2} \quad (2.36)$$

де  $\text{RMSE}_x$  позначає середньоквадратичну похибку координати  $x$ ,  $N$  задає кількість виміряних точок,  $x_{\text{cmd}}[k]$  описує командоване значення координати на  $k$  тіку,  $x_{\text{meas}}[k]$  означає виміряне значення. Аналогічно визначають похибки для осей  $y$  та  $z$ . Додатково аналізують помилки узгодження швидкості у ділянках кутів, вважаючи прийнятними похибки на рівні десятків мікрометрів та декількох відсотків за швидкостей до приблизно сто двадцять міліметрів за секунду.

Динамічну поведінку та вібрації оцінюють за спектрами прискорень до й після застосування *input shaping* та режекторних фільтрів, вимірюючи ступінь пригнічення резонансів на домінантних частотах. Для екструзії та геометрії шва розраховують середню ширину та коефіцієнт варіації, а також частки відрізків з істотною недоекструзією або переекструзією, що безпосередньо пов'язано з геометричною точністю та шорсткістю поверхні. Термоконттури сопла та платформи характеризують перерегулюванням, часом виходу на режим і часткою коректно виявлених сценаріїв *thermal runaway*.

Надійність і поведінка в експлуатації описуються кількістю аварійних зупинок на сто годин друку, часткою успішних відновлень після збоїв з прийнятною якістю виробу, частотою хибних пауз, показником доступності та латентністю від аномалії до дії для медіани та перцентилів дев'яносто п'ять. У таблиці 2.10 ці показники узагальнено за групами, що дозволяє виконувати систематичне порівняння конфігурацій та версій алгоритмів. Інтерпретація метрик безпосередньо пов'язана з якістю виробу та безпекою, а на основі отриманих значень приймають рішення щодо коригування параметрів планувальника, регуляторів, механізмів компенсації та порогів ІІІ модуля.

Таблиця 2.10

## Основні показники якості реалізації системи

Група показників	Позначення	Опис	Типові цільові значення
Точність руху	$RMSE_{x,y,z}$	середньоквадратичні похибки по осях	десятки мкм
Вібрації	$A_{sup}(f_n)$	пригнічення амплітуди резонансів	$\geq 10\text{--}15$ дБ
Геометрія шва	$\bar{w}, CV_w$	стабільність ширини шва	кілька %
Термоконтур	$M_p, t_s$	перерегулювання, час входу в режим	кілька %, десятки секунд
Безпека	TRS, $\tau_{A \rightarrow D}$	частка виявлених runaway, латентність	TRS $\approx 100$ %, 150–300 мс
Надійність	RecoveryRate, хибні паузи	відновлення після збоїв, частота хибних спрацьовувань	RecoveryRate $\geq 95$ %

Протоколи вимірювань передбачають синхронізований збір даних щодо командованих і вимірних швидкостей та прискорень, подачі екструзії, температур, обдуву, міток LAYER і TYPE, показів акселерометрів та відеопотоку з фіксованою експозицією. Формується набір еталонних траєкторій і виробів, на яких виконують випробування, включно з ін'єкцією відмов для перевірки safety-шару та реакції ШІ-модуля. Результати агрегують із розрахунком довірчих інтервалів і будують порівняльні діаграми «до/після» вдосконалень.

Інтерпретація показників безпосередньо пов'язується з якістю виробу та безпекою: коефіцієнт варіації ширини шва, частка недоекструзії й переекструзії, похибки швидкості на кутах, рівень вібрацій, стабільність температур визначають геометричну точність, шорсткість і зовнішній вигляд деталей; метрики безпеки TRS та  $\tau_{A \rightarrow D}$  відображають здатність системи своєчасно реагувати на небезпечні ситуації. На їх основі приймаються рішення щодо коригування ПД-параметрів, налаштування junction deviation, параметрів input-shaping, коефіцієнтів  $K_v$ ,  $K_a$ , порогів і гістерезисів ШІ-модуля та політик safety-шару.

Узгоджений набір метрик і протоколів вимірювання забезпечує відстежуваність якості реалізації від рівня окремих кроків, екструзії й термоконтролю до інтегрованої поведінки каскаду «виявлення – верифікація – дія», підтверджуючи, що запропоновані алгоритмічні та архітектурні удосконалення підвищують якість друку й операційну надійність системи.

## **Висновки до розділу 2**

У другому розділі узагальнено та критично проаналізовано методи машинного навчання для задач контролю якості 3D-друку, з фокусом на виявлення дрібних дефектів і робастність у змінних польових умовах. Обґрунтовано, що результативність системи визначається не лише вибором архітектури, а й організацією повного циклу навчання та оцінювання, включно з єдиними правилами аугментацій, фіксованими режимами квантування та контрольованою схемою порогів політик.

Сформовано вимоги до уніфікованого порівняльного експерименту, у якому навчені моделі послідовно застосовуються до лабораторних і польових підмножин за спільними правилами калібрування та прийняття рішень, а показники якості та експлуатаційні характеристики доповнюються довірчими інтервалами, що робить висновки статистично обґрунтованими.

Результатом розділу є сформований науково-методичний базис для побудови каскадних конфігурацій детекції та верифікації, а також для переходу від «точності моделі» до «керованості контуру», коли метрики якості безпосередньо пов'язуються з частотою небажаних втручань і придатністю до роботи в реальному часі.



## РОЗДІЛ III. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

### 3.1. Розробка програмного забезпечення та налаштування роботи 3D-принтера

Підсистема хост рівня на базі Raspberry Pi 5 розглядається як центральний елемент інтелектуального контуру керування між мікроконтролером 3D принтера з прошивкою типу Marlin або Klipper та надбудовами спостереження і аналізу, зокрема відеомоніторингом і модулем штучного інтелекту. Доцільність такого вибору зумовлена поєднанням достатньої обчислювальної продуктивності, розвиненої підсистеми введення виведення та зрілого програмного оточення. Чотириядерний шістдесяти чотири бітний процесор класу ARM Cortex A з SIMD розширеннями NEON забезпечує можливість одночасного виконання служб подачі G коду, мережевих сервісів, веб інтерфейсу та інференсу полегшених нейромереж без критичного впливу на латентність керувальних рішень.

Підсистема введення виведення Raspberry Pi 5 з інтерфейсами USB третього покоління, каналом Gigabit Ethernet, двома шинами камер CSI та апаратним відеокодеком забезпечує низьку затримку захоплення зображень і надійний транспорт телеметрії. Це дозволяє одночасно підтримувати високу частоту кадрів для модуля комп'ютерного зору та стійкий канал команд і зворотного зв'язку з принтером. Використання програмного середовища на базі Linux з бібліотеками libcamera, FFmpeg або GStreamer і типовими хост сервісами OctoPrint, Klipper з Moonraker скорочує трудові витрати на інтеграцію, усуває потребу в розробленні драйверів низького рівня та дає змогу зосередитися на алгоритмах керування і аналізу.

Принципово важливим є розподіл функцій реального часу між мікроконтролером принтера та хост системою. Функції жорсткого реального часу включають генерацію кроків, замикання температурних ПД контурів і роботу планувальника траєкторій, тобто всі дії з максимально допустимою затримкою від мікросекунд до одиниць мілісекунд. Вони реалізуються безпосередньо у прошивці

принтера з детермінованим таймінгом. Функції м'якого реального часу охоплюють інференс моделей машинного навчання, аналіз телеметрії, роботу веб інтерфейсу, формування політик втручання, агрегування журналів та зберігання даних. Допустима затримка для таких функцій сягає десятків або сотень мілісекунд без критичної втрати стійкості процесу друку.

Такий розподіл виключає ситуації, коли переривання операційної системи або пікове навантаження під час інференсу могли б безпосередньо порушити кінематику руху. Усі операції, чутливі до мікросекундних чи мілісекундних затримок, локалізуються на борту принтера, тоді як алгоритми аналізу якості, політики безпеки та веб керування реалізуються на хості з контрольованою, але не жорстко гарантованою латентністю.

У межах цієї архітектури виділяються кілька логічних підсистем і каналів взаємодії. Підсистема принтер хост відповідає за приймання, буферизацію та доставку G коду до мікроконтролера, а також за організацію зворотного каналу телеметрії, що включає миттєві значення температур, стани кінцевих вимикачів, коди помилок і службові повідомлення прошивки. Обмін здійснюється через інтерфейси USB послідовного типу або UART у вигляді потоку рядків G коду та сервісних відповідей. Для запобігання голодуванню планувальника руху на мікроконтролері необхідно підтримувати мінімальний запас команд. Цю вимогу формально подають у вигляді умови:

$$Q_{cmd} \geq Q_{min}, \quad (3.1)$$

де  $Q_{cmd}$  поточний розмір черги команд у прошивці, а  $Q_{min}$  мінімально припустимий запас ходу планувальника.

Відеопідсистема забезпечує захоплення кадрів з однієї або кількох камер, підключених через CSI або USB, з подальшим апаратним кодуванням у форматах H.264 або H.265 для потокової трансляції та буферизацією з точними часовими мітками. Для прив'язки зображень до процесу друку кадри синхронізуються з подіями, що надходять від принтера, зокрема зміною шару, початком друку периметра чи побудовою мосту, або

формуються за програмним таймлайном. Стабільна частота кадрів з мінімальною латентністю є необхідною умовою надійності алгоритмів виявлення дефектів.

Модуль штучного інтелекту реалізує інференс згорткових нейронних мереж ResNet класу або легких детекторів над потоком зображень. Обчислення виконуються на центральному процесорі Raspberry Pi 5 з використанням квантування до форматів FP шістнадцять або INT вісім, SIMD операцій NEON та оптимізованих бекендів ONNX Runtime, OpenVINO у режимі центрального процесора, TensorFlow Lite з XNNPACK. На виході формується набір імовірнісних оцінок для класів дефектів, таких як недоекструзія, переєкструзія, пропуски нитки, відшарування, нитіння, з прив'язкою до часу і номеру шару. Якщо ризик дефекту в момент часу  $t$  позначити як  $r(t)$ , то модуль інтелекту надає скалярні значення  $r(t)$  та геометричні параметри локалізації дефекту у вигляді рамок або масок сегментації.

Підсистема політик втручання інтегрує результати інференсу з телеметрією принтера та реалізує формалізовані правила реакції. Вона вводить гістерезис, фільтрацію шуму та обмеження безпеки. Втручання обмежуються безпечними вікнами, тобто проміжками часу, коли немає активних переміщень з екструзією, наприклад після виконання ретракту або в момент завершення шару. Умову належності моменту часу до множини безпечних вікон задають так:

$$t \in W \quad \text{де} \quad W = \{t: \text{немає активних переміщень з екструзією}\} \quad (3.2)$$

Застосування втручань лише в межах множини  $W$  мінімізує ризик порушення цілісності G коду та внутрішнього планувальника мікроконтролера.

Веб інтерфейс забезпечує операторові єдиний засіб доступу до черги завдань, телеметрії, журналів, потокового відео з накладеними результатами інференсу та конфігурації політик. У веб підсистемі реалізовано автентифікацію і авторизацію, контроль ролей користувачів, обмеження на перезапуск критичних сервісів у процесі друку та аудит усіх суттєвих дій оператора.

Окрема підсистема зберігання агрегує журнали подій, часові ряди телеметрії, вибірккові кадри та відеофрагменти, які використовуються для ретроспективного аналізу та формування навчальних і валідаційних вибірок моделей за сценарієм

активного навчання. Для запобігання деградації продуктивності впроваджуються політики лімітування обсягу та ротації даних, які мають забезпечувати виконання умов:

$$V_{\text{logs}} \leq V_{\text{max}}, \quad V_{\text{dataset}} \leq V_{\text{max,dataset}} \quad (3.3)$$

де  $V_{\text{logs}}$  поточний обсяг журналів, а  $V_{\text{dataset}}$  обсяг датасетів, що зберігаються у сховищі.

Обґрунтування виконання нейромоделі саме на Raspberry Pi 5 базується на принципі локальності обчислень і контролі латентності. Полегшені згорткові мережі типу ResNet вісімнадцять або тридцять чотири, MobileNet V три, компактні варіанти сімейства YOLO після застосування квантування до формату INT вісім і графових оптимізацій забезпечують інференс у режимі, близькому до реального часу. Частота аналізу досягає десяти тридцяти кадрів за секунду для помірних розмірів вхідного зображення. Відсутність залежності від хмарних або віддалених сервісів зменшує час реакції і підвищує надійність системи за умов нестабільних мережевих каналів. Єдине програмне середовище Linux спрощує уніфікацію драйверів камер, відеокодека та бібліотек інференсу, а механізми автоматизованого розгортання через контейнеризацію забезпечують відтворюваність і контроль версій. За потреби масштабування продуктивності до архітектури додають зовнішні прискорювачі на шинах PCIe або USB без зміни вищих рівнів логіки.

Разом з тим архітектура має низку технічних обмежень, які потрібно враховувати. Тепловий режим та енергоживлення визначають верхню межу стабільної частоти роботи процесорних ядер; для уникнення тротлінгу необхідно забезпечити активне охолодження та живлення з достатнім запасом по струму. Обмежені ресурси пам'яті та пропускної здатності шин вимагають попереднього масштабування зображень, виділення областей інтересу та використання невеликих пакетів інференсу розміру один. Відсутність жорсткого реального часу на рівні операційної системи означає, що будь які петлі з високою частотою оновлення, пов'язані з механікою, мають бути повністю локалізовані у мікроконтролері. Конкуренція за ресурси введення виведення між потоками відеокодування, USB трафіком і доступом до накопичувача може спричиняти піки

латентності; тому потрібне рознесення обробки по ядрах, пріоритизація операцій введення виведення та використання буферів, стійких до короточасних перевантажень.

На рівні сценаріїв роботи виділяються режим моніторингу в реальному часі, коли потік з камери проходить через препроцесинг, інференс та блок політик з формуванням у разі потреби команд для принтера, та режим верифікації подій, коли при перевищенні порогового ризику додатково зберігається короткий відеофрагмент до і після події та запускається точніша модель або збільшується просторовий розмір кадру для уточнення діагнозу. Додатково підтримується пасивний режим, у якому система лише протоколює результати без втручання, що корисно для накопичення датасетів і тестування політик.

Сукупність наведених рішень утворює цілісний принцип побудови, за якого Raspberry Pi 5 виконує функції хост рівня з логікою високого рівня, тоді як мікроконтролер принтера забезпечує жорсткий реальний час. Така архітектура дозволяє розмежувати критичну кінематику та задачі з природною латентністю, уніфікувати відео, телеметрію та керування в межах однієї платформи, виконувати локальний інференс із контрольованими часовими затримками та масштабувати продуктивність без зміни зовнішніх інтерфейсів.

Формальний розподіл функцій між мікроконтролером та хост рівнем. Ключовим елементом інтелектуальної підсистеми керування є чіткий поділ функцій реального часу між мікроконтролером принтера та хост рівнем. Жорсткі часові вимоги до генерації кроків, замикання температурних ПІД контурів і виконання планувальника траєкторій реалізуються на платі принтера з використанням прошивок типу Marlin, Klipper, RepRapFirmware.

Множину функцій системи керування позначають як  $F$ . Виділяють підмножину функцій жорсткого реального часу  $F_{RT}$  та підмножину функцій м'якого реального часу  $F_{SRT}$ . Формальне розбиття має вигляд:

$$F = F_{RT} \cup F_{SRT}, \quad F_{RT} \cap F_{SRT} = \emptyset, \quad (3.4)$$

де  $F$  повна множина функцій системи керування,  $F_{RT}$  підмножина функцій, що реалізуються у режимі жорсткого реального часу на мікроконтролері, а  $F_{SRT}$

підмножина функцій, що виконуються у режимі м'якого реального часу на хост рівні.

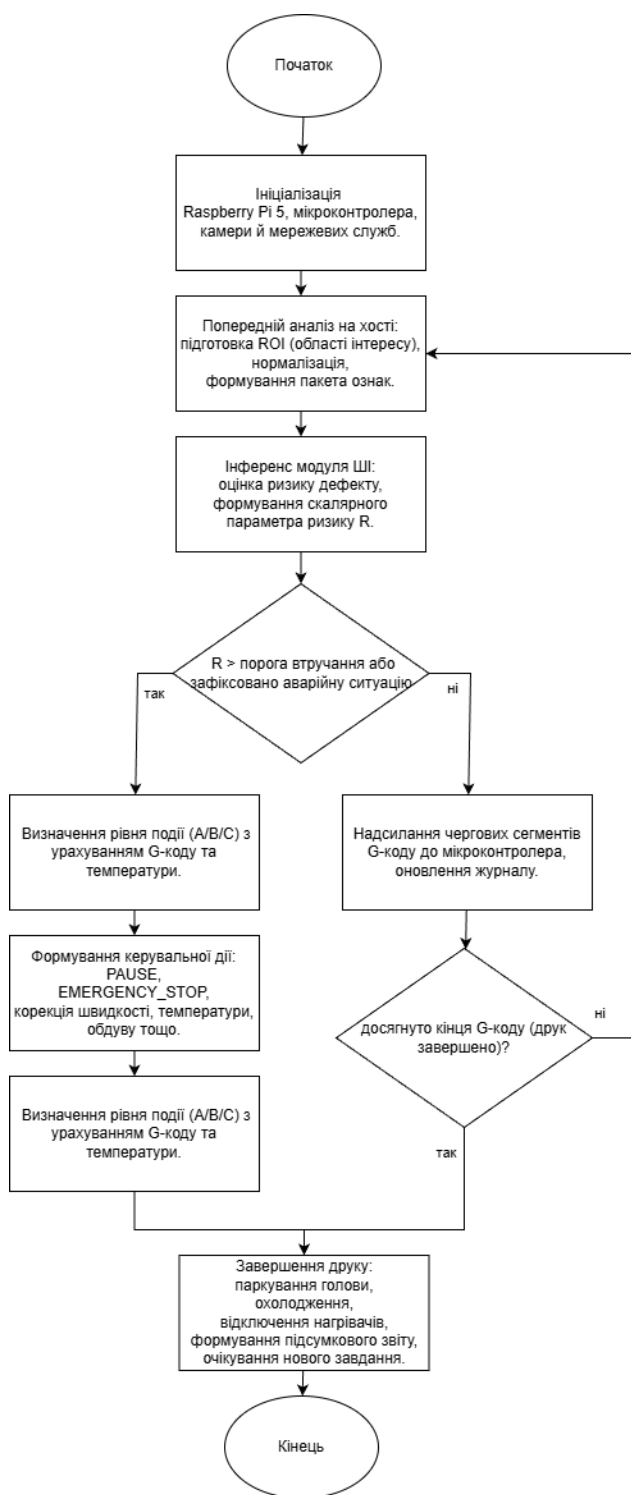


Рис. 3.1. Блок схема взаємодії хост системи Raspberry Pi 5 з мікроконтролером 3D принтера у процесі моніторингу та втручання

Підмножина  $F_{RT}$  охоплює генерацію кроків крокових двигунів, замикання температурних контурів і роботу планувальника траєкторій, тобто функції, для

яких максимальна допустима затримка належить до діапазону від мікросекунд до одиниць мілісекунд. Підмножина  $F_{\text{SRT}}$  включає інференс моделей машинного навчання, аналіз телеметрії, реалізацію політик втручання, роботу веб інтерфейсу, служби журналювання і зберігання даних, тобто функції з допустимою затримкою до десятків і сотень мілісекунд без критичного впливу на стійкість процесу друку.

У блок схемі на рис. 3.1. показано потік даних між мікроконтролером і Raspberry Pi 5. Хост рівень відповідає за приймання відеокадрів і телеметрії, обчислення показника ризику та формування узгоджених послідовностей команд G коду і керувальних дій, тоді як мікроконтролер реалізує контури руху та температури з жорсткими часовими обмеженнями.

У подальших підпунктах цей поділ використовується як основа для формулювання вимог до апаратури системи контролю 3D друку та для деталізації логічних підсистем.

### **3.2. Вимоги до апаратури системи контролю 3D друку**

Апаратна конфігурація системи контролю 3D друку на базі Raspberry Pi 5 має забезпечувати резерв продуктивності для одночасного виконання інференсу моделей, захоплення і за потреби кодування відеопотоку, обміну даними з принтером та роботи допоміжних служб.

Хост рівень доцільно реалізувати на основі Raspberry Pi 5 з обсягом оперативної пам'яті вісім гігабайт. Конфігурація з чотирма гігабайтами придатна для спрощених сценаріїв з однією камерою та легковаговою моделлю, проте має менший запас для розвитку системи. Стабільність роботи визначається тепловим режимом і якістю живлення. Час інференсу моделі пропорційний кількості елементарних операцій і обернено пропорційний тактовій частоті процесора, тому зменшення ефективної частоти через тепловий тротлінг безпосередньо збільшує латентність.[89] Це зумовлює потребу в активному охолодженні та стабільному джерелі живлення з п'ятьма вольтами і запасом струму не менше п'яти ампер.

Підсистема зберігання даних покладається на карту microSD не нижче класу швидкості V тридцять А два для операційної системи та базових служб. Для тривалого журналювання, збереження відеофрагментів та експериментальних наборів даних доцільно підключати зовнішній твердотільний накопичувач через інтерфейс USB третього покоління. Мінімальний рекомендований обсяг такого сховища становить шістдесят чотири гігабайти, для повноцінного накопичення експериментальних даних і контейнерів моделей бажано застосовувати накопичувачі обсягом двісті п'ятдесят шість гігабайт і більше. Файлова система типу ext чотири з налаштованою ротацією журналів і відеофайлів запобігає деградації продуктивності та передчасному зносу накопичувачів за умов інтенсивного запису.

Відеопідсистема будується на основі камер інтерфейсу CSI два, зокрема штатних модулів Raspberry Pi, або UVC сумісних USB камер. Для основного каналу аналізу бажано забезпечити захоплення потоку не нижче роздільної здатності тисяча вісімдесят пікселів по вертикалі при тридцяти кадрах за секунду. Після захоплення кадри масштабуються до розміру від трьохсот двадцяти до п'ятисот дванадцяти пікселів по короткій стороні перед поданням у нейронну мережу. Додаткові камери з нижчою роздільною здатністю можуть застосовуватися для контролю зони екструдера, поверхні платформи чи області підтримок.

На точність аналізу істотно впливають умови освітлення. Потрібне стабільне штучне освітлення без помітного мерехтіння та різких тіней. Параметри експозиції і балансу білого бажано фіксувати, щоб уникнути неконтрольованих змін яскравості й колірної гами кадрів. Сумарну затримку транспортного контуру для відео та телеметрії доцільно розглядати як суму внесків шини USB, інтерфейсу CSI та мережевого тракту, що дає змогу оцінювати повну латентність і утримувати її в межах вимог до часу реагування підсистеми контролю.

Мережева інфраструктура для доступу до веб інтерфейсу та передавання файлів орієнтована на дротове підключення рівня Gigabit Ethernet, яке забезпечує стабільну пропускну здатність і низьку затримку. Бездротові інтерфейси стандартів Wi-Fi п'ятого і шостого поколінь можуть застосовуватися у мобільних або



ізолюваних стендах, проте потребують попереднього тестування якості сигналу в умовах постійного відеопотоку. Додаткові датчики, серед яких незалежні термодатчики, акселерометри та датчики вібрації, підключаються через шини I квадрат С та SPI і підвищують чутливість системи до механічних резонансів та аномалій руху. Освітлення доцільно реалізувати світлодіодними модулями постійного струму з окремою лінією живлення, що зменшує вплив перешкод від силової частини принтера.

Тривимірний принтер має бути оснащений тридцяти двобітним мікроконтролером з підтримкою сучасних відкритих прошивок, зокрема Marlin, Klipper або RepRapFirmware. Командний інтерфейс і телеметрія повинні бути відкритими, а буфери приймання G коду досить ємними для запобігання голодуванню планувальника руху. Бажано розділити електроживлення виконавчих елементів, тобто нагрівальних елементів і двигунів, та живлення Raspberry Pi 5, щоб уникнути просідань напруги і електромагнітних завад.

Логічні підсистеми та канали взаємодії системи контролю 3D друку. Інформаційно керувальна система на базі Raspberry Pi 5 структурована як сукупність логічних підсистем, між якими організовано обмін командами G коду, телеметрією, відеопотоком і результатами інференсу. Узгоджена робота цих підсистем формує замкнений контур спостереження і втручання у процес друку. До основних підсистем належать вузол принтер хост, відеопідсистема, модуль штучного інтелекту, підсистема політик втручання, веб інтерфейс оператора та підсистема зберігання даних.

Вузол принтер хост забезпечує двосторонній обмін даними між Raspberry Pi 5 і мікроконтролером принтера. У прямому напрямку подаються послідовності G коду з буферизацією у прошивці, у зворотному надходять значення температур, стани кінцевих вимикачів, коди помилок та інші службові повідомлення. Основним транспортним механізмом є інтерфейс USB послідовного типу або UART.

Відеопідсистема відповідає за захоплення, буферизацію та часову синхронізацію кадрів з однієї чи кількох камер. Кадри можуть маркуватися технологічними подіями, такими як зміна шару, початок побудови периметра або

друк мостів. Така синхронізація підвищує відтворюваність результатів аналізу та дозволяє пов'язувати візуальні аномалії з конкретними фрагментами G коду. Для потокового відображення у веб інтерфейсі використовують апаратне кодування відео за стандартами H точка двісті шістдесят чотири або H точка двісті шістдесят п'ять, тоді як модуль машинного зору працює з сирими або мінімально попередньо обробленими зображеннями.

Модуль штучного інтелекту виконує інференс згорткових нейронних мереж або легковагових детекторів над вхідними зображеннями, формуючи імовірнісні оцінки наявності дефектів. Вихід моделі описується рівнянням:

$$p(t) = f_{\theta} (x_{\text{img}}(t), x_{\text{tel}}(t)), \quad (3.5)$$

де  $x_{\text{img}}(t)$  вектор ознак, отриманий із зображення,  $x_{\text{tel}}(t)$  вектор телеметричних ознак за той самий момент часу, а  $p(t)$  вектор імовірностей для множини діагностованих дефектів  $D$ , до яких належать перевитрата матеріалу, недоекструзія, пропуски нитки, відшарування, нитіння та інші.

Для переходу від набору імовірностей до єдиного індикатора ризику вводять інтегральну оцінку з урахуванням вартості помилки для кожного типу дефекту:

$$R(t) = \sum_{d \in D} c_d p_d(t), \quad (3.6)$$

де  $c_d$  ваговий коефіцієнт, що відображає тяжкість наслідків дефекту типу  $d$ , а  $p_d(t)$  імовірність виникнення цього дефекту у момент часу  $t$ .

Підсистема політик втручання реалізує прийняття керувальних рішень на основі інтегрального індикатора ризику, телеметрії та контексту G коду. Для формалізації вводиться відображення:

$$u_{\text{pol}}(t) = \Pi(R(t), x_{\text{tel}}(t), \text{контекст G коду}), \quad (3.7)$$

де  $\Pi$  оператор політики,  $x_{\text{tel}}(t)$  часові залежності температур, швидкостей і службових станів, а  $u_{\text{pol}}(t)$  обране керувальне рішення, яке може означати постановку друку на паузу, зниження швидкості, корекцію температури або відсутність втручання.

Щоб зменшити кількість помилкових спрацювань, застосовують порогові значення, гістерезис і механізми приглушення короткочасних аномалій. Для

інтегрального індикатора ризику задають два пороги. Нижчий поріг  $R_{\text{low}}$  відмежовує нормальний режим від області підвищеної уваги, вищий поріг  $R_{\text{high}}$  відповідає рівню, за якого потрібне автоматичне безпечне втручання. Інтервал підвищеної уваги задають умовою:

$$R_{\text{low}} < R(t) \leq R_{\text{high}}, \quad (3.8)$$

де значення нижче  $R_{\text{low}}$  відповідають звичайному моніторингу без втручання, а перевищення  $R_{\text{high}}$  запускає автоматичну безпечну дію типу паузи чи зупинки.

Веб інтерфейс забезпечує інтерактивну взаємодію оператора із системою, запуск і зупинку завдань друку, керування чергою, перегляд телеметрії, журналів та відеопотоку з нанесеними мітками виявлених дефектів, а також налаштування порогів і політик втручання. Сховище даних зберігає журнали, телеметрію та вибірккові кадри або відеофрагменти для ретроспективного аналізу і подальшого донавчання моделей.

Для опису даних, що надходять до сховища, вводять об'єднаний вектор спостережень:

$$z(t) = [x_{\text{tel}}(t), p(t), m_G(t), m_{\text{safe}}(t)], \quad (3.9)$$

де  $x_{\text{tel}}(t)$  вектор телеметричних показників у момент часу  $t$ ,  $p(t)$  вектор імовірнісних оцінок ризику або інтегральних індикаторів аномалій,  $m_G(t)$  мітки, що кодують контекст  $G$  коду для поточного фрагмента траєкторії, а  $m_{\text{safe}}(t)$  службові позначки підсистеми безпеки, які фіксують спрацювання захисних механізмів.

Накопичені реалізації вектора  $z(t)$  дозволяють оцінювати ефективність політик втручання, вдосконалювати архітектуру моделей та адаптувати систему до нових типів дефектів. Узгоджена робота описаних підсистем на базі формального поділу функцій між мікроконтролером і хост рівнем створює основу для побудови надійного інтелектуального контуру контролю процесу FDM або FFF друку.

Емпірична модель оцінки часу інференсу. Для кількісної оцінки обчислювальних витрат на інференс полегшених моделей глибокого навчання типу ResNet вісімнадцять та MobileNet V три на платформі Raspberry Pi 5 побудовано емпіричну модель залежності середнього часу інференсу  $t_{\text{inf}}$  від просторової

роздільної здатності вхідного зображення з шириною  $W$  та висотою  $H$ . За фіксованої архітектури моделі, незмінного формату тензора та сталих параметрів середовища обчислень, таких як тип квантування і використання SIMD прискорення NEON, час обчислення одного кадру наближається до лінійної функції від площі вхідного зображення:

$$t_{\text{inf}}(W, H) \approx a + bWH, \quad (3.10)$$

де  $t_{\text{inf}}$  середній час інференсу одного кадру у мілісекундах,  $W$  та  $H$  ширина і висота вхідного зображення у пікселях, а  $a$  та  $b$  емпіричні коефіцієнти, що визначаються за результатами вимірювань і залежать від архітектури моделі, реалізації фреймворку та ступеня використання SIMD прискорення.

На основі вимірювань для квадратних зображень роздільної здатності від шістдесят чотири на шістдесят чотири до двісті п'ятдесят шість на двісті п'ятдесят шість пікселів сформовано табличні дані.

Таблиця 3.1

Час інференсу моделі на Raspberry Pi 5 залежно від роздільної здатності вхідного зображення

Роздільна здатність, пікселі	Час інференсу, мс
$64 \times 64$	3,2
$96 \times 96$	4,8
$128 \times 128$	7,1
$160 \times 160$	9,3
$192 \times 192$	12,5
$224 \times 224$	14,9
$256 \times 256$	18,4

У таблиці наведено середній час інференсу для кожної роздільної здатності. Це дозволяє оцінити, як збільшення площі вхідного тензора впливає на часові витрати під час аналізу зображення.

На основі даних таблиці побудовано графік залежності  $t_{\text{inf}}$  від роздільної здатності квадратного вхідного зображення.

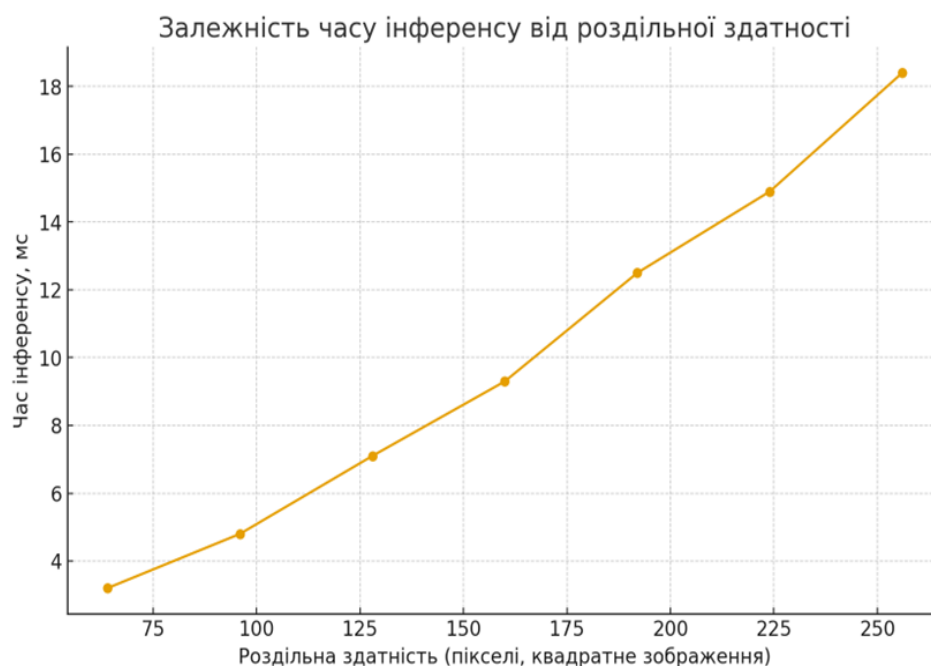


Рис. 3.2. Залежність часу інференсу від роздільної здатності вхідного зображення

На горизонтальній осі рисунка відкладено роздільну здатність зображення у пікселях, на вертикальній осі подано виміряний час інференсу в мілісекундах. Крива демонструє квазілінійний характер зростання часу інференсу зі збільшенням площі вхідного тензора, що узгоджується з теоретичною оцінкою обчислювальної складності порядку пропорційності площі зображення для мережі фіксованої глибини. Особливий практичний інтерес має діапазон до роздільної здатності сто шістдесят на сто шістдесят пікселів, у якому середній час інференсу не перевищує дев'ять десяті мілісекунд, що відповідає частоті аналізу понад сто кадрів за секунду та є достатнім для періодичного візуального контролю процесу друку.

Для більших роздільних здатностей, зокрема у зоні від двісті двадцять чотири до двісті п'ятдесят шість пікселів, час інференсу зростає до п'ятнадцяти вісімнадцяти мілісекунд. Це зменшує запас по латентності й потребує обережнішого вибору робочого розміру вхідного зображення, щоб залишити резерв продуктивності для інших служб хост системи.

### 3.3. Оцінювання використання апаратних ресурсів центрального процесора та оперативної пам'яті

Метою експериментального дослідження було кількісно оцінити, яку частку обчислювальних ресурсів Raspberry Pi 5 споживає інференс моделі виявлення дефектів під час оброблення відеопотоку з різною роздільною здатністю. Для цього вимірювали середнє завантаження центрального процесора та відносну частку використаної оперативної пам'яті за сталих налаштувань моделі і програмного середовища.

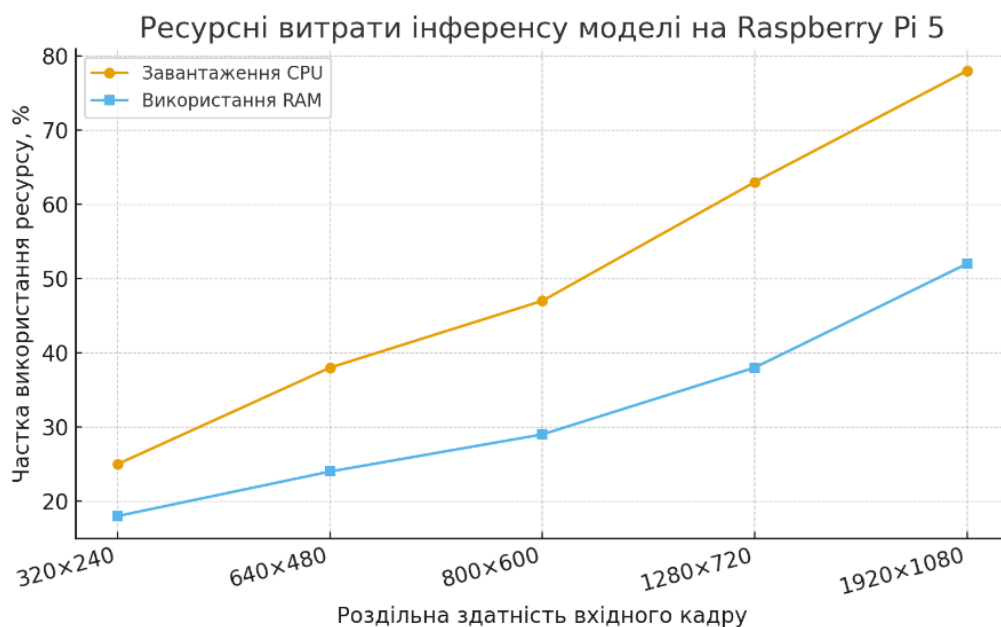


Рис. 3.3. Ресурсні витрати інференсу моделі на Raspberry Pi 5 залежно від роздільної здатності вхідного кадру

На рисунку, що відповідає основному експерименту з відеопотоком, показано, як зі збільшенням роздільної здатності вхідного кадру від триста двадцять на двісті сорок до тисяча дев'ятсот двадцять на тисяча вісімдесят пікселів середнє завантаження центрального процесора зростає від приблизно однієї чверті до майже восьми десятих доступного ресурсу, тоді як частка використаної оперативної пам'яті збільшується з рівня близько однієї п'ятої до значень, що перевищують половину доступної пам'яті. Крутіший нахил кривої завантаження

процесора свідчить про лімітуючу роль цього ресурсу для підвищення роздільної здатності за сталого інтервалу між кадрами.

Рисунок 3.3 ілюструє залежність завантаження центрального процесора та використання оперативної пам'яті від роздільної здатності відеопотоку. Видно, що для режимів безперервного моніторингу доцільно обмежуватися роздільною здатністю не вищою за тисяча двісті вісімдесят на сімсот двадцять пікселів. У цьому разі зберігається помітний резерв продуктивності для служб обміну даними, веб інтерфейсу та підсистем журналювання.

Після загальної оцінки за відеопотоком проведено детальніший експеримент, у якому модель працювала з квадратними статичними зображеннями роздільної здатності від шістдесят чотири на шістдесят чотири до двісті п'ятдесят шість на двісті п'ятдесят шість пікселів. Для кожного розміру вимірювали середнє завантаження центрального процесора та фактичний обсяг зайнятої оперативної пам'яті під час стабільної роботи.

Таблиця 3.2

Завантаження центрального процесора та використання оперативної пам'яті під час інференсу залежно від роздільної здатності квадратного вхідного зображення

Роздільна здатність, пікселі	Завантаження CPU, %	Використання RAM, МБ
64 × 64	28	180
96 × 96	35	210
128 × 128	43	245
160 × 160	51	280
192 × 192	60	320
224 × 224	68	360
256 × 256	77	405

У таблиці 3.2 наведено значення завантаження центрального процесора у відсотках та обсягу використаної оперативної пам'яті в мегабайтах для кожної

квадратної роздільної здатності. Це дозволяє порівняти темпи зростання обчислювального навантаження і пам'яті під час збільшення розміру вхідного кадру.

Графічне подання цих даних наведено на рисунку 3.4.

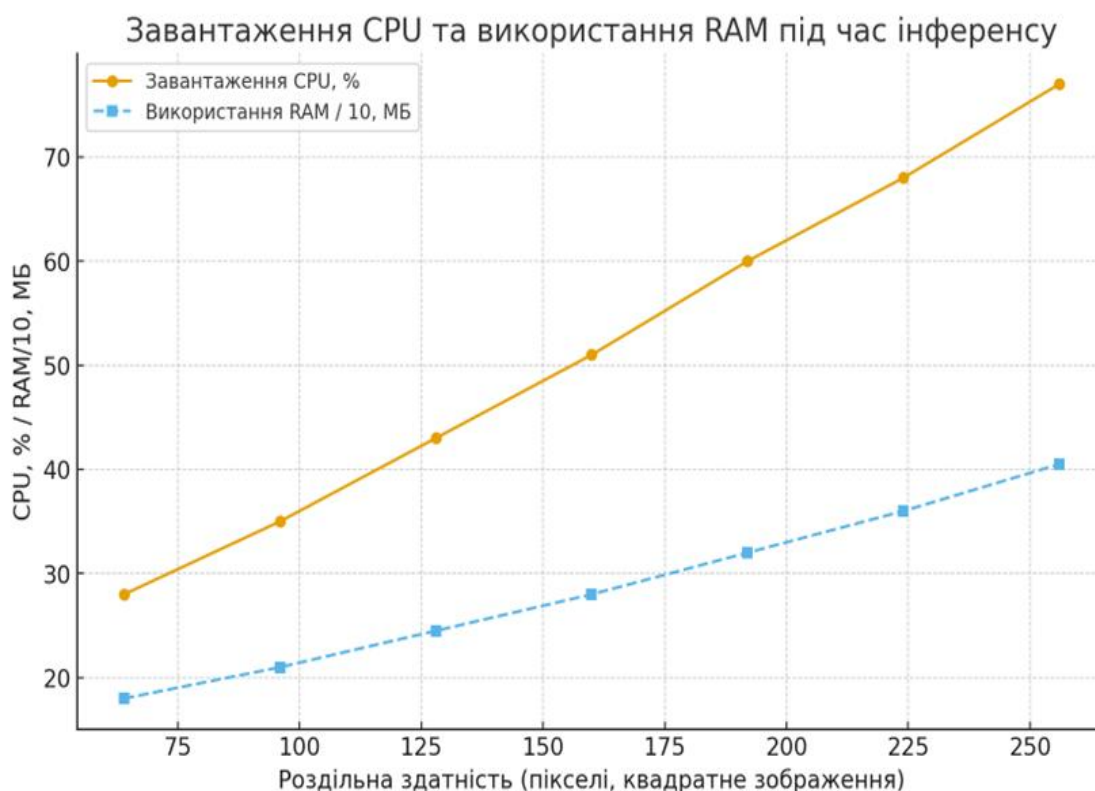


Рис. 3.4 Завантаження центрального процесора та використання оперативної пам'яті під час інференсу залежно від роздільної здатності квадратного вхідного зображення

На одній діаграмі зображено дві криві у спільній системі координат. Перша відображає завантаження центрального процесора у відсотках, друга використання оперативної пам'яті, масштабоване поділом на десять. Такий прийом дозволяє розмістити обидві залежності у близьких діапазонах значень по вертикальній осі і спростити зорове порівняння темпів зростання обох показників. У діапазоні до сто шістдесят на сто шістдесят пікселів середнє завантаження процесора не перевищує половини доступного ресурсу, а обсяг використаної оперативної пам'яті залишається в межах приблизно трьохсот мегабайтів. Це означає, що розробник



має суттєвий запас для паралельної роботи служб подачі команд G коду, мережесервісів і веб інтерфейсу без ризику деградації продуктивності.

Для роздільних здатностей двісті двадцять чотири на двісті двадцять чотири та двісті п'ятдесят шість на двісті п'ятдесят шість пікселів завантаження центрального процесора наближається до семи і восьми десятих максимальної потужності, а використання оперативної пам'яті перевищує триста п'ятдесят та чотириста п'ять мегабайтів. Це свідчить про потенційну конкуренцію за ресурси з іншими процесами хост системи та вказує на необхідність або зменшення частоти аналізу кадрів, або додаткової оптимізації моделі, наприклад застосування глибокого квантування чи подальшого спрощення архітектури.

Сукупний аналіз результатів таблиці та рисунків дозволяє сформулювати практичний висновок для проектування системи контролю 3D друку на базі Raspberry Pi 5. Оптимальним компромісом між якістю вхідних даних для модуля штучного інтелекту та ресурсними витратами є використання зображень з роздільною здатністю близько сто шістдесят на сто шістдесят пікселів для квадратних кадрів або рівня тисяча двісті вісімдесят на сімсот двадцять пікселів для відеопотоку. У цьому разі центральний процесор і оперативна пам'ять працюють із помітним запасом, що забезпечує стабільність роботи всієї інформаційно керувальної системи та залишає резерв для подальшого ускладнення моделей і розширення функціональності.

### **3.4 Підсумкові висновки щодо вибору Raspberry Pi 5 як хост рівня**

Експериментальні результати підтвердили, що Raspberry Pi 5 має достатню обчислювальну спроможність для виконання ролі хост рівня у системі контролю процесу FDM або FFF друку з модулем машинного зору.[90] Формально виділено дві множини завдань. Множина  $M$  відповідає контурам жорсткого реального часу на мікроконтролері принтера, зокрема інтерполяції траєкторій, керуванню кроковими приводами та підтриманню температури. Множина  $H$  відповідає

завданням хост рівня, які включають інференс моделей, аналіз телеметрії, веб керування та журналювання. Розбиття подають так:

$$M \cup H = F, \quad M \cap H = \emptyset, \quad (3.11)$$

де  $F$  повна множина функцій системи керування, а умова порожнього перетину гарантує відсутність суперечливого дублювання функцій між мікроконтролером і хост рівнем.

Графіки часу інференсу та завантаження ресурсів показують, що за роздільної здатності вхідних кадрів до рівня приблизно двох мегапікселів полегшені згорткові моделі забезпечують час інференсу, сумісний з періодичним моніторингом у режимі м'якого реального часу. Це означає, що модуль штучного інтелекту на Raspberry Pi 5 може обробляти відеопотік з частотою, достатньою для своєчасного виявлення небезпечних аномалій друку.

Аналіз завантаження центрального процесора та використання оперативної пам'яті демонструє наявність суттєвого ресурсного резерву за умови раціонального вибору роздільної здатності відеопотоку та вхідних зображень для інференсу. У діапазоні до сто шістдесят на сто шістдесят пікселів для квадратних кадрів та до тисяча двісті вісімдесят на сімсот двадцять пікселів для відео завантаження центрального процесора та використання оперативної пам'яті не досягають граничних значень. Це дозволяє одночасно виконувати подачу G коду, обслуговувати веб інтерфейс і здійснювати журналювання. Сукупність архітектурного розподілу завдань, вимірюваних часів інференсу та оцінок ресурсомісткості підтверджує технічну доцільність застосування Raspberry Pi 5 як хост рівня у запропонованій інформаційній технології.

### 3.5. Базове програмне середовище хоста

Базове програмне середовище хоста має забезпечувати сумісність з типовими хост сервісами бюджетних принтерів і достатню гнучкість для інтеграції модулів інференсу та спеціалізованих служб.[91] Для практичного використання

розглядають три основні варіанти побудови операційного середовища, узагальнені у таблиці.

У таблиці порівняно варіант OctoPi на базі Raspberry Pi OS шістдесят чотири біт, варіант Raspberry Pi OS з ручним налаштуванням та варіант Ubuntu Server для архітектури ARM шістдесят чотири. Для кожного вказано основні переваги, обмеження та типові сценарії використання.

Таблиця 3.3

## Варіанти програмного середовища хоста Raspberry Pi 5

Варіант середовища	Основні переваги	Обмеження та типові сценарії
OctoPi на базі Raspberry Pi OS 64 біт	Швидке розгортання, попередньо налаштований OctoPrint, наявні драйвери камер, широка екосистема плагінів, мінімальна кількість ручних налаштувань	Обмежена гнучкість для вбудовування нестандартних модулів штучного інтелекту, переважна орієнтація на прошивку Marlin і конфігурації, що є близькими за структурою та призначенням
Raspberry Pi OS 64 біт з ручним налаштуванням	Повний контроль над складом пакунків, зручна інтеграція мікросервісів, можливість комбінувати OctoPrint, Moonraker та власні служби, просте використання контейнеризації	Потребує вищої кваліфікації адміністратора, значну частину рішень необхідно конфігурувати вручну, відповідальність за безпеку та оновлення повністю покладається на розробника системи
Ubuntu Server ARM64	Орієнтація на практики безперервної інтеграції та розгортання, розвинені засоби спостереження, зручна робота з Docker або Podman, єдина модель керування службами через systemd	Підвищені вимоги до ресурсів та обсягу накопичувача, частина специфічних інструментів Raspberry Pi потребує додаткових налаштувань перед використанням у задачах моніторингу та керування друком

У системних компонентах для всіх варіантів обов'язковими є повноцінний інтерпретатор Python з підтримкою віртуальних середовищ, менеджер пакунків, система керування версіями, компілятор та засоби збирання нативних розширень.

Для фронтального доступу до сервісів використовують nginx як зворотний проксі, а застосунки на основі асинхронних веб фреймворків обслуговуються серверами класу uvicorn або gunicorn. Для кешування і організації черг подій застосовують Redis, який одночасно виконує роль шини повідомлень.

Медіастек зосереджено на бібліотеках FFmpeg або GStreamer, що працюють через підсистему відеопристроїв ядра V чотири L два. У разі використання камер інтерфейсу CSI активною є зв'язка з бібліотекою libcamera, яка забезпечує стабільну роботу штатних модулів камер Raspberry Pi. Для UVC камер через інтерфейс USB конфігурування здійснюють через V чотири L два з фіксацією експозиції та балансу білого, що зменшує варіативність вхідних ознак для інференсу. Для потоків рівня Full HD з частотою тридцять кадрів за секунду рекомендується використовувати порти USB третього покоління, щоб уникнути артефактів через нестачу пропускну здатності.

Програмне середовище хоста включає засоби забезпечення надійності. Журнали сервісів ротуються з обмеженням максимального розміру та кількості файлів, відео і журнали виносяться на твердотільний накопичувач з підтримкою операцій TRIM. Стан носіїв контролюється утилітами моніторингу, а критичні служби конфігуруються як одиниці systemd з політикою автоматичного перезапуску і відкладеним стартом до повної готовності мережевої підсистеми.

В окремих конфігураціях основним хост сервісом для прошивки Marlin виступає OctoPrint, який забезпечує подачу G коду через інтерфейс USB, автоматичне відновлення з'єднання, відображення стану принтера та підтримку плагінного шару для журналювання, сценаріїв до і після друку та інтеграції відео. У зв'язці з Klipper частину функцій планування руху виконують на хості. Комбінація Klipper і Moonraker надає розвинений програмний інтерфейс, а веб оболонки Mainsail або Fluidd реалізують інтерфейс оператора. Для обох варіантів модуль штучного інтелекту взаємодіє з хост сервісами через програмні інтерфейси OctoPrint або Moonraker, передаючи команди паузи, зупинки та виклику макросів.

З погляду безпеки веб інтерфейс захищається багаторівневою автентифікацією, обмеженням мережевих адрес, термінацією TLS на проксі та

можливістю розміщення сервісів у контейнерах. Доступ до послідовних портів регулюється правилами udev, а користувач хоста включається до спеціальних груп для пристроїв відео та послідовних інтерфейсів, що усуває потребу в надмірних привілеях.

Оптимізація продуктивності на Raspberry Pi 5 спрямована на стабілізацію латентності інференсу та доставки відеопотоку. Забезпечується ефективний тепловий режим, стабільне живлення, стиснення та ротація журналів і відео. Пріоритет процесів захоплення кадрів і інференсу підвищується відносно другорядних служб. Конвеєр системи поділяється на етапи захоплення, попередньої обробки, інференсу та застосування політик втручання. Середній час виконання кожного етапу не повинен перевищувати допустимий інтервал між кадрами, що визначає потрібну частоту оновлення. Виконання цього обмеження гарантує, що загальна латентність не перевищить допустимий бюджет часу.

У межах бюджетного сегмента виділяють кілька типових профілів розгортання. Профіль на базі OctoPi орієнтовано на прошивку Marlin і взаємодію через USB з використанням камери рівня Full HD та окремого сервісу інференсу, який обмінюється з OctoPrint через програмний інтерфейс. Профіль на базі чистої Raspberry Pi OS робить той самий стек більш гнучким завдяки можливості ручного налаштування камер і розміщення сервісів інференсу як автономних компонентів. Профіль для Klipper комбінує Moonraker з Mainsail або Fluidt, а модуль штучного інтелекту працює через програмний інтерфейс Moonraker. Усі профілі забезпечують стабільну подачу G коду, надійний відеоканал і керовану латентність.

### **3.6. Склад програмних модулів**

Логічна модель програмної частини системи побудована за принципом слабого зв'язування компонентів через шину повідомлень з низькою затримкою та чітко визначеними інтерфейсами керування. Відеоінформація надходить до модуля інференсу, на її основі оцінюються ризики дефектів, модуль політик інтерпретує ці оцінки разом із телеметрією принтера та формує керувальні команди

для хост сервісу друку. Усі події, телеметрія й відеофрагменти архівуються у спеціалізоване сховище з метою відтворення сценаріїв та подальшого донавчання моделей.

Модуль `print host` є уніфікованим шаром керування принтерами на прошивках `Marlin` і `Klipper`. Він забезпечує подачу G коду, збір телеметрії та виконання макросів для безпечної паузи, відновлення друку та аварійної зупинки. Для критичних дій задають обмеження часу реакції, що кількісно визначається вимогою, за якої час від моменту прийняття рішення політикою до фактичного виконання команди мікропрограмою не перевищує кількох сотень мілісекунд. Це забезпечує достатньо швидке втручання для запобігання пошкодженню виробу.

Модуль `vision service` виконує обробку кадрів і інференс на `Raspberry Pi 5`. Для кожного кадру формується ідентифікатор кадру і шару, часова мітка, тип дефекту, числовий ризик у діапазоні від нуля до одиниці, геометрія рамки або маски та латентність обчислення. Підтримуються архітектури `ResNet` для класифікації та легкі детектори на базі `MobileNet` чи компактних варіантів сімейства `YOLO`, які розгортаються через `ONNX Runtime` або `TensorFlow Lite`. Цільова частота аналізу для класифікаційних задач становить п'ятнадцять тридцять кадрів за секунду, для задач детекції не менше десяти кадрів за секунду завдяки масштабуванню зображення до прийняттого розміру. Для підвищення надійності застосовується каскадна верифікація та накопичення зразків високого ризику в окремому буфері для подальшого донавчання моделей.

Модуль `policy engine` агрегує телеметрію та результати інференсу, застосовує гістерезис і контекстні пороги, що залежать від номера шару, швидкості друку та матеріалу. Критичні події температурного чи комунікаційного характеру призводять до негайної паузи незалежно від поточного виходу інференсу. Передбачено режими роботи аудиту без втручання, надання рекомендацій та автоматичного втручання з внутрішньою подвійною верифікацією. Усі рішення протоколюються разом із поясненням причин і фактичними значеннями порогових параметрів.

Модуль web ui надає оператору засоби керування друком у реальному часі, відображення телеметрії, перегляд відео з накладеними позначками виявлених дефектів, адміністрування конфігурацій та доступ до журналів. Реалізовано рольову модель доступу і шифрування трафіку за допомогою TLS. Модуль datastore відповідає за зберігання подій і телеметрії у базі даних, а також за файлове сховище для знімків і відеофрагментів, з ротацією та компресією даних, індексацією за часом і номером шару та експортом у табличні формати для статистичного аналізу. Шина повідомлень на базі Redis або MQTT забезпечує мінімальну затримку та гарантії збереження порядку доставки повідомлень для потоків інференсу, телеметрії, рішень політик і індикаторів системного стану.

Розгортання системи у типових сценаріях передбачає один вузол на Raspberry Pi 5 з сервісами у вигляді одиниць systemd або контейнерів. Критичні процеси одержують підвищені пріоритети. У разі деградації продуктивності система знижує частоту інференсу або переходить у режим журналювання без втручання. Аварійні сценарії включають сторожовий механізм у модулі print host, транзакційне журналювання в policy engine та безпечне завершення друку при збоях живлення. Гнучкість розширення забезпечується завдяки плагінній моделі для vision service, конфігурованим правилам і порогам у policy engine та можливості додавання нових подань і звітів у web ui. Контракти між модулями описано JSON схемами, що підтримують зворотну сумісність.

### **3.7. Інтеграція з прошивкою принтера**

Канал керування організовано через інтерфейси USB послідовного типу або UART. Команди G коду надходять до буфера прошивки та планувальника руху, що дозволяє відокремити часові особливості подачі даних від апаратної генерації траєкторій. Для швидких втручань використовуються ідемпотентні макроси з мінімальною довжиною командної послідовності. На хості реалізовано додаткову фільтрацію рішень і тимчасове припинення подачі G коду до підтвердження виконання критичної команди, що скорочує час до фактичного спрацювання.

У прошивці Klipper застосовують макроси безпечної паузи з ретракцією, підйомом по осі Z, паркуванням та подальшим відновленням з поверненням до робочої позиції. У прошивці Marlin аналогічні сценарії реалізуються через GCODE Scripts в OctoPrint або через внутрішні макроси за наявності відповідних опцій у конфігурації. Взаємодія policy engine з прошивкою відбувається через програмні інтерфейси Moonraker або OctoPrint. У всіх випадках гарантується ідемпотентність команд, безпечний підйом по осі Z та коректний перехід між системами координат. Телеметрія і журнали втручань синхронізуються для забезпечення повної трасованості рішень.

Розгортання модуля штучного інтелекту. Архітектуру модуля штучного інтелекту сформовано з урахуванням обмеженого обчислювального бюджету Raspberry Pi 5 та необхідності максимальної ймовірності виявлення дефектів при мінімальній кількості хибних спрацьовувань. Для класифікаційних завдань використовуються моделі типу ResNet п'ятдесят або ResNet сто один, а для детекції дрібних структур модифікована ResNet п'ятдесят з пірамідою ознак. Калібрування ймовірностей виконується методом температурного масштабування логітів. Ймовірність належності кадру до класу дефекту  $d$  за вхідного вектора ознак  $x$  описується формулою:

$$p(d | x) = \text{softmax}(z/T), \quad (3.12)$$

де  $z$  вектор логітів моделі до нормування,  $T$  додатний температурний параметр, що регулює крутість розподілу, а оператор  $\text{softmax}$  перетворює логіти на нормований вектор ймовірностей.

Модель експортується у формат ONNX зі статичним розміром вхідного тензора, злитими шарами нормалізації та вилученими гілками, які використовувались лише на етапі навчання. Надалі застосовується квантування до цілочисельного формату INT вісім. Для кожного тензора визначають масштаб  $\Delta$  та зсув  $z$ . Квантування описують співвідношеннями:

$$q = \text{round}(x/\Delta + z), \quad x \approx \Delta q - z, \quad (3.13)$$

де  $x$  дійсне значення елемента тензора,  $q$  квантизоване представлення, а оператор  $\text{round}$  позначає округлення до найближчого цілого. Перше співвідношення описує



пряме перетворення реального значення у квантизоване, друге відновлює наближене дійсне значення з цілочисельного коду. Калібрування масштабів і зсувів здійснюється за критерієм мінімізації відхилення розподілів або за методом мінімакс.

Повідомлення сервісу комп'ютерного зору для моменту часу  $t$  описується вектором:

$$y_t = (t, \text{layer\_id}, \text{mode}, (d_k, r_k, b_k)_k, \tau_{\text{inf}}, \text{model\_id}), \quad (3.14)$$

де  $t$  часова мітка,  $\text{layer\_id}$  номер шару,  $\text{mode}$  режим роботи, трійки  $d_k, r_k, b_k$  описують тип дефекту, оцінку ризику та геометрію рамки або маски для кожного виявленого об'єкта,  $\tau_{\text{inf}}$  латентність інференсу, а  $\text{model\_id}$  ідентифікує версію моделі. Політики застосовують часову фільтрацію та гістерезис і формують інтегральний ризик  $R_t$  з умовою втручання:

$$R_t \geq \theta_{\text{risk}}, \quad \text{pers}(R_t) \geq T_{\text{min}}, \quad (3.15)$$

де  $\theta_{\text{risk}}$  порогова величина ризику,  $\text{pers}(R_t)$  тривалість перебування ризику вище порога, а  $T_{\text{min}}$  мінімально допустима тривалість аномального стану перед втручанням.

### 3.8. Веб інтерфейс і програмний інтерфейс доступу. Політики втручання

Підсистема взаємодії з оператором реалізована як односторінковий веб клієнт у зв'язці з бекендом класу ASGI. Синхронні керувальні операції виконуються через запити REST, події реального часу доставляються через канали WebSocket або потоки серверних подій. Доступ до інтерфейсу захищено шифруванням TLS, рольовою моделлю користувачів і короткоживучими токенами автентифікації. Усі операції зміни конфігурацій, запуску та зупинки друку реєструються в журналі аудиту. Версійність REST інтерфейсу забезпечують префікси маршрутів, відповіді подаються у форматі JSON, а керувальні операції підтримують ключі ідемпотентності, що запобігає повторному виконанню за повторної відправки запиту.

Метод інтелектуального автоматизованого керування 3D друком формулюється як спосіб побудови керувальної дії на основі прогнозової оцінки ризику технологічної аномалії, що використовує результати машинного навчання для вибору режиму втручання в процес формування виробу. У кожний момент часу технологічний стан системи описується вектором:

$$s_t = \{I_t, v_t, q_t\}, \quad (3.16)$$

де  $s_t$  вектор стану у момент часу  $t$ ,  $I_t$  нормалізований відеокадр або область інтересу шару,  $v_t$  вектор телеметричних вимірювань, таких як температури, положення та швидкості осей, подача матеріалу, параметри обдуву, а  $q_t$  вектор параметрів профілю друку.

Мультимодальне спостереження формують як:

$$o_t = \Psi(f_t, v_t), \quad f_t = M_W(C(I_t)), \quad (3.17)$$

де  $C$  оператор попередньої обробки зображення,  $M_W$  глибинна модель машинного навчання з параметрами  $W$ ,  $f_t$  вектор ознак, вилучених із кадру, а  $\Psi$  оператор інтеграції ознак зображення і телеметрії. Первинна оцінка ризику технологічної аномалії визначається виразом:

$$r_t = R(o_t), \quad r_t \in [0,1], \quad (3.18)$$

де  $R$  функція, вихід якої інтерпретується як імовірність або інтенсивність дефектного режиму.

Для каскадної верифікації вводять вторинну оцінку:

$$\hat{r}_t = V(o_t), \quad (3.19)$$

де  $V$  верифікаційна модель другого рівня, що уточнює ризик і зменшує частоту хибних спрацювань. Пара порогів  $\tau_r$  та  $\tau_v$  визначає тригерну логіку. Якщо  $r_t \leq \tau_r$ , аномалія вважається малоімовірною і уточнення не виконується. Якщо  $r_t > \tau_r$ , обчислюється  $\hat{r}_t$  і аномалія вважається підтвердженою за умови  $\hat{r}_t > \tau_v$ .

Щоб врахувати сталість підвищеного ризику, вводять згладжену оцінку:

$$z_t = (1 - \alpha)z_{t-1} + \alpha\hat{r}_t, \quad (3.20)$$

де  $\alpha$  належить інтервалу від нуля до одиниці і визначає інерційність оцінки, а  $z_{t-1}$  попереднє значення ризику. Чим менше значення  $\alpha$ , тим сильніше згладжуються короткочасні флуктуації.

Лічильник небезпечних кроків  $k_t$  оновлюють за правилом, за яким при  $\hat{r}_t > \tau_v$  значення  $k_t$  збільшується, а при  $\hat{r}_t \leq \tau_v$  скидається до нуля. Такий підхід дозволяє розрізняти одиничні сплески ризику та стійкий небезпечний режим.

Керувальна дія у момент часу  $t$  задається політикою:

$$u_t = \pi(\hat{r}_t, z_t, k_t, m_t, s_t), \quad (3.21)$$

де  $u_t$  вектор керувальних впливів,  $m_t$  код поточного режиму нормальний, попереджувальний, м'яке або жорстке втручання, а  $\pi$  оператор політики, що відображає сукупну оцінку ризику і стан процесу у конкретну дію контролера.

Особливістю моделі є кусочно заданий характер політики залежно від рівня ризику та накопиченої інформації. Узагальнено це подають виразом:

$$u_t = \begin{cases} u_t^{(0)}, & \hat{r}_t \leq \tau_v \text{ і } z_t \leq \tau_{\text{soft}} \text{ та } m_t = 0, \\ u_t^{(1)}, & \tau_v < \hat{r}_t \leq \tau_{\text{soft}} \text{ або } z_t > \tau_{\text{soft}} \text{ та } k_t \geq K_1, \\ u_t^{(2)}, & \tau_{\text{soft}} < \hat{r}_t \leq \tau_{\text{hard}} \text{ або } z_t > \tau_{\text{hard}} \text{ та } k_t \geq K_2, \\ u_t^{(3)}, & \hat{r}_t > \tau_{\text{hard}} \text{ або } z_t > \tau_{\text{hard}} \text{ та } k_t \geq K_3, \end{cases} \quad (3.22)$$

де  $u_t^{(0)} = \pi_{\log}(s_t)$  відповідає журналюванню та можливому візуальному попередженню,  $u_t^{(1)} = \pi_{\text{warn}}(s_t)$  політиці м'якого попередження з паузою або локальним зменшенням швидкості,  $u_t^{(2)} = \pi_{\text{soft}}(s_t)$  м'якому втручання зі значною корекцією швидкості та температур,  $u_t^{(3)} = \pi_{\text{hard}}(s_t)$  жорсткому втручання із зупинкою друку та вимкненням нагрівачів. Параметри  $K_1, K_2, K_3$  задають мінімальну кількість послідовних кроків із підвищеним ризиком, необхідну для переходу до відповідного рівня втручання.

Щоб уникнути надмірно частих жорстких зупинок, вводять обмеження на мінімальний інтервал між такими втручаннями. Нехай  $t_{\text{hard}}$  момент останньої жорсткої зупинки, тоді нове застосування дії  $u_t^{(3)}$  дозволяється лише за умови:

$$t - t_{\text{hard}} \geq \Delta t_{\text{hard}}, \quad (3.23)$$

де  $\Delta t_{\text{hard}}$  мінімально допустимий часовий інтервал.

Динаміка замкненого технологічного процесу з урахуванням вибраної дії задається співвідношенням:

$$s_{t+1} = F(s_t, u_t, D_t), \quad (3.24)$$

де  $D_t$  вектор зовнішніх збурень, що відображає зміну умов охолодження, механічні впливи та інші неконтрольовані фактори. У підсумку керування реалізується в циклі оцінка ризику, накопичення та згладжування, класифікація режиму, вибір дії, перехід у новий стан.

Узагальнена мета політики полягає в мінімізації очікуваних втрат від браку та простоїв на горизонті планування  $T$ . Функціонал якості керування має вигляд:

$$J(\pi) = E \left[ \sum_{t=0}^T C_{\text{fail}}(s_t, \pi(\hat{r}_t, s_t)) \right], \quad (3.25)$$

де  $J(\pi)$  очікуване значення сумарних втрат, а  $C_{\text{fail}}(s_t, \pi(\hat{r}_t, s_t))$  вартість переходу до дефектного стану або простою для заданого стану й обраної дії. Оптимальна політика  $\pi^*$  мінімізує функціонал  $J(\pi)$  за умови динаміки  $s_{t+1} = F(s_t, \pi(\hat{r}_t, s_t), D_t)$  та технічних обмежень на зміни швидкостей, температур і параметрів подачі.

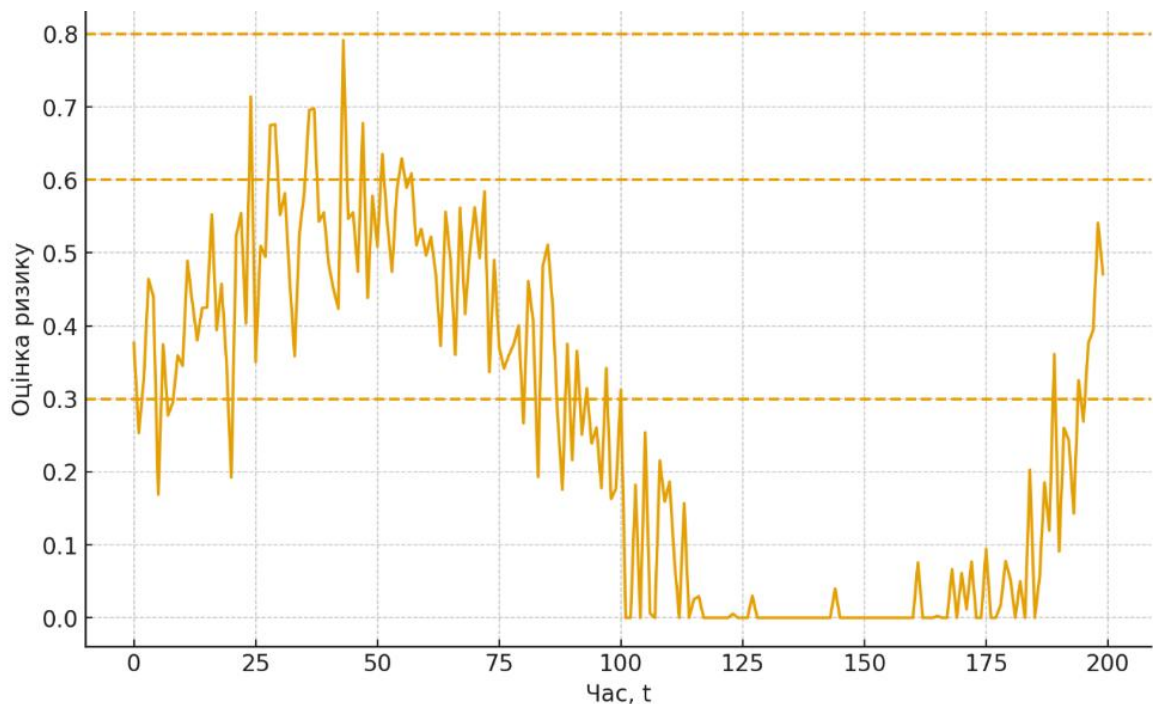


Рис. 3.5. Робота запропонованого методу: динаміка оцінки ризику та згладженої оцінки

Базовою випадковою величиною для прийняття рішень є  $r_t$ , який інтерпретується як оцінка ймовірності наявності дефекту на кадрі в момент часу  $t$ .

Для зменшення впливу шуму та поодиноких хибних спрацьовувань вводиться агрегований ризик:

$$R_t = \alpha r_t + (1 - \alpha)R_{t-1}, \quad (3.26)$$

де  $\alpha$  належить інтервалу від нуля до одиниці і визначає інерційність оцінки, а  $R_{t-1}$  попереднє значення ризику.

Переходи між режимами спостереження, попередження та активного втручання описуються становою машиною з контекстними порогами  $\theta_c$ , які залежать від номера шару, типу траєкторії та матеріалу. Перехід до більш критичного стану відбувається за умов:

$$R_t \geq \theta_c, \quad N_t \geq N_{min}, \quad (3.27)$$

де  $N_t$  кількість кадрів у фіксованому часовому вікні, для яких перевищено порогове значення, а  $N_{min}$  мінімальна кількість підтверджень.

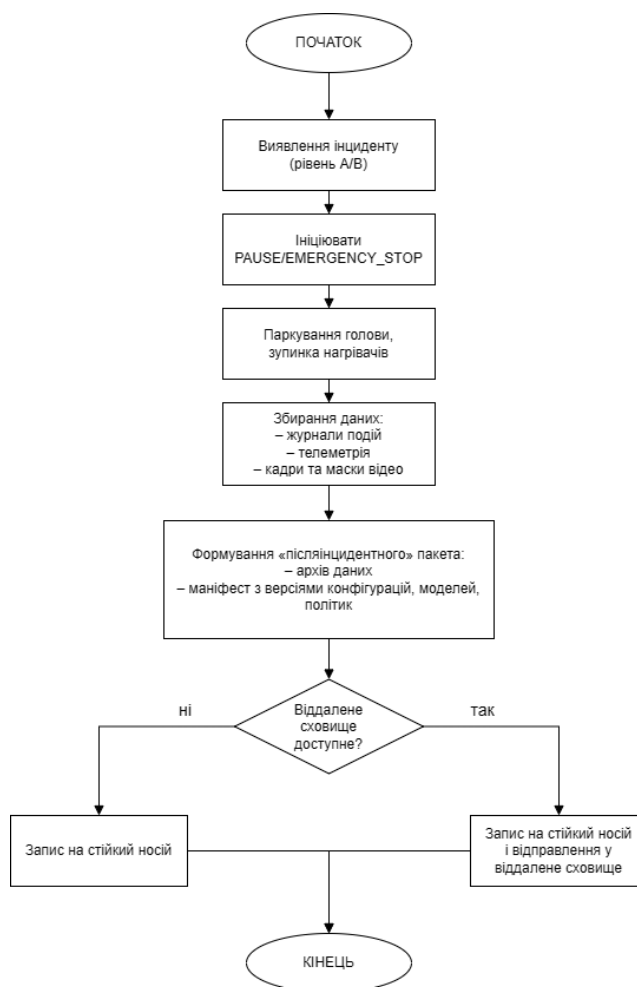


Рис. 3.6 Адаптивний вибір режиму втручання у процесі 3D друку

На рисунку наведено часові залежності первинної оцінки ризику  $r_t$ , сформованої моделлю машинного навчання, та згладженого значення ризику  $R_t$ , отриманого експоненціальним згладжуванням. Помітно, що миттєві значення ризику можуть містити випадкові піки, які не завжди є індикаторами реального дефекту. Згладжене значення дозволяє виявляти стійкі загрози та визначати необхідність переходу до режимів м'якого або жорсткого втручання. Лінії порогів  $\tau_r$ ,  $\tau_{\text{soft}}$ ,  $\tau_{\text{hard}}$  демонструють умови переходу між рівнями політики.

Рисунок 3.6 відображає часову послідовність вибору режимів керування, які реалізуються згідно з адаптивною політикою. У початкові моменти переважає нормальний режим. При наближенні оцінки ризику до порогових значень система переходить до режиму попередження та м'якого втручання, а подальше зростання ризику викликає активацію жорсткого втручання, що забезпечує своєчасну зупинку технологічного процесу до появи критичного дефекту.

На рисунку 3.7 порівнюються традиційний підхід до керування технологічним процесом і запропонований інтелектуальний метод. Показано, що зі збільшенням кількості завдань друку очікувані втрати для традиційної схеми зростають значно швидше, тоді як застосування запропонованої моделі дозволяє суттєво зменшити втрати матеріалу, часу та енергії завдяки превентивному впливу і ранньому виявленню потенційних відхилень.

Описана інтелектуальна модель адаптивного вибору керувальних рішень у процесі FDM або FFF друку, разом із моделлю наглядового контролю та методом каскадної ML політики, відповідає формулюванням наукових результатів щодо наглядового контролю, інтелектуального керування та мультисенсорної інтеграції, поданих у окремому документі з науковими результатами здобувача.

Синхронізація відео та G коду. Метою синхронізації є прив'язка кожного відеокадру до конкретного шару з номером  $L$ , типу траєкторії та висоти по осі  $Z$ . Це необхідно для коректного накладання результатів аналізу зображень на геометрію виробу та подальшого використання накопичених даних для навчання моделей і формування політик керування.

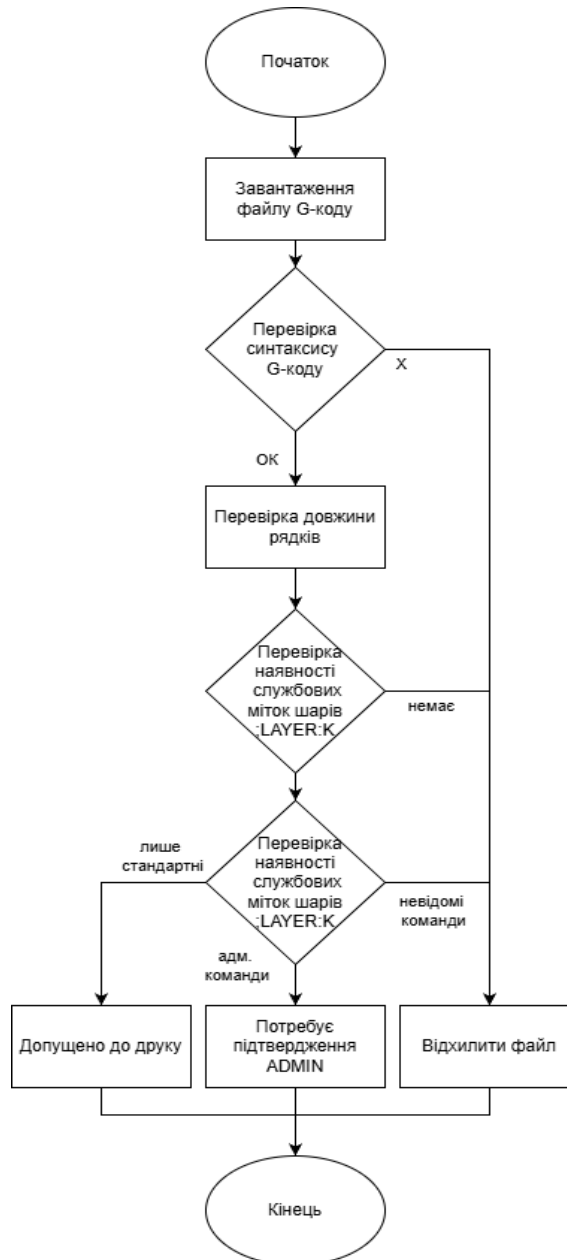


Рис. 3.7 Економічний ефект запропонованого методу

Відеосервіс підтримує кільцеву буферизацію та виконує ретроспективне і проспективне зіставлення кадрів з подіями, отриманими від підсистеми друку і телеметрії, з урахуванням поточної оцінки затримки кодування  $\hat{\Delta}_{enc}$ . Оцінки затримок оновлюються за правилом експоненційного згладжування:

$$\hat{\Delta}_t = \alpha \Delta_t^{obs} + \beta \hat{\Delta}_{t-1}, \quad (3.28)$$

де  $\Delta_t^{obs}$  є спостережуваним значенням затримки,  $\hat{\Delta}_{t-1}$  є попередньою оцінкою, а коефіцієнт  $\beta$  дорівнює одиниці мінус  $\alpha$ . Така форма згладжування дає можливість

фільтрувати випадкові флуктуації затримки та водночас відстежувати повільні зміни її середнього рівня.

Повільний дрейф часових позначок компенсується лінійною поправкою часу кадру:

$$t' = t + \varepsilon t, \quad (3.29)$$

де  $\varepsilon$  є коефіцієнтом дрейфу, а  $t'$  є скоригованим часом кадру. Лінійна модель дрейфу достатня для типових режимів роботи камер і кодерів, коли відхилення накопичується повільно та приблизно пропорційне часу.

Якість синхронізації оцінюється середньою абсолютною похибкою прив'язки кадрів до подій шарів:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |t_{frame,i} - t_{layer,i}|, \quad (3.30)$$

де  $N$  є кількістю порівнюваних кадрів,  $t_{frame,i}$  є часом оброблення  $i$ -го кадру, а  $t_{layer,i}$  є часом відповідної події шару за телеметрією та G кодом. Чим меншим є значення  $MAE$ , тим точніше система співвідносить відео з геометрією друку.

Додатково аналізується частка кадрів, для яких похибка прив'язки перевищує тривалість одного кадру. До прийнятних належать режими, у яких величина  $MAE$  не перевищує приблизно півторакратну тривалість кадру, а також відсутній стабільний систематичний зсув часових міток. За таких умов забезпечується коректна прив'язка виявлених дефектів до геометрії виробу та можливість використання накопичених даних для подальшого аналізу і навчання моделей штучного інтелекту.

Журналювання, телеметрія та резервування. Призначення та цілі надійності. Підсистема надійності призначена для забезпечення відтворюваності інцидентів і доказовості рішень модуля політик на основі повного ланцюжка даних подія – телеметрія – кадр або маска – команда – результат. Основними цільовими показниками є значення точки відновлення даних RPO і часу відновлення RTO для різних типів інформації.

Для журналів подій і телеметрії цільова втрата даних, що характеризується показником RPO, не повинна перевищувати п'ятнадцяти хвилин. Для архівів відео



та кадрів допустимим є RPO до однієї доби. Час відновлення RTO для конфігурацій, профілів друку та політик обмежується інтервалом до тридцяти хвилин, тоді як для бази даних і журналів допускається час відновлення до двох годин.

Узагальнені вимоги до показників RPO та RTO для основних категорій даних наведено в таблиці 3.4. У ній для кожного класу даних подано характерні приклади вмісту, цільові значення RPO та припустимий час відновлення RTO, що надалі використовуються як приймальні критерії для підсистеми резервного копіювання.

Таблиця 3.4

## Цільові значення RPO та RTO для основних категорій даних

Категорія даних	Приклади вмісту	Цільове RPO	Цільове RTO
Конфігурації та профілі	printer.cfg, макроси Klipper, policy.yaml, профілі слайсера, конфігурації контейнерів	Не більше інтервалу між резервними копіями (типово до 24 годин)	До 30 хвилин
Журнали подій і телеметрії	Записи policy-engine, print-host, vision-service, системна телеметрія	Не більше 15 хвилин	До 2 годин
База даних станів і метаданих	Гіпертаблиці TimescaleDB, індекси, історичні ряди телеметрії	Не більше 15 хвилин (для активних діапазонів часу)	До 2 годин
Архіви відео, кадрів і масок	PNG/JPEG кадри, PNG маски з альфа-каналом, H.264 фрагменти 5–10 с	Не більше 24 годин	Не критичний (визначається політикою архівації)

Для конфігурацій та архівів фактичне значення RPO визначається періодичністю резервного копіювання, яка детально описана у відповідному пункті, присвяченому резервуванню та архівації.

Структура журналів подій. Журнали подій формуються на рівнях policy engine, print host, vision service, вебінтерфейсу, а також за даними прошивки через

парсинг службових повідомлень. Кожен запис події має монотонну часову позначку, календарний час, кореляційні ідентифікатори та рівень важливості.

Таблиця 3.5

## Основні поля запису журналу подій

Поле	Призначення	Тип / формат	Приклад значення
ts_monotonic	Монотонна часова мітка для впорядкування подій	Число з плаваючою крапкою	123456.789
ts_wall	«Стіна» часу (календарний час)	ISO 8601	2025-05-10T12:34:56.789Z
Level	Рівень важливості	Перелік {DEBUG, INFO, WARN, ERROR}	WARN
job_id	Ідентифікатор завдання друку	Рядок	job_2025_05_10_001
layer_id	Ідентифікатор шару	Ціле число	42
frame_id	Ідентифікатор кадру	Ціле число	327
Module	Джерело події	Перелік {host, vision, policy, web}	policy
action_type	Тип дії	Перелік {LOG, PAUSE, RESUME, STOP, PARK, CORRECT}	PAUSE
gcode_cmd	Пов'язана команда G-коду (якщо застосовано)	Рядок	M25
Result	Результат виконання дії	Перелік {OK, FAIL, SKIPPED}	OK
trace_id	Трасувальний ідентифікатор наскрізної сесії	Рядок (UUID чи аналог)	3f2a9c0a-...
operator_id	Ідентифікатор оператора (за участі людини)	Рядок або NULL	op_ivan
Payload	Додаткові параметри у форматі JSON	JSON	{ "defect": "stringing", ... }

До обов'язкових полів запису належать часові мітки  $ts_{monotonic}$  і  $ts_{wall}$ , рівень важливості  $level$  з допустимими значеннями DEBUG, INFO, WARN, ERROR, ідентифікатори  $job\_id$ ,  $layer\_id$ ,  $frame\_id$ , а також назва модуля, наприклад  $host$ ,

vision, policy, web. Крім того, фіксуються тип дії action type з можливими значеннями LOG, PAUSE, RESUME, STOP, PARK, CORRECT, пов'язана команда G коду у разі її застосування, результат виконання Result з варіантами OK, FAIL, SKIPPED, трасувальний ідентифікатор trace id та, за наявності втручання людини, ідентифікатор оператора operator id.

Склад основних полів запису журналу подій систематизовано в таблиці 3.5, де для кожного поля наведено призначення, тип або формат та типовий приклад значення. Така формалізація спрощує подальший аналіз логів і побудову запитів до бази даних.

Прикладом є запис події, у якому для конкретного шару та кадру зазначено модуль policy, використаний детектор, наприклад модель на основі ResNet з конкретною конфігурацією, тип і параметри дефекту, наприклад нитіння з довірчою оцінкою і координатами рамки, дію PAUSE з відправленням команди G коду M25, результат виконання цієї дії, а також пояснювальну примітку щодо гістерезису, наприклад підтвердження події для восьми послідовних кадрів.

### 3.9. Профілі телеметрії

Телеметрія формується профільно для кількох підсистем. Для принтера з прошивками Marlin, Klipper або RepRapFirmware частота опитування становить орієнтовно від одного до двох герців, а до складу телеметрії входять температури сопла та столу, стан контурів регулювання типу PID, частота обертання вентиляторів, параметри подачі матеріалу у відсотках від номіналу, швидкість руху, координати осей X, Y, Z, положення екструдера E, напруга і струм блока живлення, показники датчика філаменту, прапорці помилок та стан прошивки.

Для відеопідсистеми з частотою близько від двох до п'яти герців реєструються частота кадрів камери, параметри експозиції, підсилення, режим автоматичного балансу білого, затримки кодування, кількість пропущених кадрів і дрейф часових позначок. Для модуля штучного інтелекту на основі модифікацій ResNet з глибиною п'ятдесят або сто один шар, з ознаковою пірамідою або без неї, з

частотою від одного до п'яти герців фіксуються ідентифікатор моделі, хеш ваг, наприклад SHA-256, обчислювальний бекенд типу ONNX Runtime або OpenVINO, латентність інференсу за квантилями p50, p95, максимальне значення, завантаженість центрального та графічного процесорів, споживання пам'яті, параметри тайлінгу та розподіл довірчих оцінок детекцій.

Таблиця 3.6

## Основні профілі телеметрії

Підсистема	Типова частота опитування	Основні параметри
Принтер (Marlin / Klipper / RepRapFirmware)	1–2 Гц	Температури сопла й столу, стан PID, оберти вентиляторів, flow%, feedrate, координати XYZ, E, напруга, струм, датчик філаменту, прапорці помилок
Відеопідсистема	2–5 Гц	Частота кадрів, експозиція, підсилення, автоматичний баланс білого, затримки кодування, пропущені кадри, дрейф часових міток
Модуль ШІ	1–5 Гц	Ідентифікатор моделі, хеш ваг, бекенд інференсу, p50/p95/максимум латентності, завантаження CPU/GPU, пам'ять, параметри тайлінгу, розподіл довірчих оцінок
Рівень політик	0,5–1 Гц	Лічильники тригерів, верифікацій, рішень (PAUSE, STOP, CORRECT, LOG), спрацювання блоків безпеки, повторні спроби
Хост Raspberry Pi 5	1 Гц	Завантаженість CPU/GPU, використання ОЗП, температура SoC, ознаки тротлінгу, I/O-операції, вільний дисковий простір, мережеві показники
Шина повідомлень (Redis/MQTT)	0,5–1 Гц	Кількість публікацій і підписок за секунду, латентність, глибина черги

На рівні політик із періодичністю від половини до одного герца накопичуються лічильники спрацювань тригерів, верифікацій і прийнятих рішень із типами PAUSE, STOP, CORRECT, LOG, а також кількість спрацювань блоків безпеки та повторних спроб. Для хоста Raspberry Pi п'ятого покоління з частотою близько одного герца реєструються завантаження процесора та графічного ядра, обсяг використаної оперативної пам'яті, температура системи на кристалі, наявність ознак тротлінгу, інтенсивність операцій запису на носії, вільний

дисковий простір, мережеві затримки та втрати пакетів. Для шини повідомлень на основі Redis або MQTT з частотою від половини до одного герца фіксуються кількість публікацій і підписок за секунду, латентність і глибина черги.

Узагальнений перелік профілів телеметрії подано в таблиці 3.6, де для кожної підсистеми наведено типову частоту опитування та ключові параметри, що підлягають моніторингу.

Збір телеметрії реалізується засобами експортерів, сумісних із Prometheus, із подальшою візуалізацією в Grafana на панелях, орієнтованих на стан принтера, відеопідсистеми та модуля штучного інтелекту, а також на загальну стабільність системи.

Сховище та ротація. Основним сховищем подій і телеметрії є база даних, реалізована у вигляді гіпертаблиць TimescaleDB або, у разі ізольованого режиму без мережевого доступу, локальної бази SQLite. Рекомендовано розміщувати базу даних і кеші на твердотільних накопичувачах SSD, а не на картках microSD, з метою зменшення зносу та підвищення надійності.

Індексація виконується насамперед за часовими позначками  $ts_{wall}$ , а також за комбінаціями *job\_id* і *layer\_id*. Для подій із рівнями WARN і ERROR доцільно формувати окремі часткові індекси, що прискорюють пошук критичних інцидентів.

Політика зберігання передбачає зберігання телеметрії протягом орієнтовно тридцяти діб, а подій із рівнями WARN і ERROR до ста восьмидесяти діб. Файлові об'єкти представлені кадрами у форматах PNG або JPEG, масками та рамками у форматі PNG з альфа каналом, а також короткими відеофрагментами тривалістю від п'яти до десяти секунд у форматі H.264, прив'язаними до подій. Ієрархія файлової системи структурується за шаблоном *job id – layer id – frame id*, при цьому відповідні метадані дублюються в базі даних.

Інцидентні артефакти, пов'язані з підтвердженими дефектами, зберігаються триваліше, наприклад до дев'яноста діб, тоді як регулярні фонові фрагменти зберігаються суттєво менший термін, орієнтовно чотирнадцять діб. Ротація журналів і об'єктів поєднує використання стандартних засобів, наприклад logrotate, із вбудованими політиками TimescaleDB, зокрема видаленням старих частин

гіпертаблиць і їх стисканням. Для файлових архівів застосовується стискання, наприклад алгоритмом `zstd` середнього рівня.

Цілісність критичних наборів файлів контролюється за допомогою хешів SHA-256, а правильність зберігання перевіряється регулярними вибірковими тестами. Узагальнена структура зберігання та ротації для різних класів даних наведена в таблиці 3.7, де для кожного класу вказано основне сховище, типовий строк активного зберігання та політику ротації і стискання.

Таблиця 3.7

## Класи даних, сховища, строки зберігання та ротація

Клас даних	Основне сховище	Типовий строк активного зберігання	Політика ротації й стискання
Телеметрія	TimescaleDB / SQLite	≈ 30 діб	Видалення старих «шматків», стискання гіпертаблиць
Події рівнів WARN/ERROR	TimescaleDB	До 180 діб	Спеціальні часткові індекси, стискання, архівація
Інцидентні артефакти	Файлова система + БД метаданих	До 90 діб	Стиснення ( <code>zstd</code> ), контроль хешами
Фонові відеофрагменти	Файлова система	≈ 14 діб	Агресивна ротація, можливе вибіркове зберігання
Конфігурації, профілі, моделі	NAS / S3-сумісне сховище, локальне SSD	Версіоноване довготривале зберігання	Резервне копіювання (див. підпункт 3.9.5)

Підсистема резервування передбачає щоденні інкрементальні копії бази даних і журналів на мережеве сховище типу NAS або S3 сумісну систему, наприклад MinIO або хмарні платформи, а також щотижневі повні резервні копії. Резервуються також конфігураційні файли та профілі, зокрема файли прошивки й налаштувань принтера типу `printer.cfg` і макроси Klipper, файли політик `policy.yaml`, профілі слайсерів, конфігурації контейнеризації, що описують склад сервісів, версії моделей штучного інтелекту у форматі ONNX і їх контрольні суми. Ці дані зберігаються в окремих архівах із підтримкою версіонування.

Шифрування резервних копій доцільно виконувати на стороні клієнта із застосуванням стійких алгоритмів, наприклад AES-256, при цьому ключі мають зберігатися поза межами пристрою, на окремих носіях або в системах керування секретами. Відновлюваність резервних копій регулярно перевіряється шляхом автоматичних тестових відновлень на окремий випробувальний стенд. Результати перевірки фіксуються у спеціальному журналі, що підвищує доказовість працездатності сценаріїв відновлення.

Додатковим механізмом є використання знімків файлової системи, наприклад на основі btrfs або LVM snapshots, перед оновленнями. Це забезпечує атомарні точки відкату і дає змогу швидко повернути систему до попереднього стану у разі невдалого оновлення.

### **3.10. Безперервність роботи та відновлення**

Забезпечення безперервності роботи реалізується за рахунок поєднання механізмів автовідновлення сервісів, енергозахисту та, за потреби, реплікації даних. Ключові сервіси, такі як print host, vision service, policy engine і вебрівень, запускаються як системні служби з налаштованими політиками перезапуску. Додатково може застосовуватися апаратний watchdog на рівні системи на кристалі та періодичні перевірки стану вебінтерфейсів і програмних інтерфейсів типу API.

Для захисту від перебоїв живлення використовується джерело безперебійного живлення, інтегроване в систему моніторингу. При виявленні падіння напруги ініціюється керована послідовність дій, що включає паузу друку, паркування голови, збереження стану та контрольоване вимкнення хоста. За потреби може бути розгорнута репліка база даних TimescaleDB на мережевому сховищі NAS у режимі лише читання для довготривалого зберігання даних.

Після настання інциденту формується післяінцидентний пакет, що містить журнал подій, телеметрію в околі інциденту, відповідні кадри та маски, рішення політик і фактично виконані G коди. Пакет структурується як архів із маніфестом, де описано версії конфігурацій, моделей і політик.

Узагальнений алгоритм оброблення інциденту та формування післяінцидентного пакета зображено на рисунку 3.8, де у вигляді блок схеми послідовно подано етапи фіксації інциденту, збирання даних, формування пакета артефактів і його збереження.

Схема бази даних для подій у TimescaleDB передбачає створення таблиці, у якій зберігаються часові мітки, рівні важливості, ідентифікатори модуля, завдання, шару та кадру, тип дії, результат і додаткове поле вантажу у форматі JSON. Цю таблицю перетворюють на гіпертаблицю за часовою ознакою  $ts_{wall}$ . Для підвищення ефективності запитів створюються індекси за часовою позначкою у спадному порядку, за комбінацією  $job\_id$  і  $layer\_id$ , а також частковий індекс за рівнем важливості для подій із типами WARN і ERROR.

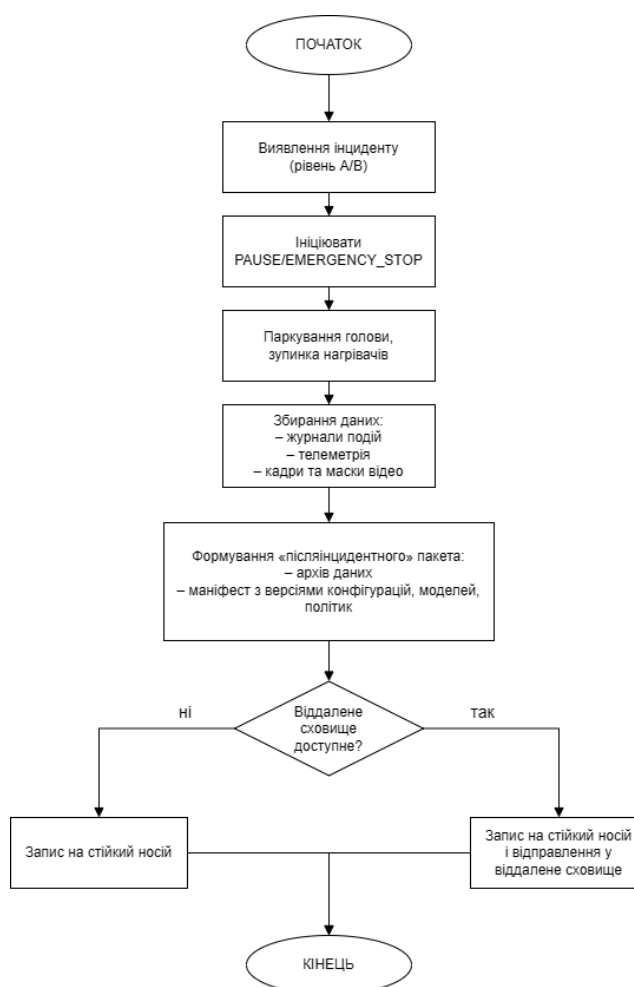


Рис. 3.8. Блок схема оброблення інциденту та формування пакета артефактів



Політика ротації журналів для підсистем `print host`, `vision` і `policy` реалізується як щоденне створення нових файлів журналів із зберіганням обмеженої кількості попередніх версій, наприклад до тридцяти, із застосуванням компресії та врахуванням ситуацій відсутності файла. Резервне копіювання за допомогою утиліт типу `restic` організується як регулярне резервування каталогів, де розташовані дані бази, сховища подій і конфігурацій, із подальшою перевіркою цілісності сховища щонайменше раз на тиждень.

Конфігурація системи моніторингу Prometheus передбачає окремі джерела, тобто `job`, для вузла хоста, модуля зору, модуля політик і принтера, який обслуговується експортером телеметрії прошивки. Це дає змогу будувати окремі панелі спостереження для кожного рівня системи.

Примітки до експлуатації. Для апаратної платформи Raspberry Pi п'ятого покоління рекомендується розміщувати базу даних і відеоартефакти на твердотільних накопичувачах SSD, використовуючи microSD переважно для операційної системи та службових даних. За умов обмеженого дискового простору доцільно зберігати лише кадри та відеофрагменти, пов'язані з подіями, не архівуючи повний фоновий потік.

Для бюджетних принтерів із прошивкою Marlin критично важливі події доцільно дублювати у потоці G коду за допомогою спеціальних повідомлень, наприклад командою M118 і службових коментарів з міткою шару. Такий підхід підвищує стійкість до втрат на рівні хоста та спрощує відновлення історії подій без повної бази телеметрії.

Запропонована схема поєднує відтворюваність інцидентів, контроль ресурсу носіїв, криптографічний захист архівів і передбачуване відновлення, забезпечуючи повну трасованість між рішеннями політик та первинними даними телеметрією, кадрами, вагами моделі та фактично викликаними G кодами.

Цілі та модель загроз. Підсистема безпеки спрямована на забезпечення конфіденційності керування принтером, цілісності команд G коду та доступності модулів `print host`, `vision service`, `policy engine` і `web ui` навіть за умов мережових збоїв, зловмисних дій користувачів чи компрометації окремих вузлів.

Розглядаються загрози перехоплення сесій, несанкціонованого доступу, ін'єкцій у G код, підміни відеопотоку, ескалації привілеїв на хості та атак типу відмова в обслуговуванні.

Для зовнішнього доступу обов'язковою є багатофакторна автентифікація, наприклад на основі одноразових кодів типу TOTP або апаратних ключів WebAuthn. Система автентифікації може будуватися на протоколах OAuth2 або OpenID Connect через спеціалізовані рішення, наприклад Keycloak чи Authelia, або на локальних облікових записих із безпечними схемами хешування паролів, зокрема Argon2id. Авторизація реалізується на основі ролей із мінімально необхідними повноваженнями.

Таблиця 3.8

## Типові ролі користувачів і їхні повноваження

Роль	Основні повноваження
ADMIN	Керування користувачами та ролями; зміна конфігурацій і політик; оновлення системи; прошивання принтера; запуск і зупинка завдань; керування файлами, секретами, моделями ШІ; налаштування резервування й моніторингу
OPERATOR	Запуск і зупинка завдань друку; вибір профілів друку й політик; корекція параметрів принтера в допустимих межах; підтвердження дій політики (пауза/продовження); перегляд телеметрії, відео та журналів
GUEST	Перегляд телеметрії, відео, журналів і дашбордів моніторингу без можливості зміни конфігурації чи запуску завдань

Типовими є ролі адміністратора, оператора та гостя. Адміністратор має повноваження керувати користувачами, оновлювати систему, прошивати принтер, редагувати політики, запускати та зупиняти завдання, керувати файлами й секретами. Оператор має змогу запускати та зупиняти завдання друку, змінювати параметри принтера в допустимих межах, активувати готові профілі політик,

переглядати телеметрію та події. Гість має права лише на перегляд телеметрії, відео та журналів.

Узагальнений розподіл прав доступу наведено в таблиці 3.8, де для кожної ролі перелічено основні повноваження в межах системи.

Сесійні маркери реалізуються у вигляді короткоживучих токенів, наприклад JSON Web Token зі строком дії до п'ятнадцяти хвилин, у поєднанні з токенами оновлення, прив'язаними до конкретного клієнта. Для підвищення безпеки застосовується прив'язка до адреси джерела та параметрів клієнта, а також примусове відкликання токенів під час зміни пароля або ролі. Політика паролів передбачає достатню довжину не менше дванадцяти символів, блокування після низки невдалих спроб і обов'язкову періодичну ротацію адміністративних секретів.

Передача даних між користувачем і вебінтерфейсом, а також між сервісами здійснюється із застосуванням протоколу TLS версії 1.3 із сучасними наборами шифрів. Сертифікати можуть оновлюватися автоматично за допомогою протоколу ACME або видаватися внутрішнім центром сертифікації.

На периметрі використовується зворотний проксі сервер, наприклад NGINX, як єдина точка входу. У конфігурації вмикається політика суворого транспорту безпеки HSTS, перевірка статусу сертифікатів засобами типу OCSP stapling, підтримка HTTP версій 2 і 3, обмеження частоти запитів і базовий захист від спроб перебору. Для адміністративного доступу додатково застосовується віртуальна приватна мережа, наприклад WireGuard, а для міжсервісної взаємодії в сегментованих мережах використовується взаємна автентифікація TLS, тобто mTLS.

Мережева інфраструктура сегментується на кілька логічних зон типу VLAN або VRF: окремо для принтера, який під'єднаний через шлюз USB або UART, для відео та підсистеми штучного інтелекту, для управлінського доступу та для зовнішнього периметра. На основі мікросегментації реалізується принцип списку дозволених з'єднань між сервісами, коли відкриваються лише необхідні порти та протоколи.

Внутрішні служби шини повідомлень, такі як Redis або MQTT, або не виходять за межі локального хоста, або додатково захищаються mTLS. Доступ до пристроїв типу dev ttyUSB надається виключно сервісу print host. Правила udev визначають допустимі права доступу до USB пристроїв і їх фіксоване призначення.

### 3.11. Захист хоста Raspberry Pi 5

Захист хоста включає автоматичне оновлення системних пакунків, регулярний аналіз вразливостей ядра, бібліотек камер, мультимедійних бібліотек і фреймворків інференсу, обмеження прав служб через механізми systemd із захистом файлової системи, ізолюваними тимчасовими каталогами, заборонаю підвищення привілеїв і явним обмеженням списку дозволених можливостей. За наявності підтримки застосовуються профілі AppArmor або SELinux для контейнерів і основних сервісів.

Таблиця 3.9

Категорії команд G коду та правила доступу

Роль	Основні повноваження
ADMIN	Керування користувачами та ролями; зміна конфігурацій і політик; оновлення системи; прошивання принтера; запуск і зупинка завдань; керування файлами, секретами, моделями ШІ; налаштування резервування й моніторингу
OPERATOR	Запуск і зупинка завдань друку; вибір профілів друку й політик; корекція параметрів принтера в допустимих межах; підтвердження дій політики (пауза/продовження); перегляд телеметрії, відео та журналів
GUEST	Перегляд телеметрії, відео, журналів і дашбордів моніторингу без можливості зміни конфігурації чи запуску завдань

Для контролю доступу до вузла використовуються журнали входів і засоби типу fail2ban, які обмежують кількість спроб доступу до NGINX і SSH. Підсистема

SSH конфігурується для входу виключно за ключами з вимкненою автентифікацією за паролем. Дані розміщуються на SSD із застосуванням квотування, а microSD використовується переважно як носій операційної системи з переважним режимом читання.

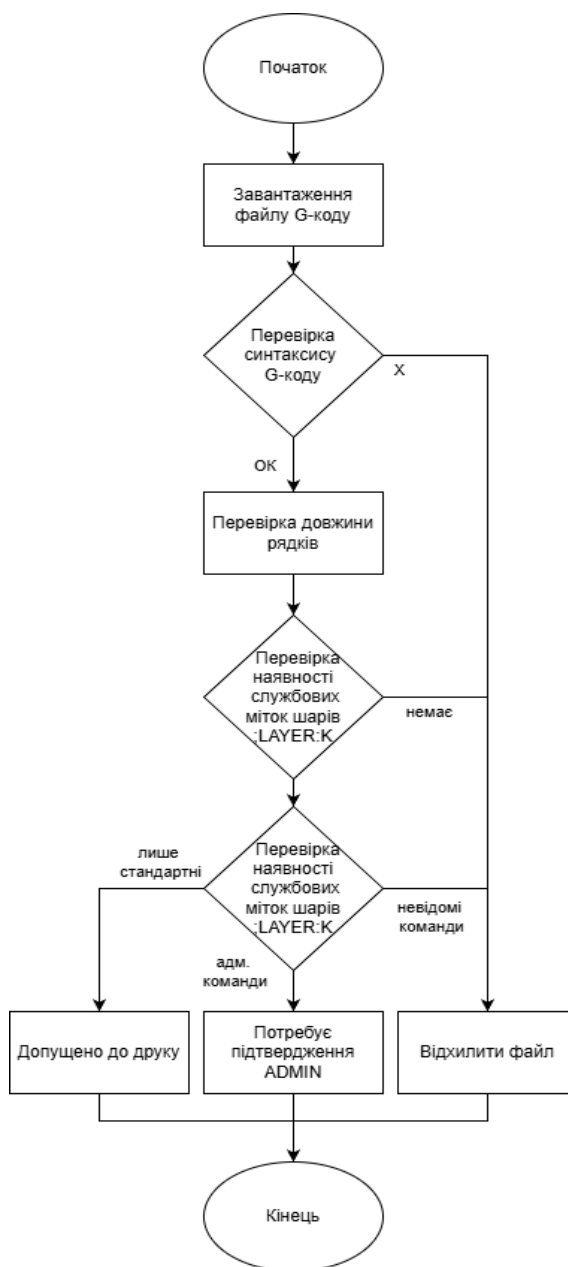


Рис. 3.9. Блок схема валідації файлу G коду

Усі вхідні файли G коду проходять валідацію, що охоплює перевірку синтаксису, обмеження довжини рядків, а також застосування списків дозволених і заборонених команд. Критичні команди, наприклад аварійні зупинки, зміни

параметрів регуляторів PID, самокалібрування, запис у постійну пам'ять, операції, пов'язані з прошиванням, дозволяються лише для ролі адміністратора та вимагають додаткового підтвердження.

Макроси Klipper і Marlin параметризуються, захищаються від рекурсивних викликів і виконуються з обмеженням часу. Для особливо ризикованих дій застосовується механізм подвійної руки, коли необхідні одночасно підтвердження оператора та другий фактор автентифікації у вузькому часовому вікні.

Категоризацію команд G коду та правила їх допуску систематизовано в таблиці 3.9, де подано приклади команд для кожної категорії разом із умовами доступності та виконання.

Алгоритм валідації вхідних файлів G коду подано на рисунку 3.9 у вигляді блок схеми, де наочно показано послідовність перевірок від базової синтаксичної валідації до застосування білих і чорних списків команд та прийняття рішення про допуск або відхилення файлу.

### **3.12. Безпека доступу та спостережуваність комплексу керування**

Підсистема безпеки інтелектуального комплексу керування FDM друком охоплює політики доступу з різних типів клієнтів, механізми спостережуваності, аудит дій користувачів, реагування на інциденти, відмовостійкість сервісів, мережевий та криптографічний захист, а також організаційні й фізичні заходи. Мета полягає у зниженні ризику несанкціонованого втручання та помилкових дій оператора без погіршення здатності комплексу виявляти дефекти та втручатися у процес друку.

Доступ з мобільних клієнтів регламентується окремою політикою. Для таких клієнтів дозволяється перегляд телеметрії, перегляд відеопотоку з камер та ініціювання паузи друку з паркуванням голови. Забороняються повна зупинка друку, перепрошивання контролера, зміна політик безпеки, зміна ролей користувачів, а також установлення температур вище затверджених меж. Будь-яка команда, що потенційно може вивести процес за межі безпечної області, потребує

подвійного підтвердження та багатофакторної автентифікації, а для доступу з зовнішніх мереж обов'язковим є використання віртуальної приватної мережі. Сумарний ризик несанкціонованого втручання через віддалений доступ описують як узагальнений показник витрат:

$$R_{\text{доступ}} = p_{\text{auth}} C_{\text{auth}} + p_{\text{net}} C_{\text{net}} + p_{\text{code}} C_{\text{code}}, \quad (3.31)$$

де  $p_{\text{auth}}$  є оціненою імовірністю обходу автентифікації,  $p_{\text{net}}$  – імовірністю успішної мережевої атаки,  $p_{\text{code}}$  – імовірністю зловмисної модифікації коду або конфігурацій, а  $C_{\text{auth}}, C_{\text{net}}, C_{\text{code}}$  – відповідними очікуваними втратами для кожного типу інциденту. Обмеження функцій мобільних клієнтів та вимоги до віртуальної приватної мережі зменшують кожен складову цього показника.

Спостережуваність комплексу забезпечується введенням незмінюваних журналів у режимі лише додавання. До них послідовно потрапляють події автентифікації, зміни ролей і політик, запуск і завершення завдань друку, завантаження та перевірка файлів G-коду, рішення модуля політик. У вебінтерфейсі виділено окремі панелі для подій з рівнями попередження та помилки, для аномальної мережевої активності, для сплесків запитів до програмного інтерфейсу та для зростання латентності шини повідомлень. На основі цих журналів формують часові ряди показників безпеки, що дає змогу стежити за трендами та своєчасно виявляти деградацію.

Система оповіщень надсилає повідомлення у разі входу адміністратора з нового пристрою, змін політик і ролей, досягнення або перевищення температурних меж, серій невдалих спроб входу. Для критичних конфігурацій, до яких належать параметри принтера, файли політик, ваги моделей штучного інтелекту, обчислюють контрольні суми алгоритмом SHA-256, а інцидентні пакети додатково підписують криптографічними засобами. Це забезпечує виявлення несанкціонованих змін та цілісність артефактів, що аналізуються під час розслідування інцидентів.

Відмовостійкість програмних компонентів розглядають як складову безпеки, оскільки відмова модуля нагляду у критичний момент може спричинити пропуск дефекту. На рівні системи на кристалі використовується апаратний сторожовий

таймер, а на рівні системи ініціалізації налаштовано контроль пульсу ключових процесів з політикою автовідновлення та обмеженням максимальної кількості перезапусків. Інтегральний показник доступності сервісу визначають так

$$A = \frac{T_{ok}}{T_{ok} + T_{fail}}, \quad (3.32)$$

де  $T_{ok}$  є сумарною тривалістю коректної роботи сервісу за розглянутий інтервал спостереження, а  $T_{fail}$  – сумарною тривалістю відмов, перезапусків та аварійних режимів. Отримане значення порівнюють з цільовими вимогами до доступності для виробничого контуру. У разі відмови модуля штучного інтелекту комплекс переводиться у режим «лише друк і телеметрія», у якому політики працюють у режимі журналювання без активного втручання, що гарантує кероване продовження або зупинку друку оператором.

Підсистема живлення поєднує джерело безперебійного живлення та програмний моніторинг напруги. Під час виявлення падіння напруги комплекс виконує послідовність безпечних дій: пауза друку, паркування голови, збереження поточного стану, коректне вимкнення. Після відновлення живлення друк може бути відновлено у керований спосіб без втрати узгодженості даних.

Мережевий захист реалізується конфігурацією проксі-сервера, що примусово використовує протокол TLS, обмежує набір шифрів сучасними, забороняє застарілі механізми узгодження. Заголовки безпеки задають сувору політику транспорту, політику вмісту, політику передавання інформації про джерело запиту, забороняють вбудовування інтерфейсу комплексу у сторонні фрейми. Вебінтерфейс оператора та програмні інтерфейси проксіюються через захищені шляхи, для вебсокетів забезпечено коректне оновлення протоколу і підтримку постійного з'єднання, що важливо для моніторингу у реальному часі.

На рівні операційної системи для сервісів комплексу застосовуються обмеження systemd. Кожен сервіс працює під окремим технічним користувачем з мінімальними правами, системну частину файлової системи захищено, домашні каталоги та тимчасові файли ізолювано, підвищення привілеїв заборонено, дозволені лише необхідні родини мережевих адрес, встановлено ліміти на споживання пам'яті та процесорного часу. Фільтрація трафіку за допомогою



nftables реалізує політику заборони за замовчуванням, дозволяючи лише вже встановлені з'єднання, локальний інтерфейс, доступ до захищеного каналу адміністрування та до вебінтерфейсу через HTTPS. Це суттєво зменшує площу атаки та обмежує вектори проникнення до контуру керування принтером.

Політика валідації G-коду базується на явних списках дозволених і заборонених команд, обмеженні максимальної довжини рядка та вимозі наявності службових коментарів з мітками шарів. Такий підхід забезпечує узгодженість файлу з модулем комп'ютерного зору, який використовує мітки для синхронізації з відео, а також запобігає використанню небезпечних макросів та прихованих послідовностей команд. Усі зміни файлів політик і макросів проходять обов'язковий перегляд двома фахівцями, регламент дій у разі інциденту визначає контактні дані відповідальних осіб, цільові показники часу відновлення, формат звітів і порядок збереження артефактів для подальшого аналізу.

Організаційна складова безпеки спирається на принцип мінімально необхідних повноважень для користувачів та сервісів. Фізична безпека доповнює логічні механізми: Raspberry Pi п'ятої серії та твердотілий накопичувач розміщуються у важкодоступному місці, кабелі та USB-пристрої мають чітке маркування та інвентаризацію. Сукупність політик доступу, криптографічного захисту трафіку, контролю цілісності конфігурацій, спостережуваності дій користувачів та відмовостійких механізмів забезпечує безпечне функціонування інтелектуального комплексу на базі бюджетних FDM-принтерів з прошивками Marlin або Klipper та створює основу для масштабування рішення на виробничі парки тривимірних принтерів.

### **3.13. Методика налаштування**

Методика налаштування системи контролю процесу FDM або FFF друку ґрунтується на попередньому виборі апаратної платформи та програмного середовища. Базою слугує плата Raspberry Pi п'ятого покоління з обсягом оперативної пам'яті не менше восьми гігабайтів, до якої під'єднується камера

інтерфейсу CSI другого покоління типу IMX219 чи IMX477 або сумісна USB камера класу UVC. Для зберігання телеметрії, відеозаписів та журналів застосовується твердотільний накопичувач SSD.

Таблиця 3.10

## Основні кроки методики налаштування системи

№ кроку	Назва етапу	Основні дії	Ключові критерії завершення
1	Передумови та артефакти	Вибір апаратної платформи, камери, накопичувачів, принтера; підготовка моделей III у форматі ONNX	Визначено конфігурацію стенда й набір моделей
2	Підготовка ОС та відеопідсистеми	Інсталяція та оновлення ОС, бібліотек Python, libcamera/ffmpeg, ONNX Runtime/OpenVINO	Камера працює зі стабільною експозицією, потік відео доступний
3	Налаштування хост-рівня друку (Marlin/OctoPrint, Klipper)	Інсталяція OctoPrint/OctoPi або Klipper, налаштування профілю принтера, PID-тюнінг, mesh-leveling	Принтер успішно друкує тестові моделі без втрат зв'язку
4	Макроси безпеки та валідація G-коду	Імпорт макросів SAFE_PAUSE/SAFE_RESUME, налаштування пост-обробки G-коду, валідація команд	Макроси безпечно відпрацьовують на тестових завданнях
5	Розгортання модуля III та обчислювального конвеєра	Налаштування vision-service, каналу Redis/MQTT, зберігання кадрів, вимірювання латентності	Досягнуто цільових FPS та латентності інференсу
6	Під'єднання веб-інтерфейсу, захист каналу та ролі	Конфігурація NGINX, TLS 1.3, RBAC, MFA/VPN	Безпечний доступ до web-ui, ролі працюють коректно
7	Налаштування політик та експериментальна валідація	Визначення порогів, гістерезисів, запуск серії контрольних друків із журналюванням	Політика дає прийнятний TPR/FPR і допустимий рівень хибних пауз
8	Журналювання, резервування та відновлення	Налаштування TimescaleDB/SQLite, ротації журналів, резервного копіювання, інтеграції з UPS	Перевірено відновлення друку після контрольних відключень живлення

Об'єктом керування є принтер FDM або FFF масового чи бюджетного класу з прошивкою Marlin або Klipper, що з'єднується з хостом через інтерфейс USB UART зі швидкістю обміну від ста п'ятнадцяти двохсот до двохсот п'ятдесяти тисяч бод.

Операційна система хоста обирається з родини Raspberry Pi OS у шістдесят чотири бітному виконанні як базове рішення для більшості конфігурацій. Для принтерів на прошивці Marlin може бути використаний спеціалізований дистрибутив OctoPi, який значно спрощує розгортання сервісу OctoPrint і підтримку камер. У складніших стендах, де потрібна контейнеризація та розвинені засоби спостереження, доцільним є використання Ubuntu Server для архітектури ARM64.

На хості розгортаються основні сервіси: рівень керування друком print host, модуль комп'ютерного зору vision service на основі модифікацій ResNet п'ятдесят, ResNet сто один або ResNet тридцять чотири, модуль реалізації політик policy engine, вебінтерфейс web ui, а також засоби обміну повідомленнями та зберігання станів на базі Redis або MQTT і бази даних SQLite чи TimescaleDB.

Моделі штучного інтелекту готуються у форматі ONNX з використанням подання з половинною точністю FP16 або з цілочисельним поданням INT8. Під час навчання застосовуються стратегії квантування з урахуванням навчання і після навчання. Набір моделей добирається для конкретного поєднання камери, матеріалу, діапазону висот шарів і типових режимів друку, що забезпечує стійкість до змін освітлення та варіацій траєкторій.

Узагальнений перелік основних кроків методики налаштування системи подано в таблиці 3.10. У ній систематизовано послідовність етапів, зміст робіт і критерії, за якими етап вважають завершеним і система може переходити до наступного кроку.

Після аналізу таблиці 3.10 можна зробити висновок, що методика має чітку багаторівневу логіку. Спочатку фіксується апаратна конфігурація та готуються моделі, потім забезпечується стабільна робота операційної системи і відеопотоку, далі перевіряється працездатність принтера без залучення інтелектуальних модулів. Лише після усунення можливих збоїв базового рівня розгортається

обчислювальний конвеєр інференсу, підключається вебінтерфейс, налаштовуються політики втручання та організується надійне журналювання з резервуванням. Така послідовність зменшує ризик маскування помилок нижчих рівнів складними ефектами інтеграції та взаємодії модулів.

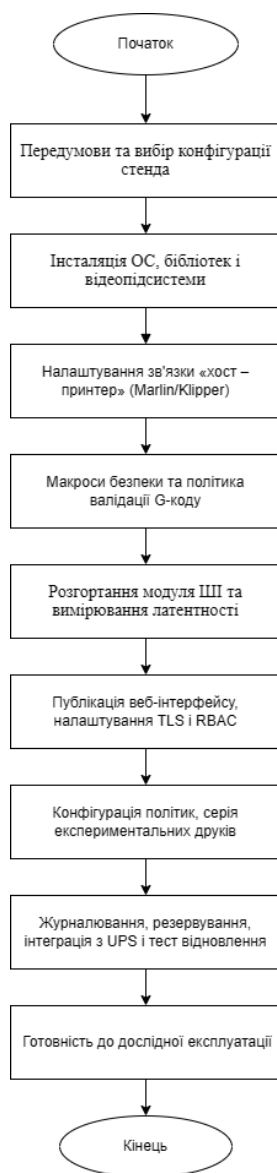


Рис. 3.10. Узагальнений алгоритм налаштування системи контролю 3D друку на базі Raspberry Pi 5

Окремо послідовність кроків розгортання системи подано у графічній формі. На рисунку 3.10 зображено узагальнений алгоритм налаштування у вигляді блок-схеми. Перший блок відповідає етапу вибору конфігурації стенда та підготовки артефактів. Наступні блоки відображають інсталяцію операційної системи,

бібліотек і відеопідсистеми, налаштування зв'язку між хостом і принтером, впровадження макросів безпеки та політики валідації G коду. Далі схема демонструє розгортання модуля штучного інтелекту з вимірюванням латентності, публікацію вебінтерфейсу з налаштуванням захищеного доступу, конфігурацію політик і проведення серії експериментальних друків. Завершальні блоки присвячено налагодженню журналювання, резервування, інтеграції з джерелом безперебійного живлення та підготовці системи до дослідної експлуатації.

### **3.14. Інтегроване налаштування програмно апаратного комплексу**

Інтегроване налаштування системи на основі плати Raspberry Pi п'ятого покоління охоплює послідовну підготовку операційного середовища, відеопідсистеми, рівня хоста для друку, модуля штучного інтелекту, вебдоступу та підсистеми журналювання. На першому кроці встановлюють і оновлюють операційну систему, створюють ізольоване середовище для інтерпретатора Python, додають бібліотеки комп'ютерного зору, засоби оброблення відеопотоку та середовище інференсу моделей у форматі ONNX разом з оптимізованими компонентами на кшталт OpenVINO, здатними використовувати векторні інструкції архітектури ARM. Паралельно конфігурують інтерфейси захоплення відеоданих: для камер інтерфейсу CSI вмикають апаратний канал у стандартних утилітах конфігурування, для камер класу USB UVC перевіряють наявність апаратного кодування у форматах MJPEG або H.264, що зменшує навантаження на центральний процесор. Живлення камер і підсвітки робочої зони розв'язують від живлення плати керування через окремі стабілізатори з фільтрацією завад, після чого перевіряють працездатність сенсора, діапазон кадрової частоти та геометрію кадру засобами libcamera або ffmpeg і фіксують сталі значення експозиції, підсилення та балансу білого, щоб запобігти дрейфу гістограми яскравості між шарами та зберегти відтворюваність ознак для модуля штучного інтелекту.

Далі налаштовують зв'язок між принтером і хостом, роль якого виконує плата Raspberry Pi. Для принтерів з прошивкою Marlin зазвичай застосовують дистрибутив OctoPi або OctoPrint, де описують профіль конкретного принтера з

урахуванням розмірів робочого об'єму, розташування кінцевих вимикачів, діапазонів температур сопла і нагрівальної платформи та кінематики. Активують програмний інтерфейс прикладного програмування, налаштовують облікові дані модулів, вмикають збір телеметрії і встановлюють розширення, що автоматично маркують шари в G коді рядками з ключовим словом LAYER і номером шару. Для конфігурацій з прошивкою Klipper встановлюють систему керування разом з інтерфейсом Mainsail або Fluididd, збирають прошивку для відповідної електронної плати, калібрують кроки на міліметр для усіх осей, налаштовують регулятори PID та будують сітку площинності поверхні столу з використанням пробного зонда. На цьому рівні формують стандартизовані макроси безпечної паузи, безпечного відновлення та паркування друкувальної головки і перевіряють їх у відокремленому режимі, після чого на рівні хоста запроваджують політику валідації G коду з обмеженням множини дозволених команд, вимогою наявності тегів шарів і граничною довжиною рядка. Коректність налаштувань підтверджують серією тестових друків калібрувальних моделей, під час яких аналізують правильність маркування шарів і передбачуваність виконання макросів.

Розгортання модуля штучного інтелекту передбачає налаштування обчислювального конвеєра оброблення кадрів та його взаємодії з політикою керування. Базовою є модель класу ResNet п'ятдесят, адаптована для класифікації кадрів за наявністю чи відсутністю дефектів, а для кращої локалізації дрібних об'єктів застосовують варіанти з ознаковою пірамідою або більшу глибину типу ResNet сто один. Інференс реалізують у середовищі ONNX Runtime з використанням інструкцій NEON чи оптимізацій OpenVINO, а затримку зменшують завдяки квантуванню до цілочисельного формату та структурному проріджуванню каналів. Сервери інференсу, політик та відеопотоку розгортають як окремі процеси під керуванням системного менеджера або як контейнеризовані служби з коректним під'єднанням до відеопристрою, каналом обміну подіями на основі Redis чи протоколу MQTT та виділеним сховищем для журналів і збережених кадрів. Конфігурація має забезпечувати прийнятну затримку від моменту надходження кадру до керувальної дії, стабільну частоту кадрів і помірне

завантаження процесора та оперативної пам'яті, що перевіряють на еталонному стенді.

Функції спостереження, керування та аналізу подій реалізують через вебінтерфейс, який публікують за зворотним проксі сервером сучасного вебсервера з увімкненим шифруванням транспортного рівня та політикою суворого транспорту безпеки, а доступ організовують за рольовою моделлю для адміністратора, оператора та гостьової ролі. Для зовнішнього доступу застосовують багатфакторну автентифікацію і рекомендують тунелювання через протокол WireGuard, а критично важливі операції на кшталт аварійної зупинки чи перепрошивання мікроконтролера вимагають подвійного підтвердження. Підсистема журналювання і резервування веде журнали подій, інференсу та рішень політики, зберігає кадри і короткі відеофрагменти інцидентів, застосовує автоматичну ротацію файлів та регулярне резервне копіювання конфігурацій принтера, політик і вагових коефіцієнтів моделей на мережеве або хмарне сховище. Джерело безперебійного живлення інтегрують з хостом так, щоб під час зникнення мережного живлення автоматично запускалася безпечна пауза з паркуванням головки та збереженням стану друку, а після контрольованого завершення роботи і відновлення електроживлення система могла відновити друк з останнього збереженого шару. Комплекс контрольних критеріїв, до якого належать обмежена частка кадрів без коректної мітки шару, відповідність затримок та метрик виявлення проєктним вимогам і здатність системи переходити в режим лише журналювання у разі відмови сервісу комп'ютерного зору, використовують як основу для приймання інтегрованого налаштування до дослідної експлуатації.

### **3.15. Аналіз типових збоїв відеотракту та інформаційного контуру**

У процесі впровадження комплексу інтелектуального контролю найчастіше фіксується проблема змінної експозиції відеопотоку. Автоматичні режими експозиції, підсилення та балансу білого змінюють розподіл яскравості кадрів, що

збільшує частку хибних спрацювань модуля комп'ютерного зору для дрібних дефектів. Для кількісної оцінки цієї проблеми вводять частку хибних спрацювань:

$$F_{\text{фр}} = \frac{N_{\text{фр}}}{N_{\text{кадр}}}, \quad (3.33)$$

де  $N_{\text{фр}}$  є кількістю кадрів із хибним сигналом про дефект, а  $N_{\text{кадр}}$  загальною кількістю оброблених кадрів. Зростання мінливості освітлення призводить до збільшення величини  $F_{\text{фр}}$ , тому практичним засобом усунення є фіксація параметрів витримки, підсилення та балансу білого, а також стабілізація підсвітки робочої зони окремим джерелом.

Характерною причиною деградації є надмірна буферизація в інформаційному тракті між камерою та модулем інференсу на основі стандарту UVC і інструментів ffmpeg. Накопичення черг спричиняє збільшення затримки між реальним станом друку та кадрами, що надходять до модуля штучного інтелекту. Повну затримку відеотракту зручно описувати як:

$$\tau_{\text{відео}} = \tau_{\text{кам}} + \tau_{\text{буф}} + \tau_{\text{мереж}}, \quad (3.34)$$

де  $\tau_{\text{кам}}$  є внеском камери та експозиції,  $\tau_{\text{буф}}$  затримкою через черги та ремультимплексування,  $\tau_{\text{мереж}}$  складовою, пов'язаною з передаванням по мережі. Оптимізація тракту спрямована на зменшення складової  $\tau_{\text{буф}}$  через обмеження розміру черг, відключення зайвих етапів оброблення та перехід на камери інтерфейсу CSI з мінімальним проміжним буфером.

Для конфігурацій із роздільністю чотири К або підвищеною частотою кадрів часто виникає дефіцит обчислювальних ресурсів, який проявляється у пропусках кадрів та нерівномірній затримці. У таких випадках застосовують квантування моделі до цілочисельного подання, зменшують область інтересу на кадрі, переходять до тайлової обробки, обмежують частоту кадрів діапазоном від п'ятнадцяти до двадцяти кадрів за секунду та додають полегшений попередній класифікатор на основі менш глибокої версії ResNet. Попередній класифікатор відсіює явно позитивні та явно негативні випадки, передаючи до повноцінної моделі лише неоднозначні кадри, що зменшує ефективну обчислювальну вартість інференсу.



Окрема група помилок пов'язана з розсинхронізацією між шарами та кадрами. Зміщення часової прив'язки або втрата тегів шарів призводить до помилкового зіставлення виявлених дефектів із технологічним станом. Для контролю синхронізації аналізують різницю між часовою міткою шару та кадру:

$$\Delta t_{\text{шар}} = t_{\text{кадр}} - t_{\text{шар}}, \quad (3.35)$$

де  $t_{\text{кадр}}$  є часовою міткою кадру, а  $t_{\text{шар}}$  часовою міткою події початку або завершення шару. Граничне допустиме значення  $|\Delta t_{\text{шар}}|$  задають з урахуванням швидкості друку та частоти кадрів, а перевищення цього значення розглядають як індикатор розсинхронізації. Усунення досягається через перевірку коректного вставлення службових міток у файл G коду, контроль доставки ідентифікаторів шарів у подієву шину та відключення відеофільтрів у програмах перегляду, які можуть змінювати часову шкалу. Надмірне навантаження центрального процесора через роботу шини повідомлень зменшують переходом на локальний сокет, скороченням розміру повідомлень та пакетною обробкою оцінок.

На етапі введення системи в експлуатацію формують послідовність контрольних кроків, що підтверджують готовність усіх компонентів до роботи у виробничому середовищі. Операційна система на платі Raspberry Pi повинна бути оновлена до підтримуваної версії з установленими оновленнями безпеки, а камера має стабільно працювати в режимі фіксованої експозиції та балансу білого на цільових роздільностях. Пропускную спроможність відеотракту описують добутком:

$$B_{\text{відео}} = W \cdot H \cdot r \cdot b, \quad (3.36)$$

де  $W$  є шириною кадру у пікселях,  $H$  висотою,  $r$  частотою кадрів,  $b$  кількістю бітів на піксель. Величину  $B_{\text{відео}}$  порівнюють із доступною смугою пропускання інтерфейсу та обчислювальних ресурсів, щоб уникнути прихованого накопичення буферів.

Хостова система керування друком на базі прошивок Marlin у поєднанні з OctoPrint або на базі Klipper налаштовується так, щоб процедури налаштування регуляторів нагрівачів та корекції площинності столу завершувалися без помилок і забезпечували стійкі температурні та геометричні режими. Макроси безпечної паузи та відновлення повинні коректно відпрацьовувати тестові сценарії без втрати

керуваності принтером, з фіксацією усіх подій у журналі хостового програмного забезпечення.

Модуль комп'ютерного зору та класифікації дефектів розгортають із моделями класу ResNet п'ятдесят або ResNet сто один у варіантах з квантуванням до половинного або цілочисельного подання, які досягають заданих значень середньої точності за площею для дрібних дефектів і вписуються в допустимий бюджет часу інференсу. Для оцінки цього бюджету використовують вираз:

$$\tau_{\text{інф}} \leq \tau_{\text{інф}}^{\text{max}}, \quad (3.37)$$

де  $\tau_{\text{інф}}$  є фактичним часом інференсу, а  $\tau_{\text{інф}}^{\text{max}}$  граничним значенням, що впливає з вимог до повної затримки кадр дія. Політика прийняття рішень повинна коректно застосовувати числові пороги та механізм гістерезису, а журнали подій мають містити повний контекст усіх втручань, включно з ідентифікаторами шару, фрагментами зображень і витягами телеметрії.

Вебінтерфейс повинен працювати з використанням сучасних протоколів шифрування транспортного рівня із чітко реалізованими ролями доступу та багатофакторною автентифікацією для критичних дій. Механізми резервного копіювання конфігурацій, ваг моделей та інших критичних даних перевіряють контрольними відновленнями. Сценарії взаємодії з джерелом безперебійного живлення тестують на реальних відключеннях з підтвердженням коректного паркування голови, збереження стану завдання та керованого завершення роботи хоста. Описаний список забезпечує відтворюваний та формалізований запуск як для бюджетних зв'язок Marlin з OctoPrint, так і для розширених конфігурацій на базі Klipper з використанням моделей ResNet на платі Raspberry Pi п'ятого покоління.

### 3.16. Випробування інтелектуального комплексу та приймальні критерії

Ключовими показниками якості модуля штучного інтелекту для дрібних дефектів є середня точність за площею, істинно позитивна частка виявлень та хибнопозитивна частка. Формально середню точність за площею позначають як:

$$mAP = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K A P_k, \quad (3.38)$$

де  $K$  є кількістю класів дефектів, а  $AP_k$  середньою точністю для окремого класу. Для спеціалізованого набору даних, сформованого із застосуванням тайлінгу та суперсемплінгу, встановлюють вимогу:

$$mAP_{\text{дрібн}} \geq 0,7, \quad (3.39)$$

де  $mAP_{\text{дрібн}}$  є середньою точністю для дрібних дефектів. Додатково для істинно позитивної частки виявлень дрібних дефектів вводять умову:

$$TPR_{\text{дрібн}} \geq 0,8, \quad (3.40)$$

а для хибнопозитивної частки:

$$FPR_{\text{дрібн}} \leq 0,05. \quad (3.41)$$

Такі обмеження забезпечують прийнятний компроміс між чутливістю до дрібних дефектів та стійкістю до хибних спрацювань.

Своєчасність реакції системи описують часовими характеристиками тракту кадр дія. Повну затримку розкладають як:

$$\tau_{\text{повна}} = \tau_{\text{зах}} + \tau_{\text{пред}} + \tau_{\text{інф}} + \tau_{\text{пост}} + \tau_{\text{пол}} + \tau_{\text{макр}}, \quad (3.42)$$

де  $\tau_{\text{зах}}$  є часом захоплення кадру,  $\tau_{\text{пред}}$  часом попереднього оброблення,  $\tau_{\text{інф}}$  часом інференсу моделі,  $\tau_{\text{пост}}$  часом постоброблення,  $\tau_{\text{пол}}$  часом роботи політики та шини подій,  $\tau_{\text{макр}}$  часом виконання макросів паузи і паркування. Для дев'яносто п'ятої перцентилі повної затримки встановлюють обмеження:

$$\tau_{95} \leq 0,8, \quad (3.43)$$

а для дев'яносто дев'ятої перцентилі:

$$\tau_{99} \leq 1,0. \quad (3.44)$$

Ці умови гарантують, що більшість втручань відбувається в межах технологічно допустимих затримок.

Для зручності практичного контролю основні метрики та їх граничні значення подають у зведеній таблиці.

Така таблиця використовується як стислий чек лист під час аналізу результатів випробувань та подальшого моніторингу у виробничому режимі.

## Показники якості та експлуатаційні критерії

Метрика	Позначення	Цільове значення
Середня точність за площею для дрібних дефектів	$mAP_{\text{дрібн}}$	не менше ніж 0,7
Дев'яносто п'ята перцентиль затримки кадр дія	$\tau_{95}$	не більше ніж 0,8 секунди
Дев'яносто дев'яноста перцентиль затримки	$\tau_{99}$	не більше ніж 1,0 секунди
Частка врятованих друків	$q_{\text{врят}}$	не менше ніж 0,6
Частота хибних пауз	$f_{\text{пауз}}$	не більше ніж 0,1 події на годину
Аптайм критичних сервісів	$A$	не менше ніж 0,99

Стабільність друку оцінюють за часткою завдань, які система змогла врятувати від браку. Цю частку задають виразом:

$$q_{\text{врят}} = \frac{N_{\text{врят}}}{N_{\text{ризик}}}, \quad (3.45)$$

де  $N_{\text{врят}}$  є кількістю завдань, завершених без браку завдяки втручанню системи,  $N_{\text{ризик}}$  кількістю друків із дефектами, які без втручання призвели б до браку.

Вимога:

$$q_{\text{врят}} \geq 0,6 \quad (3.46)$$

означає, що система повинна запобігати значній частині потенційно невдалих друків.

Частоту хибних пауз описують співвідношенням:

$$f_{\text{пауз}} = \frac{N_{\text{хибн}}}{T_{\text{друк}}}, \quad (3.47)$$

де  $N_{\text{хибн}}$  є кількістю необґрунтованих зупинок, а  $T_{\text{друк}}$  сумарним часом друку у годинах. Умова:

$$f_{\text{пауз}} \leq 0,1 \quad (3.48)$$

гарантує, що хибні втручання не створюють надмірного експлуатаційного навантаження на оператора та не знижують продуктивність парку принтерів.

Вплив системи на геометричну точність визначають вимірюванням розмірів еталонних деталей після одного або декількох відновлень друку. Відхилення розмірів у площині та за висотою контролюють умовою:

$$|\Delta L| \leq 0,1 \text{ мм}, \quad (3.49)$$

де  $\Delta L$  є різницею між еталонним та фактичним розміром. Така вимога гарантує, що втручання комплексу не погіршує точність виготовлення виробів.

Надійність роботи модуля комп'ютерного зору, політики керування, хостового програмного забезпечення та вебінтерфейсу оцінюють показником аптайму:

$$A = \frac{T_{\text{ok}}}{T_{\text{ok}} + T_{\text{fail}}}, \quad (3.50)$$

де  $T_{\text{ok}}$  є сумарною тривалістю коректної роботи сервісу,  $T_{\text{fail}}$  сумарною тривалістю відмов та аварійних режимів на ковзному вікні тридцять діб. Вимога  $A \geq 0,99$  забезпечує високий рівень доступності. Середній час відновлення після контрольованого збою для окремого процесу не повинен перевищувати п'яти хвилин, причому автоматичний перезапуск має супроводжуватися повторним підключенням до шини подій та інтерфейсів принтера без втрати керованості.

Стійкість до деградацій перевіряють на сценаріях відмови окремих компонентів. У разі тимчасової недоступності модуля комп'ютерного зору система автоматично переходить у режим лише журналювання без активних коригувальних втручань, а після відновлення сервісу коректно відновлює узгодженість інформації про поточний шар та стан друку.

Безпекові вимоги включають аудит конфігурації транспортного шифрування з перевіркою застосування сучасних версій протоколів і відсутності слабких наборів шифрів. Політика ролей доступу повинна гарантувати, що команди високого ризику, такі як аварійна зупинка, автоналаштування, перепрошивання або зміна температурних обмежень, недоступні користувачам із правами нижчими за адміністративні або вимагають подвійного підтвердження. Журнали аудиту мають забезпечувати повну відтворюваність історії дій. Для добових архівів журналів обчислюють контрольні хеш суми виду:

$$H = \text{SHA256}(D), \quad (3.51)$$

де  $D$  є вмістом архіву за добу, а  $H$  контрольним хешем, що дає змогу виявляти несанкціоновані модифікації.

### 3.17. Набори даних та сценарії випробувань

Для приймальних випробувань формують репрезентативний набір даних, що містить відеозаписи високої та стандартної роздільності з бюджетних камер інтерфейсу CSI та USB UVC, а також широкий спектр матеріалів і висот шару. До вибірки включають сцени друку перших шарів, мостів, тонких ребер, внутрішніх периметрів та ділянок з різкими змінами траєкторії. Загальний обсяг анотованих інцидентів задають умовою:

$$N_{\text{деф}} \geq 2000, \quad (3.52)$$

де  $N_{\text{деф}}$  є кількістю випадків із наявністю реальних дефектів, на які орієнтований модуль комп'ютерного зору.

У випробуваннях беруть участь щонайменше три моделі принтерів бюджетного класу з прошивкою Marlin, що утворюють базовий сценарій, а також одна чи дві конфігурації з прошивкою Klipper, які репрезентують розширений випадок. Кінематичні схеми повинні відрізнятися, включаючи принтери зі столом, що переміщується у площині, та механізми типу CoreXY, що дозволяє оцінити узагальнюваність рішень для різних геометрій.

Умови освітлення змінюють у діапазоні приблизно тридцяти відсотків відносно номінального рівня, при цьому експозицію та баланс білого камери залишають фіксованими, щоб дослідити стійкість моделі до змін контрасту та рівня шуму. Для аналізу впливу мережевих ефектів моделюють джитери й додаткові затримки у подієвих шинах Redis або MQTT.

Протокол вимірювань поєднує функціональні, провокаційні та стресові випробування. На функціональному етапі виконують серію безперервних друків еталонних моделей з увімкненим модулем штучного інтелекту, контролюючи якість друку, стабільність телеметрії та коректність журналювання. На етапі індукованих дефектів параметри друку змінюють у контрольований спосіб,

знижуючи температуру сопла, змінюючи швидкість подачі матеріалу, локально забруднюючи філамент або вводячи додаткові вібрації, що дозволяє оцінити істинно позитивну та хибнопозитивну частки виявлень за різних сценаріїв.

Затримку від кадру до дії оцінюють шляхом кореляції службових міток шарів, телеметрії та часових позначок кадрів і подій. На основі цих даних обчислюють дев'яносто п'яту та дев'яносто дев'яту перцентилі повної затримки для всієї сукупності випробувань. Стресове випробування передбачає тривалий друк протягом кількох годин при високій роздільності та частоті від п'ятнадцяти до двадцяти кадрів за секунду з безперервним моніторингом завантаження процесора, пам'яті, операцій введення виведення та температури системи на кристалі.

Окремий клас тестів становлять сценарії хаотичних перезапусків, у межах яких примусово перезапускають модуль комп'ютерного зору та компоненти шини під час реального друку. Успішним вважають сценарій, коли система автоматично повертається до номінального режиму та відновлює коректну роботу без втрати керованості процесом.

### 3.18. Узагальнені критерії приймання інтелектуального комплексу

Узагальнені критерії приймання формують як систему вимог до модуля штучного інтелекту, експлуатаційних характеристик, надійності, сумісності та безпеки. Для модуля штучного інтелекту повинні виконуватися співвідношення:

$$mAP_{\text{дрібн}} \geq 0,7, \quad TPR_{\text{вел}} \geq 0,9, \quad TPR_{\text{дрібн}} \geq 0,8, \quad FPR_{\text{дрібн}} \leq 0,05, \quad (3.53)$$

де  $TPR_{\text{вел}}$  є істинно позитивною часткою для великих дефектів,  $TPR_{\text{дрібн}}$  для дрібних дефектів,  $FPR_{\text{дрібн}}$  хибнопозитивною часткою для дрібних дефектів.

Часові обмеження задають умовами:

$$\tau_{95} \leq 0,8, \quad \tau_{99} \leq 1,0, \quad (3.54)$$

що гарантує своєчасність втручань у більшості виробничих сценаріїв. В експлуатаційному вимірі необхідно досягти:

$$q_{\text{врят}} \geq 0,6, \quad f_{\text{пауз}} \leq 0,1, \quad (3.55)$$

що відображає баланс між ефективністю запобігання браку та низькою частотою хибних пауз.

Для показників надійності встановлюють вимогу:

$$A \geq 0,99, \quad MTTR \leq 5 \text{ хв}, \quad (3.56)$$

де *MTTR* є середнім часом відновлення після контрольованого збою. Крім того, система повинна коректно переходити в режим лише журналювання при деградації модуля комп'ютерного зору, зберігаючи повну керованість процесом друку з боку оператора.

Сумісність із бюджетними принтерами передбачає стабільну роботу з прошивкою Marlin у поєднанні з OctoPrint або OctoPi, підтримку макросів паузи та паркування та коректну обробку базового набору команд G коду, що використовується сучасними слайсерами. У сфері безпеки система повинна успішно проходити перевірки конфігурації шифрування, механізмів рольового керування доступом і аудиту, а також не допускати виконання небезпечних дій без відповідного підтвердження з боку уповноваженого користувача.

За результатами приймальних випробувань формують підсумковий звіт, який містить числові значення основних показників, графіки використання ресурсів та уривки журналів подій з характерними кадрами і масками детекцій. Для архівів журналів та зображень обчислюють контрольні хеш суми, а також готують відтворений пакет, що включає версії моделей, бінарні компоненти, файл політики, параметри конфігурації камери, G коди еталонних моделей і допоміжні скрипти для бенчмаркінгу. Такий пакет забезпечує можливість повного відтворення експериментів і спрощує впровадження системи на нових інсталяціях.

### **3.19. Спостерігачі стану та узгодження каналів руху й екструзії**

Для компенсації запізнювань і стисливості тракту подачі матеріалу використовується наближений спостерігач стану екструзії, який відновлює невимірювані внутрішні змінні за обмеженим набором проксі показників



комп'ютерного зору та телеметрії. У дискретному часі модель спостерігача задають рівнянням:

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k + L(y_k - C\hat{x}_k) \quad (3.57)$$

де  $\hat{x}_k$  є вектором оціненого стану екструзії на такті  $k$ ,  $u_k$  є вектором керувальних дій, що включає команди подачі філаменту та лінійної швидкості руху головки,  $y_k$  є вектором вимірюваних проксі показників, а  $L$  є матрицею підсилення спостерігача, а матриці  $A, B, C$  отримують шляхом апроксимації динаміки тракту екструзії та механіки подачі з урахуванням інерційних ефектів, еластичності філаменту і дискретизації планувальника траєкторій.

До складу вектора стану доцільно включати інтегральну масу матеріалу в активному сегменті тракту, миттєву швидкість зміни об'ємного потоку та узагальнену координату деформації філаменту. Узгодження каналів руху й екструзії реалізується через коригування подачі та параметрів випереджальної компенсації за правилом:

$$u_k^{corr} = u_k + K_e \hat{e}_k \quad (3.58)$$

де  $u_k^{corr}$  є скоригованим вектором керувальних дій,  $K_e$  є матрицею підсилення помилки екструзії, а  $\hat{e}_k$  є оціненим вектором відхилень між планованою та фактичною подачею, який формують на підставі розбіжностей між прогнозованою шириною і висотою валка та оцінками з модуля комп'ютерного зору.

Оцінений вектор стану використовують для узгодження руху і екструзії через параметри pressure advance або linear advance та мікрокорекцію швидкості на коротких сегментах. Якщо позначити плановану лінійну швидкість як  $v_k^{ref}$ , а скориговану як  $v_k^{act}$ , то корекцію швидкості задають співвідношенням:

$$v_k^{act} = v_k^{ref} (1 + \alpha^T \hat{e}_k) \quad (3.59)$$

де вектор  $\alpha$  задає ваги впливу компонент помилки екструзії, а обмеження на множник корекції реалізують на рівні політики безпеки, що гарантує зміну швидкості в межах кількох відсотків від номіналу на кожному такті.

Основні компоненти вектора стану екструзії та їх зміст узагальнюються у відповідній таблиці, підпис якої зберігається.

Адаптивні алгоритми працюють у межах технологічних обмежень, пов'язаних з кінематикою приводу, допустимими навантаженнями на механіку, тепловими режимами сопла та столу і властивостями матеріалу. Для лінійної швидкості та прискорення друкуючої головки задають обмеження:

$$v_{min} \leq v(t) \leq v_{max}, \quad a_{min} \leq a(t) \leq a_{max} \quad (3.60)$$

де  $v_{max}$  і  $a_{max}$  відповідають межам, за яких не виникають значні механічні резонанси і перевищення струмів приводів, а  $v_{min}$  та  $a_{min}$  визначаються вимогами до мінімального теплового навантаження та відсутності надмірного перегріву перших шарів.

Для температурних режимів сопла та столу встановлюють робочі інтервали:

$$T_{nozzle}^{min} \leq T_{nozzle}(t) \leq T_{nozzle}^{max}, \quad T_{bed}^{min} \leq T_{bed}(t) \leq T_{bed}^{max} \quad (3.61)$$

де нижні межі забезпечують адгезію та потрібну в'язкість розплаву, а верхні запобігають деградації полімеру і спрацюванню захисту від теплового пробою.

Стійкість замкненого контуру забезпечують поєднанням насичення керувальних впливів, механізмами антинаповнення у підсистемах типу PID та фільтрацією керувальних сигналів у частотній смузі нижче домінантних резонансів механічної структури. Сумарне керування подають у вигляді композиції номінальної компоненти та адаптивної поправки:

$$u(t) = \mathcal{S}(u_0(t) + u_{ad}(t)) \quad (3.62)$$

де  $\mathcal{S}$  є оператором проєкції на допустиму множину технологічних обмежень.

Якість адаптивних алгоритмів оцінюють за показниками, що характеризують геометричну точність та морфологію поверхні і частоту спрацювань політик втручання. Для рінгінгу та хвилястості поверхні контрольних зразків розраховують відносне зниження амплітуди:

$$\Delta A_{ring} = 1 - \frac{A_{ring}^{new}}{A_{ring}^{base}} \quad (3.63)$$

де  $A_{ring}^{base}$  та  $A_{ring}^{new}$  є середні амплітуди рінгінгу до та після впровадження адаптивних алгоритмів.

Стабільність ширини траси характеризується відносним відхиленням:

$$\delta_w = \frac{\sigma_w}{w} \quad (3.64)$$

де  $w$  є середньою шириною, а  $\sigma_w$  є стандартним відхиленням; прийнятним вважають діапазон не більше п'яти відсотків. Для висоти шару контролюють середньоквадратичне відхилення, яке не повинно перевищувати близько десяти мікрометрів для типових висот шару.

Сукупний критерій якості адаптивного керування описують функціоналом:

$$J = \beta_1 \Delta A_{ring} + \beta_2 (1 - \delta_w) + \beta_3 (1 - \delta_h) - \beta_4 R_B \quad (3.65)$$

де  $\delta_h$  є відносним відхиленням висоти шару,  $R_B$  є інтенсивністю спрацювань політики рівня В за одиницю часу друку, а коефіцієнти  $\beta_i$  відображають відносну важливість складових.

У випадку бюджетних принтерів на Marlin адаптивне керування реалізується секційним формуванням G коду з локальними командами корекції прискорення, ривка, лінійної швидкості та об'ємного потоку. Використовують команди M204 та M205 для зміни профілю прискорень та обмеження ривка і команди M220 та M221 для масштабування швидкості та потоку екструзії. Керування охолодженням здійснюють командами M106 та M107 з урахуванням локального контексту ділянки траєкторії. Завдяки цьому реалізація не потребує змін апаратної частини і сумісна з типовими конфігураціями Marlin у поєднанні з OctoPrint або OctoPi.

Таблиця 3.12

Порівняльні особливості впровадження адаптивного керування на платформах Marlin та Klipper

Платформа	Механізм впровадження адаптації	Додаткові можливості
Marlin + OctoPrint	секційний G-код, команди M204, M205, M220, M221, M106, M107	не потребує апаратних змін
Klipper	тимчасові обмеження V, A, J, параметри pressure advance,	підтримка акселерометрів, автоматичний input shaper
	макроси SAFE_PAUSE, SAFE_RESUME, SAFE_STOP	гнучка інтеграція з політиками на хості

У конфігураціях на основі Klipper доступні розширені можливості адаптивного впливу, які включають гнучке налаштування профілів максимальної

швидкості, прискорення та ривка, зміну параметрів pressure advance та вибір типу шейпера вхідних коливань. Наявність акселерометрів типу ADXL345 дозволяє періодично уточнювати динамічну модель механіки та підтримувати узгодженість адаптивних алгоритмів із фактичними резонансами системи.

Хост рівень на Raspberry Pi 5 забезпечує частоту оновлення політик випереджального керування та полегшеного модельно орієнтованого керування на рівні приблизно від п'ятдесяти до ста герців з латентністю не більше двадцяти мілісекунд, що достатньо для адаптації на рівні окремих шарів і підсегментів траєкторії.

У змісті таблиці 3.12 узагальнюються відмінності у засобах зміни динамічних параметрів руху та екструзії і в наявних інструментах інтеграції з хост політиками без відтворення табличної форми.

У таблиці 3.13 порівнюються платформи Marlin та Klipper за каналами інтеграції, налаштовуваними динамічними параметрами та додатковими можливостями, але саму табличну структуру не відтворено.

Таблиця 3.13

Характеристика програмно апаратних платформ адаптивного керування рухом та екструзією

Платформа прошивки	Канал інтеграції	Налаштовувані динамічні параметри	Додаткові можливості
Marlin	Секційний G-код, команди M201/M204/M205, M220/M221, M106/M107	Локальні обмеження швидкості, прискорення, масштабування потоку та швидкості	Не потребує змін апаратної частини, сумісність із широким класом бюджетних принтерів
Klipper	Конфігураційні файли, макроси, об'єкти pressure_advance, input_shaper	Профілі V/A/J, параметри тиску в тракті, вхідне формування сигналу	Підтримка акселерометрів, гнучка інтеграція з модулями ШІ і політик на хості

Аналіз підписів таблиць показує, що зв'язка Marlin та OctoPrint орієнтована на максимально широку сумісність із бюджетними принтерами і використовує вже наявний канал G коду з локальними змінами параметрів руху та подачі, тоді як

платформа Klipper забезпечує глибший доступ до динаміки та підтримку акселерометрів, що дозволяє точніше узгоджувати адаптивні алгоритми з особливостями механіки.

### **3.20. Інтеграція модуля штучного інтелекту в замкнений наглядний контур**

Замкнений наглядний контур ґрунтується на інтеграції відеопідсистеми, інференс модуля, телеметрії принтера та правилкових політик втручання.

Основна мета полягає у ранньому виявленні дефектів і ініціюванні безпечних корекцій параметрів друку з мінімальним впливом на продуктивність. Модуль штучного інтелекту працює на Raspberry Pi п'ятої серії та взаємодіє з принтерами на базі прошивок Marlin і Klipper через стандартизовані канали передавання команд і даних. Загальну логіку каскаду наглядового контролю у вигляді послідовності етапів від зчитування даних до вибору дії подано на рисунку 3.5.

Каскад тригерного виявлення, верифікації та дії організують у вигляді послідовних кроків. Спочатку система формує поточний стан друку на основі відеокадрів і телеметрії, виконує попередню обробку зображення, виділяє візуальні ознаки та поєднує їх з технологічними параметрами у мультимодальний вектор. Далі обчислюється первинна оцінка ризику, яка визначає ймовірність наявності дефекту у поточному шарі чи фрагменті траєкторії. Якщо оцінка ризику не перевищує порогове значення, контур повертається до зчитування даних без втручання. Коли ризик перевищує поріг, вмикається гілка уточнювальної верифікації.

Модуль політик аналізує цю інформацію разом з контекстом друку, історією попередніх спрацювань і технологічними обмеженнями і на цій підставі обирає режим втручання. Для низького ризику система лише веде журнал, для середнього ризику застосовує м'які дії типу уповільнення руху чи зміни обдуву, для високого ризику виконує жорсткі дії з паузою та паркуванням голови. Усі втручання

розглядаються як атомарні транзакції з можливістю відновлення узгодженого стану друку.

Формалізовану структуру каскадної політики втручання подано на рисунку. У ній кожному етапу відповідає явний стан системи нагляду, а переходи між станами пов'язано з порогами ризику, тривалістю перебування у небезпечному режимі та результатами верифікації аномалії. Схема демонструє, як у межах одного циклу уточнюються оцінки ризику, оновлюються згладжені індикатори, ведеться лічильник небезпечних кроків, фіксуються моменти жорстких втручань і послідовно виконуються дії від нормального спостереження до повної зупинки друку. Такий опис є основою для подальшого математичного аналізу своєчасності втручань, оцінки ризику пропуску дефектів і побудови алгоритмів самоналаштування порогів.

Складені послідовності дій, такі як пауза, паркування голови, захоплення контрольного зображення та подальша корекція параметрів, трактують як неподільні транзакції. Для них визначають початковий узгоджений стан, формують послідовність макросів або G кодів і встановлюють правило відкату. Початковий стан  $s_0$  переводять у цільовий стан  $s_1$  оператором транзакції, а у разі часткової невдачі повертаються до  $s_0$ .

У конфігураціях з Klipper транзакційність підтримують макросами `SAFE_PAUSE`, `SAFE_RESUME` та `SAFE_STOP`, які зберігають і відновлюють внутрішній стан інтерпретатора. У Marlin еквівалентні послідовності формують з G кодів паузи, паркування та керування температурами на рівні скриптів хосту, де в журналі OctoPrint фіксують усі кроки виконання.

Для параметрів корекції вводять обмеження безпеки. Зміна швидкості в межах одного шару не перевищує заданого відсотка від номінального значення, зміна швидкості вентилятора обмежується як за модулем, так і за швидкістю зміни, а температурні поправки залишаються в межах, що не провокують нестабільності теплових контурів і спрацювання захисту. Якщо підтверджені спрацювання повторюються в межах короткого часових проміжків, політика підвищує рівень

втручання до контрольованих пауз, а при перетині технологічних меж ініціює аварійну зупинку.

### 3.21 Технічні аспекти інференсу на Raspberry Pi 5

Моделі штучного інтелекту експортують у формат ONNX та виконують у середовищах ONNX Runtime або OpenVINO для архітектури ARM. Для моделей на базі ResNet п'ятдесят і ResNet сто один застосовують квантування до формату INT8 та структурне або каналне проріджування, що зменшує обчислювальну складність без істотної втрати якості. Детальна верифікація виконується лише в межах областей інтересу, що додатково знижує середню латентність.

Бюджет латентності повного контуру від кадру до дії описують сумою складових:

$$T_{E2E} = T_{cap} + T_{trig} + T_{ver} + T_{policy} + T_{comm} + T_{mech} \quad (3.66)$$

де  $T_{E2E}$  є повною латентністю від захоплення кадру до реакції механіки,  $T_{cap}$  є часом захоплення та доставки кадру,  $T_{trig}$  є часом роботи тригерного шару,  $T_{ver}$  є часом детальної верифікації областей інтересу,  $T_{policy}$  є часом ухвалення рішення модулем політик,  $T_{comm}$  є часом передавання керувальних команд, а  $T_{mech}$  є часом механічної реакції.

Проектні оцінки задають верхні межі для кожної складової, що дозволяє обмежити дев'яносто п'ятий перцентиль  $T_{E2E}$  значенням, яке придатне для практичного втручання до того, як дефект стане незворотним.

У таблиці 3.14 задаються орієнтовні діапазони значень для кожної компоненти латентності без реконструкції табличної форми.

Злиття інформації від модуля штучного інтелекту та телеметрії друку здійснюється на рівні рішень. Оцінку ризику дефекту у контексті друку розглядають як умовну ймовірність, яку на практиці наближують ваговим комбінуванням оцінки моделі та контекстних коефіцієнтів. Ваги підсилюють для перших шарів, мостів і тонких стінок та зменшують для масивного заповнення.

Щоб зменшити коливання рішень та уникнути частих перемикань дій, використовують гістерезис у часі та по кадрах. Вводять пороги виявлення і скидання тривоги, а також мінімальні інтервали між послідовними втручаннями. Віконне голосування по кадрах реалізують через обчислення частки кадрів у часовому вікні, на яких оцінка ймовірності дефекту перевищує поріг, і дозволяють дію лише тоді, коли ця частка перевищує задане значення.

Таблиця 3.14

Узагальнений бюджет латентності енд ту енд контуру виявлення та втручання

Складова латентності	Орієнтовне значення
Захоплення кадру	не більше 20 мілісекунд
Тригерний шар	не більше 15 мілісекунд
Верифікація областей інтересу	від 150 до 300 мілісекунд
Прийняття рішення політикою	не більше 10 мілісекунд
Передавання команд	не більше кількох десятків мілісекунд
Механічна реакція	порядку кількох сотень мілісекунд

Журнали подій замкненого наглядного контуру формують основу для навчання і донавчання моделей. Кожний запис містить кадр, маску або рамку детекції, тип дефекту, контекст шару, телеметрію та виконану дію. Оператор позначає події як підтверджені або хибні, формуючи валідовану підвибірку даних. На її основі періодично здійснюють офлайн донавчання моделей.

Якість моделі оцінюють комплексним функціоналом, який поєднує чутливість, хибнопозитивну частку, латентність та частку хибних пауз. За результатами оцінювання ухвалюють рішення про розгортання нової версії моделі у канарейковому режимі з подальшим поширенням на парк обладнання за відсутності негативних ефектів.

У текстовому описі таблиці перелічено основні метрики, такі як mAP для дрібних об'єктів, дев'яносто п'ята перцентиль латентності, частка врятованих



друків, частота подій рівнів В та А і середня величина корекцій параметрів, без структурованої таблиці.

Таблиця 3.15

Приклади ключових метрик замкненого наглядного контуру

Метрика	Зміст і цільове призначення
mAP для дрібних об'єктів	оцінка якості виявлення дрібних дефектів
Дев'яносто п'ята перцентиль латентності	гарантії своєчасності реакції
Частка врятованих друків	відношення коректно врятованих завдань до зіпсованих
Частота подій рівнів В та А	оцінка інтенсивності втручань різної критичності
Середня величина корекцій параметрів	характерні масштаби впливу політик керування

Для замкненого наглядного контуру вводять систему ключових метрик, які кількісно характеризують якість роботи інтелектуальної підсистеми контролю та її придатність до виробничої експлуатації. До неї належать середні та часткові середні точності для дрібних об'єктів, метрики латентності з виділенням медіани та дев'яносто п'ятої перцентилі, частка завдань друку, які були коректно врятовані завдяки своєчасним втручанням, частота подій різних рівнів політики та статистика величин корекцій технологічних параметрів.

Збирання цих метрик реалізують через наскрізне трасування з використанням ідентифікаторів завдання, шару та рішення, що пов'язують послідовності кадрів, команди до принтера і результати виконання. Безпекові вимоги передбачають, що всі дії, здатні вплинути на цілісність обладнання або заготовки, у разі віддаленого доступу потребують явного підтвердження оператора та не можуть порушити вбудовані в прошивку температурні й кінематичні обмеження.

### 3.22 Експлуатаційна автоматизація спостережності, відновлення, резервування

Експлуатаційна автоматизація забезпечує контроль стану системи, своєчасне виявлення деградацій, відновлення після збоїв та захист критично важливих даних. На рівні спостережності відстежують частоту кадрів модуля штучного інтелекту, латентність ланцюга від захоплення кадру до виконання команди разом із відповідними процентилями, частку хибних спрацювань і пауз на годину друку, а також середні величини корекцій швидкості, потоку, температури і охолодження. Паралельно здійснюють моніторинг технічних характеристик хоста, таких як температура та ознаки тротлінгу системи на кристалі, завантаженість процесора й графічного прискорювача, використання оперативної пам'яті, заповнення файлової системи і мережеві показники.

Телеметрія друку включає реальні та еталонні профілі температур сопла і столу, показники стабільності регуляторів, індекс шару, тип траєкторії, швидкість та режим охолодження, а також повідомлення від прошивки. Журнали і трасування мають структурований формат із використанням ідентифікаторів завдання та шару; для подій підвищеної важливості додатково зберігають знімки та короткі відеофрагменти.

Частоту хибних пауз характеризують відношенням:

$$FalsePauseRate = \frac{N_{false}}{T_{print}} \quad (3.67)$$

де  $N_{false}$  є кількістю хибних пауз за період спостереження, а  $T_{print}$  є сумарним часом друку в годинах. На основі спостережень встановлюють порогові значення цієї метрики, перевищення яких трактують як деградацію поведінки системи.

Для збереження конфігурацій і журналів застосовують стратегію регулярного резервного копіювання з контролем цілісності на основі хеш сум і періодичною перевіркою можливості відновлення архівів. Стан друку з певним інтервалом фіксують у вигляді контрольних точок, що містять номер шару, положення друкуючої голови, актуальні температурні режими та параметри охолодження. У

конфігураціях Marlin використовують стандартні механізми відновлення після втрати живлення, у конфігураціях Klipper застосовують макроси відновлення з обов'язковим звіренням висоти шару та контрольним прогрівом.

Сервіси модуля комп'ютерного зору, хоста друку та політик контролюють сторожовими таймерами на рівні операційної системи. У разі відсутності ознак працездатності або перевищення встановленого бюджету латентності відповідні служби автоматично перезапускають. Перед запуском нового завдання перевіряють цілісність G коду, відповідність профілю матеріалу та сопла, а також наявність службових міток шарів.

Безпечний доступ до системи забезпечують шифруванням транспортних каналів, розмежуванням прав користувачів за ролями, використанням багатофакторної автентифікації для зовнішніх сесій та сегментацією мережі, яка ізолює обладнання від несанкціонованих впливів. Операції підвищеного ризику, такі як аварійна зупинка, зміна температурних меж і оновлення прошивок, виконують лише після двоетапного підтвердження.

Таблиця 3.16

Типи експлуатаційних журналів та їх призначення

Тип журналу	Основний зміст
Технологічні журнали	G-код, шари, параметри друку, події політик
Системні журнали	стан хоста, перезапуски сервісів, сторожові таймери
Безпекові журнали	входи, зміни конфігурацій, спроби віддаленого доступу

У тексті окремо пояснюється, що технологічні журнали описують перебіг процесу друку і реакції політик, системні журнали відображають роботу хост рівня та сервісів, а безпекові журнали фіксують дії користувачів і спроби доступу.

### 3.23. Роботизація завершення друку

Роботизація етапу завершення друку спрямована на автоматизацію послідовності від завершення формування виробу до підготовки робочої зони до

нового завдання. При цьому зберігають геометрію виробу, поверхневий стан столу та безпечні режими для приводу і виконавчих механізмів.

Сценарії механізованого зняття моделі залежать від типу платформи та властивостей матеріалу. Для гнучкої магнітної пластини використовують керований згин пружної основи за допомогою сервоприводів або ексцентрикових механізмів після того, як температура столу знизиться до матеріалозалежної температури відриву. Для PLA вона становить приблизно від тридцяти п'яти до сорока п'яти градусів Цельсія, для модифікованого поліетилентерефталату від п'ятдесяти до шістдесяти градусів. Перевагою такого підходу є мінімальний контакт з поверхнею шва, тоді як ризиком є вплив циклів згинання на довговічність кріплень і тонких моделей.

Таблиця 3.17

Основні сценарії зняття виробу з платформи

Сценарій	Доцільна область застосування	Ключові особливості
Керований згин пластини	гнучкі магнітні плити, середні й великі вироби	мінімальний контакт зі швом
Інерційний відрив	невеликі вироби з малою площею контакту	короткі імпульси в площині столу
Скребок із контролем сили	високі адгезії, складна геометрія краю	вимірювання сили, комплаєнтна ланка
Стрічковий стіл	серійне виробництво, конвеєрне відвантаження	координатне відстеження положення стрічки

Для столів з підвищеною адгезією можуть застосовувати інерційний відрив, коли короткохідний привід формує імпульс переміщення у площині столу з малою амплітудою, або використання скребка чи штовхача з контрольованою силою притиску на лінійному модулі з комплаєнтною ланкою та вимірюванням сили. У промислових конфігураціях застосовують стрічковий стіл, де синхронізують рух стрічки з роботою інструментів зняття.

Вибір сценарію зняття формалізують як задачу вибору стратегії з множини допустимих, яку оцінює функція корисності  $U$ . Оптимальну стратегію визначають як:

$$s^* = \operatorname{argmax}_{s \in \mathcal{S}} U(s; S, m, h, T_b) \quad (3.68)$$

де  $\mathcal{S}$  є множиною доступних стратегій,  $S$  є площею контакту моделі зі столом,  $m$  є типом матеріалу,  $h$  є висотою виробу, а  $T_b$  є температурою столу.

У текстовому описі до таблиці вказано, що керований згин пластини є найбільш універсальним для гнучких магнітних столів, інерційний відрив доцільний для невеликих моделей, скребок з контролем сили застосовують при високій адгезії, а стрічковий стіл найпридатніший для серійного виробництва.

Запуск процедури зняття допускається лише після виконання умов безпечного старту. Стан голови  $H$  має відповідати паркуванню, температура сопла не перевищує безпечного порога, температура столу є меншою або рівною температурі відриву, а індикатори відсутності сторонніх об'єктів свідчать про чисту робочу зону. Кероване охолодження столу задають обмеженням на швидкість зміни температури:

$$\left| \frac{dT_{bed}}{dt} \right| \leq \gamma_{cool} \quad (3.69)$$

де  $\gamma_{cool}$  обмежує термічні градієнти і зменшує ризик деформацій виробу. Основний цикл зняття виконується за наперед заданим профілем швидкості і прискорення з контролем сили і можливістю корекції траєкторії у разі часткового відриву.

Критеріями приймання роботизованого зняття є частка успішних відривів без пошкодження моделі не менше дев'яносто дев'яти відсотків на референтному наборі геометрій, середній час циклу від завершення друку до готовності до нового завдання у межах кількох хвилин для основних матеріалів та нульова кількість колізій.

### 3.24. Безперервна валідація та тестування

Підсистема безперервної валідації та тестування розглядає кожну зміну політик керування, профілів друку чи конфігурацій модулів як контрольований

експеримент з кількісною оцінкою наслідків. Базовим інструментом є режим сухого прогону, коли траєкторію G коду відтворюють без нагріву і без екструзії, реєструючи усі події та команди як під час реального друку. Це дозволяє виявити конфлікти обмежень швидкості, прискорення і ривка та несумісності між параметрами хоста і прошивки без ризику для обладнання.

Наступний рівень валідації становлять контрольовані збої, коли свідомо змінюють режими друку для відтворення сценаріїв відмов, таких як зниження температури сопла або столу, локальне підвищення швидкості на окремих ділянках чи зміна параметра потоку. За результатами оцінюють чутливість і стійкість політик та налаштовують пороги.

Порівняльні випробування реалізують у вигляді A/B експериментів, коли альтернативні профілі параметрів послідовно або паралельно застосовують до репрезентативного набору завдань друку, а результати порівнюють за комплексом метрик браку, морфології шва, стабільності екструзії та латентності реакції системи. Канарейкові друки виконують роль попереднього фільтра для нових політик.

Таблиця 3.18

Типи випробувань наглядного контуру та їх призначення

Тип випробувань	Основне призначення
Сухий прогін	перевірка кінематики та синхронізації шарів
Ін'єкція контрольованих збоїв	оцінка чутливості й стійкості політик
Порівняльні A/B-випробування	вибір оптимальних профілів параметрів
Канарейкові друки	попередня перевірка перед масовим розгортанням

Отже, сухий прогін забезпечує перевірку кінематики та синхронізації шарів, ін'єкція контрольованих збоїв оцінює чутливість та стійкість політик, порівняльні A/B випробування дозволяють обрати оптимальні профілі параметрів, а канарейкові друки гарантують безпечне масштабування змін.

Керування конфігураціями та випусками є ключовою частиною життєвого циклу автоматизованої системи FDM або FFF друку. Профілі друку, макроси керування, політики втручання, параметри модулів комп'ютерного зору і налаштування телеметрії розглядають як конфігураційні артефакти, що мають власну історію змін та підлягають контрольованому розгортанню.

Стан системи під час експерименту описують вектором конфігурації:

$$\chi = (v_{print}, v_{policy}, v_{vision}, v_{host}) \quad (3.70)$$

де  $v_{print}$  є версією профілю друку,  $v_{policy}$  є версією політики втручання,  $v_{vision}$  є версією моделі комп'ютерного зору, а  $v_{host}$  є версією програмного забезпечення хоста. Для кожної компоненти застосовують семантичну нумерацію, що дозволяє розрізняти основні, мінорні та виправні зміни.

Розгортання нових конфігурацій організують за канарейковим принципом. Спочатку нову версію застосовують до одного принтера або обмеженої підмножини обладнання з посиленням моніторингом, після чого у разі відсутності деградації поступово поширюють на весь парк. Журнал змін фіксує причини модифікацій, пов'язані експериментальні результати та межі застосовності.

Еталонний сценарій автоматизації процесу FDM або FFF друку описує узагальнену послідовність дій від моменту отримання завдання до архівації усіх супутніх даних. На вхідному етапі система приймає файл G коду, перевіряє узгодженість параметрів матеріалу, сопла та профілю друку і за потреби доповнює його службовими мітками шарів. Далі виконується блок попередніх перевірок доступності камери, справності каналів зв'язку з мікроконтролером, коректності температурних датчиків, наявності достатнього вільного місця та відсутності небезпечних команд у G коді.

Після успішного завершення попереднього етапу система виводить сопло та стіл на задані температури, виконує автоматичне нівелювання платформи, ініціалізує модуль комп'ютерного зору та мітки шарів. Під час друку працює замкнений контур, що об'єднує дані прошивки, висновки модуля комп'ютерного зору та політику втручання. Рішення політики поділяють на м'які корекції, які

змінюють швидкість, потік та охолодження, і жорсткі втручання, що призводять до паузи, паркування голови або аварійної зупинки.

Після завершення друку сценарій передбачає контрольоване охолодження вузлів, роботизовану або ручну процедуру зняття моделі зі столу, очищення робочої зони, відновлення початкового положення координатної системи та підготовку до нового завдання. На фінальному етапі здійснюють архівацію журналів, відеокadrів і конфігурацій політик, формують пакет даних з G кодом, маніфестом друку та контрольними хеш сумами і виконують резервне копіювання на зовнішнє сховище.

Система оцінювання ефективності автоматизації ґрунтується на сукупності кількісних показників продуктивності, якості, надійності та керованості процесу FDM або FFF друку за мінімальної участі оператора.

Частку врятованих друків описують відношенням:

$$\eta_{save} = \frac{N_{saved}}{N_{risk}} \quad (3.71)$$

де  $N_{saved}$  є кількістю завдань, які завершилися успішно завдяки втручанням системи, а  $N_{risk}$  є кількістю завдань з нефіксованими ризиками дефекту.

Таблиця 3.19

Виміри оцінювання та приклади цільових значень метрик

Вимір оцінювання	Основні метрики	Приклад цільових значень
Якість виявлення дефектів	$TPR, FPR, mAP$	$TPR \geq 0,90, FPR \leq 0,05, mAP \geq 0,80$
Технологічний ефект втручань	$SR$ , частка браку	$SR \geq 0,60$ у загальних сценаріях, $SR \geq 0,75$ у серіях
Експлуатаційна продуктивність	$L, FPS, E_{fps}, U$	$L_{p95} \leq 0,8$ с, $U \geq 0,99$

Скорочення інтенсивності ручних втручань характеризує показник:

$$\eta_{ops} = \frac{\lambda_{ops}^{after}}{\lambda_{ops}^{before}} \quad (3.72)$$



де  $\lambda_{ops}^{before}$  та  $\lambda_{ops}^{after}$  є середньою кількістю дій оператора за годину до і після впровадження автоматизації.

Відхилення від планової траєкторії руху оцінюють середньоквадратичною похибкою швидкості:

$$RMSE_v = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (v_t - v_t^*)^2} \quad (3.73)$$

де  $v_t$  є фактичною швидкістю,  $v_t^*$  є референтною, а  $T$  є кількістю вимірювань.

Стабільність ширини шва описують коефіцієнтом варіації:

$$CV_w = \frac{\sigma_w}{\mu_w} \cdot 100 \quad (3.74)$$

де  $\sigma_w$  є стандартним відхиленням ширини шва, а  $\mu_w$  є її середнім значенням.

Надійність сервісів характеризує аптайм:

$$U = 1 - \frac{T_{down}}{T_{obs}} \quad (3.75)$$

де  $T_{down}$  є сумарним часом недоступності, а  $T_{obs}$  є тривалістю спостереження.

Таблиця 3.20

Ключові групи показників якості та керованості наглядного контуру

Група показників	Приклад позначення	Цільовий рівень	Інтерпретація
Виробнича ефективність	$\eta_{save}$ , $\eta_{ops}$	$\eta_{save} \geq 0,6$ , $\eta_{ops} \ll 1$	Частка «врятованих» друків, зменшення ручних дій
Якість і стабільність	$RMSE_v$ , $CV_w$	$RMSE_v \leq 8\%$ , $CV_w \leq 6-10\%$	Відхилення швидкості, стабільність ширини шва
Надійність і безпека	$U$ , частка успішних відновлень	$U \geq 99\%$ , $\geq 95\%$ успішних відновлень	Доступність сервісів, здатність відновлення
Керованість (спостережність)	Повнота журналів, час заміни моделей	Повнота $\geq 98\%$ , заміна $\leq 30-60$ с	Прозорість конфігурацій, швидкість керування змінами

Визначено три ключові виміри оцінювання якості виявлення дефектів, технологічний ефект втручань та експлуатаційну продуктивність із прикладними цільовими значеннями TPR, FPR, mAP, частки врятованих друків, дев'яносто п'ятої перцентилі латентності та коефіцієнта доступності.

Виділяються групи показників виробничої ефективності, якості та стабільності, надійності та безпеки, а також керованості та спостережності.

Позначення  $\eta_{save}$ ,  $\eta_{ops}$ ,  $RMSE_v$ ,  $CV_w$ ,  $U$  використовують для стислого опису відповідних показників. Вони утворюють замкнений контур зворотного зв'язку для еволюції системи, де виробнича ефективність фіксує вииграш від впровадження штучного інтелекту, показники якості та стабільності пов'язують профілі друку і політики втручання з геометричними та кінематичними відхиленнями, метрики надійності й безпеки характеризують здатність системи працювати в режимі наближеної безвідмовності, а показники керованості та спостережності відображають зрілість експлуатаційних процесів.

### 3.25. Автоматизація робочих сценаріїв

Автоматизація робочих сценаріїв спирається на формальний опис життєвого циклу завдання у вигляді станової моделі, де кожний етап процесу відповідає окремому стану, а переходи між станами ініціюються подіями та охоронними умовами. Типова послідовність станів включає ініціалізацію, прогрів, базування, формування прайм лінії, друк шарів, охолодження, відділення моделі та повернення у режим очікування. Паралельно задають аварійні гілки, що описують реакцію системи на аномалії температури, дефіцит філаменту, втрату зв'язку з мікроконтролером, збої модуля комп'ютерного зору чи зникнення живлення.

Кожний перехід описують тріадою поточний стан, подія та новий стан з охоронними умовами, які мають бути виконані для легітимності переходу, та діями, що виконуються під час переходу. Ідемпотентність переходів забезпечує відсутність небажаного дублювання ефектів при повторному надходженні

однакових подій. Останній підтверджений стан зберігають у сховищі, що дозволяє коректно відновити контекст після перезапуску системи.

Практичну реалізацію станової логіки забезпечують стандартизовані макроси, які інкапсулюють типові послідовності G коду та перевірок стану. Такі макроси конструюють так, щоб повторний виклик у коректному стані не змінював конфігурацію системи, а лише підтверджував її узгодженість. Базовий набір включає макроси безпечного запуску, зупинки, паузи та відновлення, які поєднують паркування голови, операції з філаментом, блокування рухів і керування вентиляторами.

У Klipper сценарії реалізують через макросні секції з використанням механізмів збереження та відновлення стану, керування швидкістю, тиском у тракті екструзії та обертами вентиляторів. У Marlin аналогічну функціональність досягають через комбінації стандартних G кодів паузи, відновлення, заміни філаменту, паркування та керування температурами, які об'єднують у сценарії на хост рівні. Це забезпечує уніфіковану поведінку для різних класів прошивок без змін апаратної частини та створює єдиний інтерфейс між становою моделлю, модулем штучного інтелекту та підсистемою політик втручання.

### **3.26. Експериментальні дослідження**

Експериментальна частина дослідження спрямована на кількісну перевірку працездатності та ефективності запропонованої інформаційної технології нагляді і автоматизованого втручання у процес FDM або FFF друку. Система реалізується на базі Raspberry Pi 5, виконує модулі комп'ютерного зору на архітектурах класу ResNet з бекбонами типу FPN, взаємодіє з бюджетними принтерами на прошивках Marlin та Klipper і працює у замкненому контурі кадр рішення дія. Експериментальний дизайн охоплює формування наборів даних, відпрацювання контрольованих сценаріїв дефектів, реєстрацію телеметрії, оцінювання якості виявлення та аналіз впливу втручань на технологічний результат і експлуатаційні показники.

Організація даних, каналів спостереження та експериментальних протоколів побудована так, щоб забезпечити відтворюваність навчання, тестування та коректне порівняння конфігурацій системи періодичного візуального контролю друку.

Основним каналом спостереження є відеопотік RGB, що реєструється з роздільною здатністю 720p або 1080p для основних експериментів, а за потреби високодетальної валідації застосовуються 1440p та 4K з частотою приблизно від двадцяти до тридцяти кадрів за секунду залежно від обчислювального навантаження. Потік кодується за допомогою H.264 із часовими мітками, прив'язаними до монотонного годинника хостової системи.

Паралельно реєструється телеметрія принтера, що включає температури сопла та столу  $T_{nozzle}$  і  $T_{bed}$ , миттєві швидкість, прискорення та ривок  $v$ ,  $a$  і  $j$ , тип ділянки за G кодом, номер шару, коефіцієнт подачі  $flow$ , стан вентилятора охолодження, параметри ретракції та сигнали з дискретних датчиків. За наявності відповідних сенсорів додатково залучаються вібраційні та акустичні канали, синхронізовані із загальною шиною повідомлень.

Синхронізація між G кодом, відео та телеметрією здійснюється службовими тегами, що вставляються у G код як коментарі виду `;LAYER:K` або `;SEGMENT:bridge`. Хостова система інтерпретує ці мітки, транслює їх як змінні *layer\_id* та *segment\_id* у шину повідомлень і прив'язує до кожного кадру відповідний контекст. Це дозволяє однозначно встановити, якому шару та якій ділянці траєкторії відповідає конкретний кадр.

Набір даних структуровано на підмножини Train, Validation, Test Lab і Test Field. Навчальний і валідаційний піднабори формуються із фрагментів друку, що містять як нормальні режими, так і контрольовано індуковані дефекти для матеріалів PLA, PETG, TPU у діапазоні висот шарів від приблизно нуля цілих дванадцяти сотих до нуля цілих двадцяти восьми сотих міліметра. Стратифікація здійснюється за матеріалом, висотою шару та геометричними патернами, такими як тонкі стінки, мости, суцільне заповнення. Для зменшення впливу дисбалансу класів підтримується приблизно збалансоване співвідношення між класами норма

та дефект на рівні близько один до одного за рахунок цілеспрямованого оверсемплінгу рідкісних дефектів і помірної аугментації.

Тестовий піднабір Test Lab призначений для контрольованих сценаріїв із відтворюваними збуреннями. Для кожного типу дефекту виконується щонайменше кілька повних прогонів одного й того самого завдання друку. Це дає змогу оцінити варіабельність показників якості виявлення та латентності контуру кадр дія за незмінних умов, а також відокремити внесок алгоритмів інференсу від стохастичних факторів процесу друку. Піднабір Test Field містить польові дані реальних завдань користувачів з широким спектром геометрій моделей, профілів друку, умов освітлення та температур навколишнього середовища. Для Test Field принципово забезпечується розділення з Train і Validation за виробами, конфігураціями профілів та датами реєстрації, що запобігає перетіканню зразків і завищенню оцінок узагальнюваності.

Онтологія класів і схема розмітки побудовані так, щоб охопити основні види дефектів FDM та FFF друку і підтримувати два режими аналізу, а саме сценарії класифікації та просторову локалізацію. Для частини класів достатньо визначити факт наявності дефекту на кадрі, інші вимагають точного позначення зони пошкодження у вигляді обмежувальної рамки або піксельної маски.

Класи відрив від платформи та spaghetti відповідають найбільш критичним сценаріям, де система має ініціювати швидке втручання та часто повну зупинку друку, тому для них пріоритетна розмітка у вигляді обмежувальних рамок з можливим уточненням до масок. Дефекти типу недоекструзія, переєкструзія та провисання потребують локалізації шва з достатньою точністю для морфометричного аналізу, тому маскова розмітка є переважною, хоча рамка допускається для початкових серій. Дефекти типу зсув шарів мають топологічний характер, оскільки зміщення захоплює значну частину моделі. Для цього класу доцільно фіксувати час події, номер шару, координати по висоті, тип траєкторії та параметри руху, а просторову локалізацію у межах кадру вважають другорядною. Узагальнювальний клас інші артефакти використовується для нетипових ситуацій і потенційного подальшого розщеплення на нові класи.

Крім класових міток, кожна анотована подія доповнюється контекстними тегами, до яких належать номер шару, тип траєкторії, локальна швидкість руху, стан вентилятора, температурні режими сопла та столу, маркер використаного профілю матеріалу. Це дає змогу пов'язувати дефекти з конкретними технологічними режимами, будувати умовні розподіли та аналізувати, за яких комбінацій параметрів ризик браку зростає.

Якість розмітки контролюється коефіцієнтом узгодженості між незалежними анотаторами. Для кожного класу формується підмножина зразків, які розмічаються щонайменше двома фахівцями. У разі розбіжностей в інтерпретації меж дефекту або самого факту його наявності випадок передається експертові арбітру, а всі зміни фіксуються у журналі розмітки, що зменшує ризик систематичних зміщень у вибірках Test Lab і Test Field.

Алгоритм формування навчальних даних для модулів контролю якості FDM друку реалізується як послідовний каскад перетворень, у межах якого сирі відео та телеметричні потоки поєднуються, синхронізуються за часом і шарами та перетворюються на стандартизовані вибірки для навчання, валідації та тестування. На першому етапі з безперервного відеопотоку вибирають кадри з фіксованим кроком дискретизації, наприклад кілька кадрів за секунду, одночасно прив'язуючи до кожного кадру контекст шару, тип траєкторії та телеметрію з прошивки. Далі ці кадри разом з телеметрією передаються до контуру розмітки, де для кожного прикладу встановлюють клас дефекту або нормального стану та за потреби формують локалізаційні маски чи обмежувальні рамки. Розмітка проходить подвійну незалежну верифікацію із подальшим узгодженням спірних випадків. Після цього до сформованих пар  $X$  та  $y$  застосовують аугментації, які не змінюють семантику дефекту, а саме коригують яскравість і контраст у вузькому діапазоні, виконують невеликі просторові перетворення, додають помірний шум, моделюють характерні відблиски. Аугментації застосовують також для балансування класів, коли окремі види дефектів трапляються значно рідше за норму.

На завершальному етапі здійснюється стратифіковане розбиття даних на навчальний, валідаційний, лабораторний тестовий та польовий тестовий піднабори

з контролем того, щоб окремі моделі, профілі друку та сесії збирання не перетиналися між підмножинами. Це гарантує чесну оцінку узагальнюваності алгоритмів і дає змогу окремо аналізувати поведінку системи в лабораторних умовах та у реальних польових сценаріях.

Протоколи індукції дефектів для Test Lab задаються окремо для кожного типу відхилення. Відрив від платформи моделюється зменшенням температури столу  $T_{bed}$  від рекомендованого значення, послабленням адгезивного шару або локальним обдувом на перших шарах. Дефекти типу spaghetti створюються свідомим порушенням параметрів ретракції чи короткочасною втратою механічного контакту нитки з попереднім шаром. Зсуви шарів індукуються контрольованими механічними імпульсами або зміненням динамічних налаштувань до межі пропуску кроків без ризику ушкодження обладнання. Недоекструзія та переекструзія відтворюються через відхилення коефіцієнта подачі  $flow$  та температури сопла від оптимальних значень, а провисання і мости за допомогою спеціальних тестових моделей із довгими прольотами без підтримок.

Час до виявлення дефекту описують різницею між моментом ін'єкції збурення та моментом спрацювання тригера. Для кожного запуску вводиться часовий показник:

$$\Delta t_{det} = t_{det} - t_d, \quad (3.76)$$

де  $\Delta t_{det}$  є оцінкою часу до виявлення дефекту,  $t_{det}$  є моментом спрацювання тригера,  $t_d$  є моментом ін'єкції збурення. Для кожного сценарію аналізується розподіл  $\Delta t_{det}$ , його медіана та дев'яносто п'ятий перцентиль.

Система зберігання даних поєднує структуроване сховище для метаданих і файлове сховище для відео, масок та знімків. Фіксуються версії прошивки принтера, профілі слайсера, контрольні суми G коду, конфігурації камер, ревізії моделей і порогові значення в полісу файлах, що забезпечує повну відтворюваність експериментів. Ротація та архівація виконуються за нічним розкладом із формуванням інкрементальних резервних копій.

Етичні та безпекові обмеження не дозволяють сценарії, які можуть спричинити перегрів або механічні ушкодження. Застосовуються апаратні

температурні межі, обов'язкова наявність аварійної зупинки, а для відеоматеріалів потенційно ідентифіковані об'єкти маскуються. Перед переходом до втручання у реальні виробничі процеси система проходить етап сухих прогонів на записаних відео із режимом лише журналювання, після чого поступово розширюються права на паузи та коригувальні дії за умови виконання критеріїв безпеки та якості.

На рисунку 3.11 узагальнено шлях даних від виходу з 3D принтера до сформованих піднаборів  $X$  та  $y$ , включно з етапами синхронізації, розмітки, аугментації та стратифікованого розбиття.

Для коректного зіставлення якості виявлення дефектів і операційних характеристик системи на платформі Raspberry Pi 5 формують набір порівнюваних конфігурацій, що охоплює базові варіанти без модулів комп'ютерного зору, прості ІІІ блоки, інтегровані каскадні підходи та абляційні схеми, запроєктовані для оцінювання внеску окремих компонентів.

Базовий варіант B0 описує режим роботи без модуля штучного інтелекту, у якому контроль якості обмежується вбудованими механізмами прошивки, такими як термозахист, кінцеві вимикачі, тайм аут нагріву. Цей варіант задає експериментальну нижню межу ефективності автоматизації. Конфігурація B1 реалізує класифікаційну модель на основі ResNet 18, що обробляє повний кадр у роздільній здатності 720p або 1080p і повертає бінарну оцінку ризику наявності дефекту. Конфігурація B2 використовує легкий детектор типу YOLO n, який обробляє повний кадр і формує координати рамок для об'єктів типу spaghetti, локальних відривів від платформи, провисань.

Запропоновані конфігурації P1, P2, P3 реалізують каскадну та контекстно чутливу обробку, оптимізовану під обмежені ресурси Raspberry Pi 5. Варіант P1 поєднує швидкий класифікатор на ResNet 18 для відсікання явно безпечних кадрів із tile сегментатором типу U Net lite для аналізу підозрілих ділянок. Конфігурація P2 застосовує ResNet 34 з ознаковою пірамідою FPN як багатомасштабний бекбон, доповнений часовим гістерезисом рішень і фільтрацією з урахуванням телеметрії, що зменшує частоту хибних спрацьовувань на складних ділянках G коду. Варіант P3 розширює P2 за рахунок багатомодального подання ознак, де RGB інформація



комбінується з параметрами процесу, а моделі виконуються у форматі INT8, що забезпечує сприятливий баланс між точністю, латентністю та енергоспоживанням.

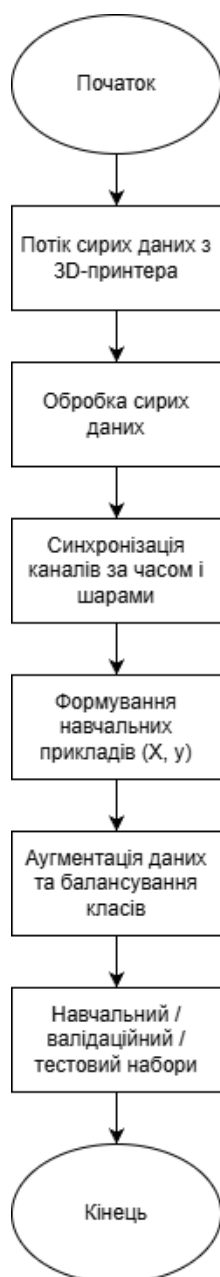


Рис. 3.11. Каскад формування навчальних, валідаційних і тестових даних для модулів контролю якості FDM друку

Абляційні конфігурації A1, A2, A3, A4, A5 побудовано на основі референтних варіантів P2 та P3, вони використовують однаковий набір даних, порогів і політик та відрізняються лише вимкненням певних компонентів. Конфігурація A1 працює без tile інференсу і дозволяє оцінити втрату чутливості до тонких ниток і вузьких мостів. Варіант A2 вимикає контурно чутливі доданки у функції втрат, завдяки

чому оцінюється значущість точного опису меж дефектів. Конфігурація A3 не застосовує часовий гістерезис, що дає змогу зафіксувати зростання хибнопозитивної частоти та частоти хибних пауз. Варіант A4 ігнорує контекст шарів і телеметрії, що демонструє важливість процесних параметрів, особливо на перших шарах і ділянках з мостами. Конфігурація A5 зменшує роздільну здатність вхідного відео й дозволяє оцінити чутливість системи до деградації вхідних даних.

У таблиці 3.4 наведено узагальнену характеристику всіх конфігурацій, що беруть участь у порівняльних експериментах, із зазначенням типу моделі, наявності каскадної обробки, використання tile або ROI, залучення телеметрії, застосування INT8 квантування та основного функціонального призначення конфігурації.

Таблиця 3.22

Узагальнена характеристика конфігурацій модулів контролю якості

Конфігурація	Тип моделі	Каскадність	Tile/ROI	Телеметрія	INT8-квантування	Основне призначення
B0	Без III	Ні	Ні	Ні	Ні	Базова безпека прошивки
B1	ResNet-18 (клас.)	Ні	Ні	Ні	Можливо	Дешевий тригер на кадр
B2	YOLO-p (детектор)	Ні	Ні	Ні	Можливо	Базова детекція великих дефектів
P1	ResNet-18 + U-Net-lite	Так	Так	Обмежено	Так	Підвищена чутливість до дрібних дефектів
P2	ResNet-34 + FPN	Так	Так	Так	Можливо	Багатомасштабний аналіз, гістерезис
P3	ResNet-34/50 + FPN	Так	Так	Так	Так	Компроміс якість/латентність/FPS/Вт
A1–A5	Абляції P2/P3	Змінно	Змінно	Змінно	Змінно	Оцінка внеску окремих компонентів

У таблиці 3.22 показано, що рівень складності системи зростає від B0 до P3. Варіант B0 моделює поведінку контуру контролю без модулів штучного інтелекту. Конфігурації B1 та B2 є простими базовими лініями для класифікації та детекції і виконують роль тригерних модулів з невеликим обчислювальним навантаженням. Лінійка P1, P2, P3 реалізує запропоновану каскадну архітектуру, у якій легка модель обробляє всі кадри, а потужніший детектор з FPN застосовується лише до вибраних областей інтересу. Абляційні конфігурації A1, A2, A3, A4, A5 дають змогу кількісно виділити внесок кожного елемента архітектури та сформулювати рекомендації щодо мінімально необхідної складності моделі для різних обчислювальних бюджетів.

Алгоритм порівняльного експерименту є спільним для всіх конфігурацій. На основі піднаборів Train і Validation виконується навчання моделей з однаковими аугментаціями, гіперпараметрами оптимізації та режимами квантування. Критерій зупинки, кількість епох і схема зміни швидкості навчання фіксуються спільними для всіх варіантів. Далі навчені моделі послідовно застосовуються до наборів Test Lab і Test Field за єдиною системою порогів політик, визначених на етапі калібрування. Для кожного завдання друку формується послідовність кадрів і рішень, на основі якої обчислюються показники якості та експлуатаційні характеристики, а також будуються бутстрапні довірчі інтервали.

### **3.27. Метрики та критерії успіху**

У цьому пункті визначено показники якості, експлуатаційної ефективності та надійності системи, а також правила їх обчислення, агрегації та оцінювання прийнятності. Метрики застосовуються окремо на множинах Test Lab і Test Field, сформованих на незмішуваних виробках і режимах друку.

Якість розпізнавання оцінюється на рівні кадру, плитки області інтересу, події та повного завдання друку. Для двокласової задачі типу норма проти дефект використовуються стандартні класифікаційні показники, а саме точність, повнота, F1 міра, істинно позитивна та хибнопозитивна частоти.

Для детекційного режиму з прямокутними рамками базовою інтегральною метрикою є середня точність, що агрегує значення для різних порогів перетину об'єднання. Узагальнену середню точність на діапазоні порогів від нуля цілих п'яти десятих до нуля цілих дев'яноста п'яти сотих визначають так:

$$mAP_{0.5:0.95} = \frac{1}{N_{IoU}} \sum_{j=1}^{N_{IoU}} AP_{IoU_j}, \quad (3.77)$$

де  $mAP_{0.5:0.95}$  є середньою точністю за множиною порогів перетину,  $N_{IoU}$  є кількістю розглянутих порогів,  $AP_{IoU_j}$  є площею під кривою залежності точності від повноти для фіксованого порога перетину.

Оскільки важливу роль відіграють дрібні об'єкти, вводиться спеціалізована метрика  $mAP_s$  для детекцій з малою площею:

$$mAP_s = \frac{1}{|S|} \sum_{k \in S} AP_k, \quad (3.78)$$

де  $mAP_s$  є середньою точністю для підмножини дрібних об'єктів,  $S$  є множиною детекцій із площею, що не перевищує задану частку площі кадру,  $AP_k$  є середньою точністю для класу або групи дрібних дефектів.

Для задач сегментації якості масок для кожного класу характеризують показники перетину та об'єднання і коефіцієнта Дайса:

$$IoU_c = \frac{|P_c \cap G_c|}{|P_c \cup G_c|}, \quad Dice_c = \frac{2|P_c \cap G_c|}{|P_c| + |G_c|}, \quad (3.79)$$

де  $IoU_c$  є відносною площею перетину прогнозованої та еталонної масок для класу  $c$ ,  $Dice_c$  є коефіцієнтом Дайса для цього класу,  $P_c$  є множиною пікселів, віднесених моделлю до класу  $c$ ,  $G_c$  є множиною пікселів еталонної розмітки для класу  $c$ .

Ключовою системною метрикою є час повного контуру кадр дія, тобто латентність:

$$t_{lat} = t_{cap} + t_{pre} + t_{inf} + t_{pol} + t_{io} + t_{mech}, \quad (3.80)$$

де  $t_{lat}$  є загальною латентністю від моменту захоплення кадру до початку механічної реакції,  $t_{cap}$  є часом захоплення кадру,  $t_{pre}$  є тривалістю попередньої обробки,  $t_{inf}$  є часом інференсу,  $t_{pol}$  є тривалістю застосування політик,  $t_{io}$  є затримкою передавання команд прошивці,  $t_{mech}$  є інтервалом від надсилання команди до фактичного гальмування та зупинки рухомих вузлів. Для цієї величини

оцінюються медіана та дев'яносто п'ятий процентиль, що характеризують типову та найгіршу поведінку.

Продуктивність та енергоефективність описуються енерговитратами на один кадр:

$$E_{frame} = \frac{P_{avg}}{FPS}, \quad (3.81)$$

де  $E_{frame}$  є середньою енергією, витраченою на обробку одного кадру,  $P_{avg}$  є середньою потужністю під час роботи модуля інференсу у стабілізованому режимі,  $FPS$  є фактичною частотою обробки кадрів.

Експлуатаційний показник частоти хибних пауз нормується на десятигодинний інтервал друку:

$$\lambda_{FP} = \frac{N_{false\_pause}}{T_{print}/10}, \quad (3.82)$$

де  $\lambda_{FP}$  є середньою кількістю хибних пауз на десять годин друку,  $N_{false\_pause}$  є кількістю хибних пауз у розглянутій вибірці,  $T_{print}$  є сумарним часом друку у годинах.

Критерії прийнятності системи формалізуються як система умов, що мають виконуватися одночасно. Для роботи в польових умовах вимагається, щоб на множині Test Field на рівні подій істинно позитивна частота не була меншою за нуль цілих дев'ять десятих, хибнопозитивна частота не перевищувала нуль цілих нуль п'ять, а середня точність  $mAP_{0.5:0.95}$  не була нижчою за нуль цілих вісім десятих. Для латентності задається обмеження на дев'яносто п'ятий процентиль квантиля  $t_{lat}$ , який не повинен перевищувати нуль цілих вісім десятих секунди у режимі роздільної здатності тисяча дев'ятсот двадцять на тисяча вісімдесят пікселів з використанням областей інтересу та tile інференсу. Технологічна доцільність системи вважається досягнутою за умови зменшення частки браку щонайменше на тридцять відсотків порівняно з базовим варіантом без модулів штучного інтелекту та досягнення частки врятованих друків не менш як нуль цілих двадцять п'ять сотих.

План експериментів ґрунтується на чотирьох послідовних етапах, а саме калібруванні, лабораторних випробуваннях, польових випробуваннях та

абляційному аналізу. Метою є побудова відтворюваного протоколу, який дозволяє послідовно перевірити працездатність системи та кількісно оцінити її вплив на реальний технологічний процес.

Підготовчий етап калібрування й базової валідації охоплює нормалізацію механічних і термічних підсистем принтера, визначення початкових граничних умов для модуля штучного інтелекту та політик рішень, а також контроль наскрізного контуру від камери до прошивки. На цьому етапі вирівнюється платформа, друкуються еталонні зразки для оцінювання геометричних похибок і їхньої компенсації, налаштовуються термічні контури сопла та платформи з перевіркою захистів від неконтрольованого росту температури. Підсистема екструзії та динаміки налаштовується через калібрування кроків подачі, лінеаризацію екструзії, ідентифікацію резонансів і конфігурацію згладжувача коливань.

Відеотракт стабілізують шляхом фіксації експозиції, балансу білого, частоти кадрів та вимірювання затримок захоплення для узгодження часового базису. На основі нормального друку й контрольовано індукованих дефектів формується навчально валідаційний набір Train та Validation. Після навчання моделей будуються криві залежності чутливості від хибнопозитивної частоти, на яких вибираються робочі пороги та параметри гістерезису для подійного рівня.

Лабораторні випробування Test Lab призначені для кількісної оцінки чутливості, специфічності та латентності у стандартизованих сценаріях з контрольованими дефектами. Елементарний запуск описують трійкою параметрів тип дефекту, матеріал, конфігурація системи, включно з базовими варіантами B0, B1, B2 та запропонованими P1, P2, P3. Для кожної комбінації вказується кількість повторів і формується множина запусків з рандомізованим порядком виконання, що знижує вплив дрейфу умов у часі. Процедури індукції дефектів стандартизуються для кожного типу відповідно до описаних вище протоколів, а для кожного запуску фіксуються метрики якості розпізнавання, профіль латентності, частота хибних пауз, частка врятованих друків, енергоспоживання та завантаження ресурсів.

Наступні етапи, а саме польові випробування, абляційний аналіз і узагальнювальні положення організації експериментального циклу, деталізуються у наступних пунктах і забезпечують перехід від технічного калібрування до оцінювання впливу системи на реальний виробничий процес.

Польові випробування призначені для перевірки роботи системи періодичного візуального контролю у реальних умовах без спеціально індукованих збурень. Мета полягає в оцінюванні того, наскільки моделі, політики та реалізація на Raspberry Pi 5 зберігають заявлені показники якості й надійності в типових виробничих сценаріях, коли параметри довкілля та режими друку змінюються неконтрольовано, а оператор діє відповідно до звичних практик. Формується набір завдань, що містить не менше кількох десятків повноцінних друків з різними виробами, матеріалами та профілями друку, характерними для цільового парку бюджетних FDM принтерів.

Польові умови передбачають природні зміни освітлення впродовж доби, різні фони та колір робочого столу, варіативність оптики, а також допустимі дії користувача, зокрема короткочасне відкривання корпусу чи локальні корекції профілю друку. Система працює у режимі активних політик втручання, коли виявлені дефекти можуть породжувати автоматизовані рекомендації щодо паузи, паркування або інших дій, які проходять через фільтр людина в контурі. Для контрольних порівнянь частину завдань виконують у режимі лише журналювання, без впливу рішень системи на процес друку.

Оцінювання якості виробів здійснюється багаторівнево. Спочатку проводиться візуальний аудит за стандартизованим переліком критеріїв, що охоплює поверхневі дефекти, геометричні відхилення, артефакти на мостах, ребрах і тонких елементах та макроскопічні провали адгезії. За потреби виконують точні вимірювання геометрії вимірювальним інструментом або засобами тривимірного сканування. Рішення системи на основі штучного інтелекту додатково верифікуються незалежною експертною розміткою подій і наслідків, зокрема для кожного втручання оцінюється, чи справді воно запобігло втраті виробу та чи не було надмірно консервативним.

Ключові показники цього етапу включають подійні значення істинно позитивної та хибнопозитивної частот, дев'яносто п'ятий процентиль латентності контуру кадр дія, кількість хибних пауз на десять годин друку, а також експлуатаційні метрики надійності, зокрема аптайм вебслужб та показники середнього часу до відмови й середнього часу відновлення. Порівняння з базовою конфігурацією без модулів штучного інтелекту дозволяє кількісно оцінити зменшення браку та перевірити, чи не призводить система до неприйнятно високої частоти хибно небезпечних втручань або деградації доступності служб.

### 3.28. Експерименти з аналізу внеску компонентів

Експерименти з аналізу внеску окремих компонентів технології спрямовані на кількісну оцінку ролі елементів архітектури моделей і функцій втрат, складових політики прийняття рішень та параметрів конфігурації вхідних даних. Підхід полягає у послідовному спрощенні повної конфігурації та порівнянні зміни метрик якості, латентності й частоти хибних пауз відносно еталонного режиму. Для кожної варіації конфігурації обчислюється різниця основних показників, наприклад зміна істинно позитивної частки визначається як:

$$\Delta TPR = TPR_{\text{full}} - TPR_{\text{var}}, \quad (3.83)$$

а зміна середньої точності за площею для дрібних дефектів описується співвідношенням:

$$\Delta mAP_s = mAP_{s,\text{full}} - mAP_{s,\text{var}}. \quad (3.84)$$

Уведення таких різницевих показників дозволяє формально порівнювати вплив окремих елементів архітектури на чутливість детектора та якість локалізації.

Експериментальні конфігурації зі структурним спрощенням будуються на тих самих макетах, режимах друку та налаштуваннях камери, що й лабораторні випробування; змінною є лише наявність або відсутність певного компонента. Для кожного варіанта накопичується достатня кількість повторів, що забезпечує високу внутрішню валідність порівнянь. Вихідні результати подаються у вигляді різниць основних метрик, таких як  $\Delta TPR$ ,  $\Delta FPR$ ,  $\Delta mAP_s$ ,  $\Delta t_{\text{lat}}$  та зміни частоти хибних пауз



відносно повної моделі. На основі цих оцінок виокремлюються компоненти, вилучення яких забезпечує прийнятний компроміс між швидкістю, ресурсними витратами та якістю, а також компоненти, спрощення яких призводить до неприйнятної втрати чутливості або зростання хибних спрацювань. Для узагальненої оцінки вводиться інтегральний показник ефективності конфігурації:

$$J = w_{\text{det}} \Delta mAP_s - w_{\text{lat}} \Delta t_{\text{lat}} - w_{\text{fp}} \Delta FPR, \quad (3.85)$$

де вагові коефіцієнти відбивають відносну важливість точності виявлення, латентності та рівня хибних спрацювань для виробничого контуру. Конфігурація вважається прийнятною за умови виконання нерівності  $J \geq J_{\min}$ , що формалізує критерій достатності для практичного впровадження.

Єдині загальні положення забезпечують коректність і відтворюваність експериментальної програми. Порядок запусків завдань рандомізується з урахуванням балансування за матеріалами, моделями та профілями друку, щоб жодна підгрупа не домінувала у даних, а також гарантується відсутність витоку даних між множинами Train, Validation, Test Lab і Test Field шляхом чіткого розмежування сесій, що використовуються для навчання, налаштування та оцінювання. Такий підхід унеможливлює переоцінку якості через приховану кореляцію між навчальними та тестовими вибірками.

Протокол експериментів містить чітко визначені критерії зупинки. Будь-який запуск негайно переривається, якщо спостерігається перевищення температурних або механічних меж, виявляється некоректна поведінка політик, наприклад циклічні втручання з високою частотою, що створюють ризик для обладнання, або фіксується втрата аптайму критичної служби. Такі випадки протоколюються, включно з журналами, телеметрією та відео, але не включаються до основного статистичного аналізу як валідні реплікації та слугують предметом окремого післяінцидентного аналізу із формуванням коригувальних дій.

Відтворюваність результатів забезпечується фіксацією версій моделей і конфігурацій, журналюванням усіх параметрів друку, обчисленням контрольних сум G-коду, збереженням відео та телеметричних даних. Перехід від лабораторних до польових випробувань допускається лише за умови виконання критеріїв щодо

істинно позитивної й хибнопозитивної частот та дев'яносто п'ятого процентиля латентності. Зменшення частки браку на множині Test Field кількісно описується відносним виграшем:

$$G_{\text{def}} = \frac{B_0 - B_1}{B_0}, \quad (3.86)$$

де  $B_0$  є часткою бракованих друків у базовому режимі без модулів штучного інтелекту, а  $B_1$  часткою браку після впровадження системи. Впровадження системи в експлуатацію вважається обґрунтованим, якщо виконується умова  $G_{\text{def}} \geq 0,3$ , тобто спостерігається зменшення частки браку не менш як на тридцять відсотків порівняно з базовим режимом.

### 3.29 Статистичний аналіз

План статистичного аналізу відповідає ієрархічній структурі даних, де одиницями спостереження є кадри, події та цілі сесії друку. Для частотних метрик, таких як істинно позитивна та хибнопозитивна частоти, частка врятованих друків і частота хибних пауз, будуються дев'яносто п'ять відсоткові довірчі інтервали. Для біноміальних пропорцій із помірними обсягами даних використовуються точні інтервали, за великих вибірок додаються наближені інтервали Вілсона.

Порівняння конфігурацій системи з базовими варіантами для пропорційних метрик здійснюється за допомогою двовибіркових тестів для часток, а результати подаються у вигляді абсолютної різниці та відношення шансів з довірчими інтервалами. Латентність контуру кадр дія зазвичай має асиметричний розподіл, тому для її порівняння застосовуються непараметричні тести, зокрема тест Вілкоксона Манна Вітні, а ефект розміри описуються різницею медіан з довірчими інтервалами.

Для інтегральних показників якості розпізнавання, таких як площі під ROC та PR кривими, використовується сучасний підхід до оцінювання відмінностей AUC, а для показника середньої точності  $mAP_{0.5:0.95}$  застосовується бутстрап за схемою, де одиницею перезапуску є вся сесія друку. З урахуванням ієрархічності даних та неоднорідності умов використовуються узагальнені змішані моделі для бінарних

подій і часових показників, де як фіксовані ефекти розглядають тип моделі, роздільну здатність, використання tile інференсу та параметри політик, а як випадкові ефекти перехоплення для принтера, матеріалу та окремого завдання друку.

Проблема множинних порівнянь розв'язується комбінованим чином, коли для основних підтверджувальних гіпотез використовується консервативна корекція, а для розвідувальних абляційних порівнянь застосовується контроль частки хибних відкриттів. Окрему увагу приділено аналізу практичної значущості, для чого використовуються тести еквівалентності та неінферіорності відносно технологічно обґрунтованих допусків.

Калібрування та надійність імовірнісних оцінок моделей оцінюються за допомогою інтегральних показників, таких як Brier score, а також графічних калібраційних діаграм. Стабільність калібрування перевіряється у різних стратах за матеріалом, умовами освітлення, номером шару та типами траєкторій. Потужність дослідження та необхідний обсяг вибірки плануються наперед для головних метрик на рівні сесій друку, що запобігає переоцінці потужності внаслідок кореляції всередині завдань.

### **3.30 Оцінювання часових, енергетичних та ресурсних характеристик комплексу на вбудованій платформі**

Методика оцінювання часових, енергетичних та ресурсних характеристик повного конвеєра «камера – попередня обробка – інференс – політика прийняття рішень – передавання команди до прошивки – механічна пауза» на платформі Raspberry Pi 5 ґрунтується на аналізі наскрізної затримки та профілів завантаження обчислювальних ресурсів для різних комбінацій програмного середовища інференсу, чисельного формату подання ваг і просторової стратегії обробки зображень. Наскрізну затримку від кадру до дії формалізують як суму складових:

$$t_{\text{lat}} = t_{\text{cap}} + t_{\text{pre}} + t_{\text{inf}} + t_{\text{pol}} + t_{\text{tx}} + t_{\text{fw}} + t_{\text{mech}}, \quad (3.87)$$

де  $t_{\text{cap}}$  – час захоплення кадру камерою,  $t_{\text{pre}}$  – час попередньої обробки та підготовки тензора,  $t_{\text{inf}}$  – час інференсу моделі,  $t_{\text{pol}}$  – час роботи модуля політики,  $t_{\text{tx}}$  – час передавання керувального сигналу до прошивки,  $t_{\text{fw}}$  – час реакції прошивки,  $t_{\text{mech}}$  – час початкової механічної реакції принтера, що включає початок паркування голови та зупинку екструзії. Така декомпозиція дає змогу окремо аналізувати вузькі місця та формувати цільові обмеження для кожної складової.

Узгодженість часових шкал забезпечують апаратними мітками експозиції на камері, монотонним годинником операційної системи хоста та лічильником подій у прошивці, який фіксує моменти обробки критично важливих команд. Для незалежної валідації узгодженості часових шкал застосовують зовнішній світловий маркер: імпульс світлодіода, керований Raspberry Pi 5, одночасно реєструється у журналі подій та потрапляє до відеокадру. На основі таких позначок визначають максимальну похибку синхронізації часових шкал:

$$\Delta t_{\text{sync}} = \max_i |t_i^{\text{vid}} - t_i^{\text{log}}|, \quad (3.88)$$

де  $t_i^{\text{vid}}$  – момент реєстрації імпульсу за даними відео, а  $t_i^{\text{log}}$  – момент його реєстрації у журналі. Виконання вимоги  $\Delta t_{\text{sync}} \ll t_{\text{lat}}$  гарантує коректність оцінювання затримки.

Паралельно з часовим аналізом виконують профілювання завантаження центрального процесора та аналіз використання оперативної пам'яті. Для кожної конфігурації будують розподіли завантаження із зазначенням медіанних значень, міжквартильних інтервалів та верхніх квантилів, що дозволяє оцінити як типовий режим роботи, так і граничні сценарії. Енергоефективність характеризують енергією, витраченою на обробку одного кадру:

$$E_{\text{frame}} = \frac{E_{\text{phase}}}{N_{\text{frame}}}, \quad (3.89)$$

де  $E_{\text{phase}}$  – сумарна енергія, спожита за досліджувану фазу роботи комплексу, а  $N_{\text{frame}}$  – кількість оброблених кадрів у цій фазі. Додатково вводять показник продуктивності на одиницю потужності:

$$\eta_{\text{FPS/W}} = \frac{\text{FPS}}{P_{\text{avg}}}, \quad (3.90)$$

де FPS— частота кадрів за секунду, а  $P_{\text{avg}}$ — середня споживана потужність. Такі співвідношення дозволяють порівнювати альтернативні конфігурації не лише за швидкодією, а й за енергоефективністю.

Порівняння програмних середовищ інференсу та чисельних форматів організовують як факторний експеримент, у межах якого змінюється тип обчислювального середовища, чисельний формат ваг (наприклад, FP16 проти INT8), а також стратегія просторової обробки (повний кадр проти обробки плитками або в межах області інтересу). Для кожної комбінації фіксують  $t_{\text{lat}}$ ,  $t_{\text{inf}}$ , значення FPS, значення  $\eta_{\text{FPS/W}}$ , піковий та середній обсяг використаної пам'яті, а також детекційні метрики TPR, FPR та  $mAP_s$ . Такий підхід дає змогу уніфіковано аналізувати компроміси між швидкодією, енергоефективністю, ресурсними витратами та якістю розпізнавання дефектів.

Конфігурацію вважають придатною для розгортання на вбудованій обчислювальній платформі, якщо виконуються цільові часові та якісні обмеження. Для сценаріїв критичних ділянок друку, до яких належать перші шари, мости та тонкі елементи, встановлюють вимоги:

$$P_{95}(t_{\text{lat}}) \leq 0,8 \text{ с}, P_{99}(t_{\text{lat}}) \leq 1,0 \text{ с}, \quad (3.91)$$

а також обмеження на хибнопозитивну частку на множині польових випробувань:

$$FPR_{\text{field}} \leq 0,05. \quad (3.92)$$

Додатково контролюють, щоб  $\eta_{\text{FPS/W}}$  не був нижчим за заданий пороговий рівень, а тривале навантаження не призводило до сталого теплового тротлінгу системи на кристалі та неконтрольованого зростання використання пам'яті за умов одночасної роботи служб керування друком і зберігання даних.

Алгоритм гістерезису подій у часі формально описує спосіб фільтрації коливань оцінки імовірності дефекту. Послідовність  $y_t$  є виходом моделі, що відповідає оцінці імовірності дефекту у момент часу  $t$ , а  $s_t$ — двійкова змінна стану,

яка дорівнює нулю за відсутності активної події та одиниці за її наявності. Вводяться два пороги  $\theta_{on}$  та  $\theta_{off}$ , причому  $\theta_{on} > \theta_{off}$ . Стан оновлюють за правилом:

$$s_t = \begin{cases} 1, & y_t \geq \theta_{on} \text{ або } (s_{t-1} = 1 \text{ та } y_t > \theta_{off}), \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (3.93)$$

Максимальний неперервний інтервал часу, на якому  $s_t = 1$ , інтерпретують як одну подію. Така схема двопорогового гістерезису, доповнена каскадною верифікацією за допомогою детектора чи сегментатора та аналізом телеметрії, зменшує кількість хибних пауз і стабілізує поведінку політик у часі.

Конфігураційний стан експерименту описують вектором:

$$\mathbf{c} = (M, \Theta, D, H, P), \quad (3.94)$$

де  $M$  позначає архітектуру моделі,  $\Theta$  – набір параметрів (ваг) моделі,  $D$  – структуру вибірок Train, Validation, Test Lab і Test Field,  $H$  – апаратне та програмне оточення,  $P$  – профіль друку і параметри знімання.

Запуск вважають відтвореним, якщо виконується умова:

$$\delta \leq \delta_{\max}, \quad (3.95)$$

де  $\delta_{\max}$  – наперед встановлена допустима межа. Для уникнення змішування різнорідних за розмірністю складових доцільно або нормувати компоненти  $\Delta t_{lat}$  та  $\Delta \text{метрик}$  на їхні допустимі межі, або визначати вагові коефіцієнти, узгоджені з критеріями приймання.

Уніфіковане подання експериментальних результатів є необхідною умовою зіставності конфігурацій комплексу та коректного статистичного аналізу. Над кожною узагальнювальною таблицею зазначають повний набір умов проведення серії дослідів, до якого входять тип і діаметр сопла, матеріал, температури сопла та стола, лінійні швидкості й прискорення друку, роздільна здатність вхідного відео, середовище інференсу, режим квантування моделі, тип принтера й прошивки, ідентифікатор версії моделі штучного інтелекту. Кількісні метрики задають як середні значення та 95-відсоткові довірчі інтервали, які для оцінки з вибірковою дисперсією  $\hat{\sigma}^2$  та обсягом вибірки  $n$  мають вигляд:

$$\hat{\mu} \pm 1,96 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (3.96)$$

Латентності описують медіаною та 5-м і 95-м процентилями. У поєднанні з формалізованим описом конфігураційного вектора та критеріїв відтворюваності це забезпечує внутрішню узгодженість експериментів і можливість незалежного підтвердження отриманих результатів на інших інсталяціях комплексу.

Таблиця 3.23

Якість виявлення дефектів на множині Test Field

Метрика	M1	M2	M3	M4	M5
TPR	0,92 ± 0,02	0,90 ± 0,02	0,94 ± 0,01	0,84 ± 0,03	0,77 ± 0,04
FPR	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,08 ± 0,02	0,12 ± 0,03
mAP(0,5–0,95)	0,58 ± 0,03	0,53 ± 0,03	0,61 ± 0,02	0,46 ± 0,04	—
mAP_s	0,41 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,45 ± 0,03	0,28 ± 0,04	—
IoU/Dice	—	0,53 / 0,69	—	—	—
Латентність, с (мед. [P5–P95])	0,62 [0,48–0,78]	0,68 [0,52–0,86]	0,74 [0,56–0,96]	0,57 [0,44–0,76]	0,49 [0,39–0,65]
Хибні паузи / 10 год	0,7	0,9	0,8	2,1	3,5

Для подання якості виявлення дефектів у польових умовах застосовано узгоджений табличний формат, який забезпечує єдине представлення конфігурацій моделей та ключових показників точності й експлуатаційної придатності. У таблиці 3.23 наведено результати для множини Test Field у вигляді матриці «метрика → конфігурація моделі», де оцінюються істинно позитивна частота (TPR) та хибнопозитивна частота (FPR) на рівні подій, а також якість детекції за показниками mAP(0,5–0,95) і mAP\_s. Для конфігурацій, що підтримують сегментацію, додатково наведено IoU та Dice; якщо сегментація відсутня, відповідне поле позначається символом «—». Для оцінювання придатності до роботи в реальному часі подано латентність контуру “кадр → дія” у форматі

медіани з інтервалом [P5–P95], а також частоту хибних пауз за 10 год друку як індикатор небажаних втручань..

Позначення моделей у таблиці 3.23:

- M1 – ResNet-34→FPN P2 INT8 (1080p; tile 512×512)
- M2 – ResNet-18→U-Net-lite P1 INT8 (1080p; tile 384×384)
- M3 – ResNet-50→FPN P3 FP16 (1080p; tile 512×512)
- M4 – YOLO-n B2 FP16 (1080p; повний кадр)
- M5 – ResNet-18 cls B1 INT8 (1080p; повний кадр)

Аналіз таблиці 3.23 підтверджує компроміс між точністю виявлення та експлуатаційною “ціною” втручань. Зокрема, конфігурації M1–M3 демонструють вищі значення TPR і нижчі FPR порівняно з M4–M5, що узгоджується з використанням більш виразних ознак і каскадних/пірамідальних представлень (FPN). Найкраще співвідношення детекційних метрик серед варіантів із mAP забезпечує M3, тоді як M4 і особливо M5 мають підвищену частоту хибних пауз (2,1 та 3,5 на 10 год), що робить їх менш придатними для тривалої автономної експлуатації. При цьому латентність у діапазоні 0,49–0,74 с (медіана) демонструє, що всі конфігурації укладаються у вимоги роботи в режимі близькому до реального часу, однак підвищення точності в M3 супроводжується зростанням латентності порівняно з легшими моделями.

Для узагальнення впливу різних конфігурацій візуального контролю на виробничий процес застосовано таблицю виробничих показників, у якій для варіантів B0, B1, B2, P1, P2, P3 подано частку браку, кількість “врятованих” друків та зміну середнього часу друку. Такий формат дозволяє перейти від локальних метрик комп’ютерного зору (TPR/FPR/mAP) до інтегральних показників технологічної ефективності, що є безпосередньо інтерпретованими для експлуатації та економічного обґрунтування.

Зіставлення даних таблиці 3.24 показує, що перехід від базового режиму B0 до конфігурацій із вбудованим аналізом зображень B1–P3 забезпечує систематичне зменшення частки браку та зростання кількості врятованих завдань. Найбільший ефект досягається у варіантах P2–P3, однак він супроводжується помірним



збільшенням середнього часу друку, що пояснюється додатковими обчисленнями для верифікації та формування керувальних дій.

Таблиця 3.24

Порівняння виробничих показників для конфігурацій B0, B1, B2, P1, P2, P3

Варіант	% браку ↓	«Врятовані» друки ↑	Середній час друку, Δ відсотків	Коментар
B0	9,8 ± 1,2	0 / 160	0,0	Базовий рівень прошивки без модулів штучного інтелекту; спрацьовують тільки термозахист і кінцеві вимикачі.
B1	8,3 ± 1,1	7 / 160	+0,2	Простий класифікатор на повному кадрі; зменшує брак, але не охоплює локальні дефекти.
B2	7,4 ± 1,0	14 / 160	+0,4	Детектор YOLO-n для великих дефектів; покращує виявлення відривів і масивних аномалій.
P1	6,2 ± 0,9	23 / 160	+0,8	Каскадна схема ResNet-18 та U-Net-lite; невелике подовження часу через верифікацію локальних ділянок.
P2	5,9 ± 0,8	29 / 160	+1,1	ResNet-34 з FPN; підвищена чутливість на мостах і тонких ребрах за помірного зростання часу друку.
P3	5,4 ± 0,7	31 / 160	+1,6	ResNet-50 з FPN і телеметрією; найкраще виявлення сценаріїв типу spaghetti та відривів, ціною додаткового навантаження і збільшення тривалості друку.

Таким чином, таблиці 3.23–3.24 у сукупності відображають логіку переходу від точнісних метрик комп'ютерного зору до виробничих показників: конфігурації

з нижчим FPR і вищим mAP, як правило, забезпечують менший брак та більшу частку “врятованих” друків за прийнятної експлуатаційної ціни у вигляді збільшення часу виконання завдання.

### **3.31. Наукові результати та їх практичне значення**

У роботі отримано сукупність взаємопов’язаних наукових результатів, спрямованих на підвищення якості та безпечності FDM/FFF-друку шляхом побудови замкненого інтелектуального контуру «спостереження → оцінка ризику → верифікація → керувальна дія → новий стан». Перший результат формує каскадну модель інтелектуального наглядного контролю з мультимодальним злиттям даних і двоетапною перевіркою аномалій; другий результат розвиває метод автоматизованого керування, у якому керувальна дія визначається політикою втручання на основі прогнозованого ризику; третій результат деталізує адаптивну модель вибору режимів втручання, що враховує згладжування ризику, стійкість небезпечного стану та обмеження на частоту жорстких зупинок.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості впровадження інтелектуального моніторингу й керування у промислових та навчально-лабораторних умовах: забезпечується точніша діагностика стану обладнання і своєчасне виявлення потенційної дефектності; досягається адаптивна корекція параметрів друку в реальному часі з метою зменшення частки браку та підвищення відтворюваності; реалізується оперативна локалізація джерел появи технологічних аномалій завдяки мультисенсорній інтеграції візуальних, температурних, координатних і телеметричних показників.

#### **Перший науковий результат. Удосконалена модель інтелектуального наглядного контролю FDM-друку**

Запропонована модель інтелектуального наглядного контролю процесу FDM-друку є каскадною мультимодальною системою аналізу технологічного

процесу, що одночасно використовує відеоканал, телеметрію приводів, температурні вимірювання та сигнали керування (параметри процесу) і застосовує глибоку згорткову нейронну мережу типу ResNet як ядро виділення ознак з візуальної інформації.

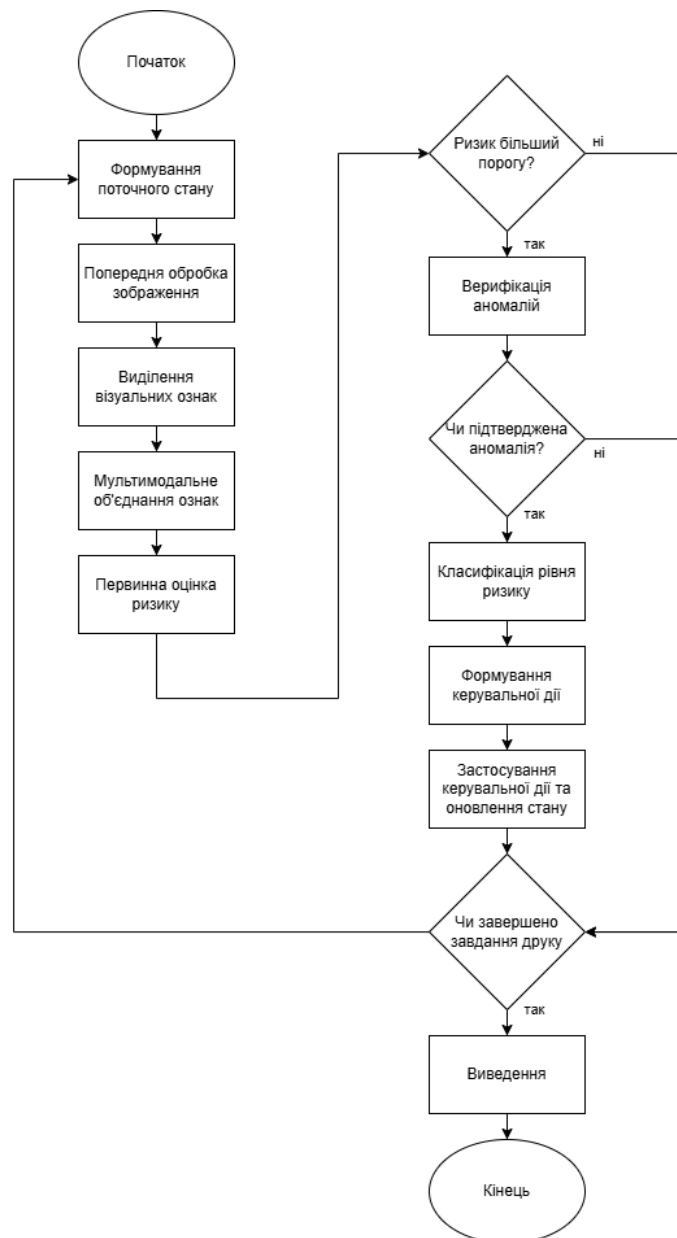


Рис. 3.12. Блок-схема каскадного інтелектуального наглядового контуру FDM/FFF-друку

Принциповою відмінністю моделі є каскад «тригер → верифікація → дія»: на першому етапі виконується швидка індикація потенційної аномалії компактною архітектурою (тригер), на другому етапі здійснюється уточнення/підтвердження (верифікація) для зменшення хибних спрацювань, на третьому етапі формується

керувальна дія відповідно до політики втручання з урахуванням ризику та контексту процесу. Модель є замкненою: сформована дія змінює технологічний стан, що відразу відображається у нових вимірюваннях та коригує подальші рішення, на відміну від традиційного постфактум-контролю після завершення друку.

Вектор поточного стану процесу 3D-друку у дискретний момент часу  $t$  задається як:

$$s_t = \{I_t, v_t, q_t\}, \quad (3.97)$$

де  $s_t$  – вектор стану процесу 3D-друку в момент часу  $t$ ;  $I_t$  – вхідний відеокадр або область інтересу (ROI), що відображає контур шару та можливі видимі дефекти;  $v_t$  – вектор телеметричних параметрів (подача матеріалу, швидкість екструзії, положення та прискорення осей, температури сопла та стола, швидкість вентилятора);  $q_t$  – параметри конфігурації друку (властивості матеріалу, профіль друку, обмеження траєкторій, стратегії екструзії).

Оператор попередньої цифрової обробки відеоданих визначається так:

$$x_t = C(I_t), \quad (3.98)$$

де  $x_t$  – результат попередньої обробки (маскування, нормалізація, виділення шару/ROI, зменшення шуму);  $C(\cdot)$  – оператор попередньої обробки (crop/resize/ROI/denoising).

Виділення ознак глибинною моделлю (ResNet/CNN) задається співвідношенням:

$$f_t = M_W(x_t), \quad (3.99)$$

де  $f_t$  – латентний вектор ознак;  $M_W(\cdot)$  – глибинна модель з параметрами  $W$ ;  $W$  – набір вагових коефіцієнтів, що налаштовуються у процесі навчання.

Мультимодальне злиття візуальних ознак і телеметрії задається як:

$$o_t = \Psi(f_t, v_t), \quad (3.100)$$

де  $o_t$  – мультимодальне подання стану;  $\Psi(\cdot)$  – оператор інтеграції (конкатенація, механізм уваги, зважене злиття або інша схема fusion).

Первинна оцінка ризику технологічної аномалії (каскадний тригер) задається так:

$$r_t = R(o_t), \quad r_t \in [0,1], \quad (3.101)$$

де  $r_t$  – первинний показник ризику (ймовірність/інтенсивність дефектного режиму);  $R(\cdot)$  – оператор оцінювання ризику (risk-score predictor).

Умова спрацювання тригера визначається порогом:

$$r_t > \tau_r \Rightarrow \text{trigger} \quad (3.102)$$

де  $\tau_r$  – порогове значення, що визначає мінімальний рівень первинної підозри на аномалію.

Таблиця 3.25

## Порівняння підходів контролю 3D-друку

Критерій	Ручний	Постфакту м	Сенсорний (лок.)	Запропонована модель (ML+інтегр.)
Час виявлення	Після друку	Після друку / втрата часу	Після критичних відхилень	У реальному часі
Дані	Візуальн о	Історія друку	Обмежена телеметрія	Відео+телеметрія+параметри
Автоматичність	Ні	Частк.	Так	Повна (моніторинг+втручання)
Реакція	Перепечат	Перезапуск	Попередження	Пауза/корекція/стоп
Запобігання браку	Низьке	Низьке	Середнє	Високе (тригер–вериф.–дія)
Використання ML	Ні	Ні	Частк.	ResNet+risk+policy
Інтеграція даних	Немає	Ретроспект.	Лок. датчики	Мультимодальна + прогноз
Економічні втрати	Високі	Високі	Середні	Нижчі (матеріал/час/енергія)
Реальний час	Ні	Ні	Частк.	Так, цикл $s(t) \rightarrow u(t)$
Принцип	Реакція «після»	Після факту	Реакція на подію	Прогноз+превентивність
Інтелектуальність	Низька	Низька	Середня	Висока (ML+каскад+звор. зв'язок)

Другий етап каскаду (верифікація) задається уточнювальним оцінювачем:

$$\hat{r}_t = V(o_t) \quad (3.103)$$

де  $\hat{r}_t$  – уточнена (верифікована) оцінка ризику;  $V(\cdot)$  – оператор вторинної перевірки (додаткова модель, локальний аналіз ROI тощо).

Остаточне підтвердження аномалії визначається так:

$$\hat{r}_t > \tau_v \Rightarrow \text{verification}, \quad \tau_v \geq \tau_r \quad (3.104)$$

де  $\tau_v$  – поріг верифікації (строгіший за поріг тригера).

Формування керувальної дії задається політикою втручання:

$$u_t = \pi(\hat{r}_t, s_t), \quad (3.105)$$

де  $u_t$  – керувальна дія (пауза, аварійна зупинка, корекція швидкості, вентилятора, температури, feedrate, extrusion-flow тощо);  $\pi(\cdot)$  – політика керування, що відображає ризик і контекст стану у конкретний вплив.

Перехід процесу в новий стан з урахуванням втручання описується рівнянням:

$$s_{t+1} = F(s_t, u_t, D_t), \quad (3.106)$$

де  $F(\cdot)$  – оператор переходу (state transition function);  $D_t$  – зовнішні або внутрішні збурення (температурний дрейф, вібрації, зміна властивостей матеріалу, люфти тощо).

Таким чином, запропонована система є каскадним інтелектуальним наглядним контуром, який у режимі реального часу перетворює мультимодальні спостереження у оцінку ризику, виконує її верифікацію та формує дію, що замкнено коригує поведінку процесу друку залежно від машинно-навченої оцінки технологічних відхилень.

### **Другий науковий результат. Метод інтелектуального автоматизованого керування процесом 3D-друку**

Запропонований метод інтелектуального автоматизованого керування процесом 3D-друку ґрунтується на поєднанні прогнозової оцінки ймовірності технологічних відхилень, їх каскадної верифікації та формування адаптивної керувальної дії у реальному часі. На відміну від традиційних схем, де рішення часто

зводиться до порогової реакції за окремими параметрами або до зупинки після прояву дефекту, запропонований підхід реалізує перехід від реактивного керування до превентивного впливу: дія визначається політикою втручання залежно від величини ризику та його динаміки, що дає змогу зменшити частку відбракованих виробів, скоротити тривалість виготовлення і підвищити технологічну відтворюваність.

Таблиця 3.26

порівняльного аналізу методів керування

Метод / підхід	Контроль	Втручання	Рішення	ML	Адаптація	Переваги	Недоліки
Ручне втручання	Розривний	Після дефекту	Візуально	Ні	Низька	Простота	Запізніле виявлення
PID-регулювання	Реактивний	За відхиленням	Пороги	Ні	Низька	Автоматизація	Не бачить дефекти
Постфактум аналіз	Після друку	Немає	—	Частк.	—	Виявлення	Втрати часу/матеріалу
Локальні сенсори	Реактивний	Після аномалії	Лок. поріг	Частк.	Середня	Менші втрати	Багато хибних тривог
Візуальна аналітика	Моніторинг	Після виявлення	Класифікація	Так	—	Глибокий аналіз	Немає дії
Запропонований метод	Інтелектуальний	Превентивно	Risk→Verif→Policy	Так (2)	Висока	Адаптація, менше браку	Потрібне навчання

Кусочно-визначена політика втручання за рівнями ризику задається так:

$$u_t = \begin{cases} \pi_{\log}(s_t), & \hat{r}_t \leq \tau_{\text{soft}}, \\ \pi_{\text{soft}}(s_t), & \tau_{\text{soft}} < \hat{r}_t \leq \tau_{\text{hard}}, \\ \pi_{\text{hard}}(s_t), & \hat{r}_t > \tau_{\text{hard}}. \end{cases} \quad (3.107)$$

де  $\tau_{\text{soft}}$  і  $\tau_{\text{hard}}$  – пороги для м'якого та жорсткого втручання;  $\pi_{\log}(\cdot)$  відповідає журналюванню та (за потреби) попередженню без зміни режимів;  $\pi_{\text{soft}}(\cdot)$  відповідає діям типу паузи, зменшення швидкостей, корекції температури чи подачі;  $\pi_{\text{hard}}(\cdot)$  відповідає аварійній зупинці та відключенню нагрівачів.

Рівняння переходу процесу при керуванні задається так:

$$s_{t+1} = F(s_t, u_t, D_t) \quad (3.108)$$

де  $F(\cdot)$  описує динаміку з урахуванням виконаної дії;  $D_t$  моделює збурення, що впливають на процес.

Функціонал очікуваних втрат на горизонті планування  $T$  задається як:

$$J(\pi) = \mathbb{E}[\sum_{t=0}^T C_{\text{fail}}(s_t, \pi(\hat{r}_t, s_t))] \quad (3.109)$$

де  $C_{\text{fail}}(s_t, u_t)$  – вартість (збиток), пов'язана з переходом у дефектний стан або з небажаними простоями при застосуванні дії  $u_t$ .

Оптимальна політика визначається як:

$$\pi^* = \underset{\pi}{\operatorname{argmin}} \mathbb{E}[\sum_{t=0}^T C_{\text{full}}(s_t, \pi(\hat{r}_t, s_t))] \quad (3.110)$$

де  $C_{\text{full}}(\cdot)$  – узагальнений функціонал витрат, що може включати матеріал, час, енергію, ресурс вузлів і ризику аварійної ситуації.

### **Третій науковий результат. Модель адаптивного вибору керувальних рішень у процесі 3D-друку**

Третій науковий результат полягає у побудові інтелектуальної моделі адаптивного вибору керувальних рішень, яка формує дію не за наперед заданими порогоми окремих параметрів, а на основі динамічної оцінки ризику та прогнозної поведінки технологічного процесу. Модель формалізує прийняття рішень як відображення між простором оціненого ризику, поточним технологічним станом і множиною допустимих керувальних впливів, а сам вибір інтерпретує як оптимізацію очікуваних втрат, пов'язаних із браком або аварійною зупинкою. На



відміну від підходів «зупинити/не зупиняти», запропонована модель підтримує багаторівневий вибір між журналюванням, попереджувальним впливом, м'якою корекцією режимів або повним припиненням процесу, враховуючи довірчість ML-оцінки, динаміку ризику і стадію формування шару.

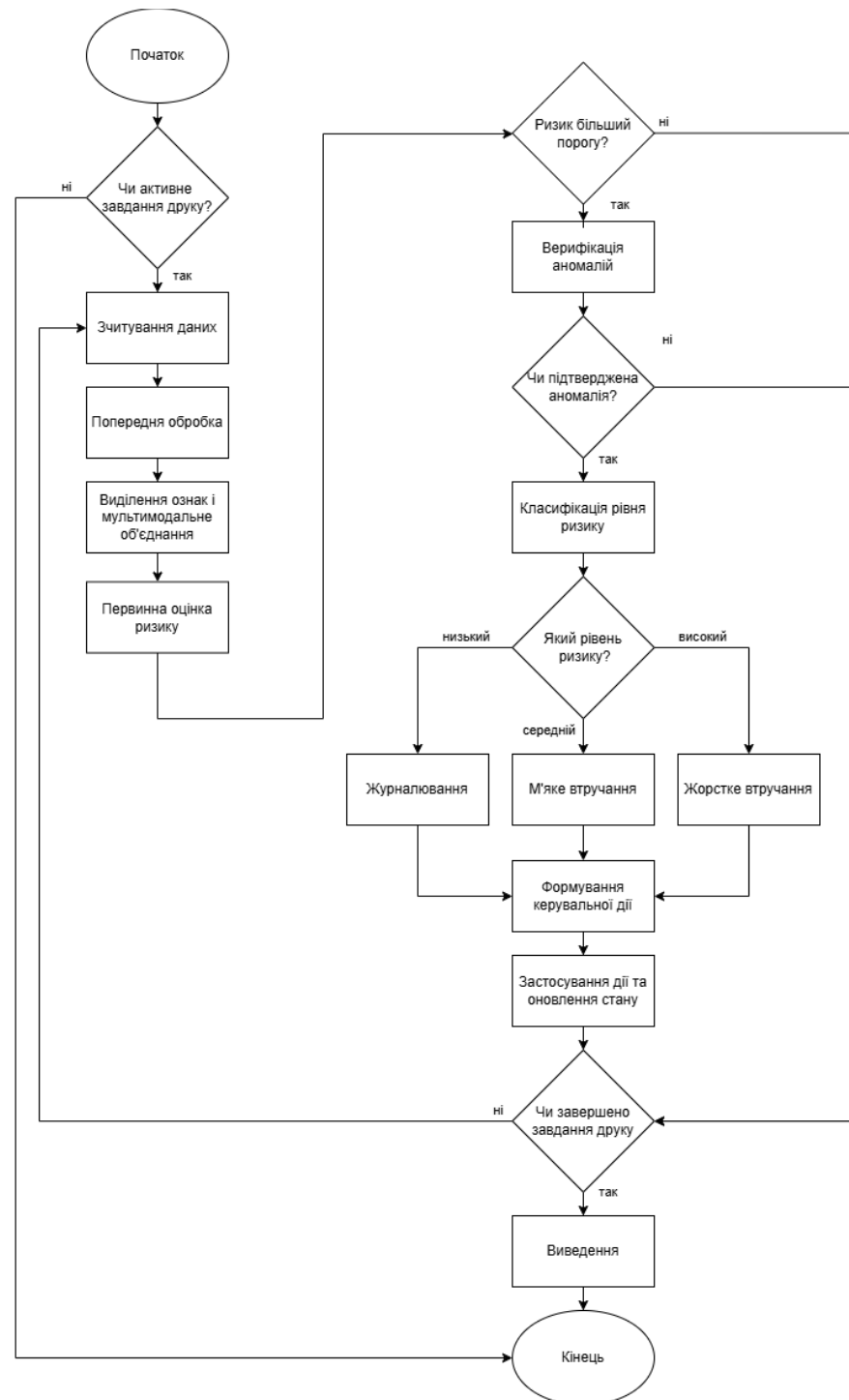


Рис. 3.13. Узагальнена блок-схема адаптивної політики втручання у процесі 3D-друку за рівнем ризику

Технологічний стан у дискретний момент часу задається як:

$$s_t = \{I_t, v_t, q_t\} \quad (3.111)$$

де  $I_t$  – відеокадр (або ROI) поточного шару;  $v_t$  – телеметрія процесу (температури, швидкості, положення, подача, обдуб);  $q_t$  – параметри завдання (матеріал, профіль, ліміти прискорень).

Мультимодальне подання стану задається як:

$$o_t = \Psi(f_t, v_t), \quad f_t = M_W(C(I_t)) \quad (3.112)$$

де  $C(\cdot)$  – оператор попередньої обробки;  $M_W(\cdot)$  – глибинна модель виділення ознак;  $\Psi(\cdot)$  – оператор злиття (fusion).

Первинна оцінка ризику задається як:

$$r_t = R(o_t), \quad r_t \in [0,1] \quad (3.113)$$

де  $R(\cdot)$  – оцінювач ризику (risk-score predictor), що формує ймовірність/інтенсивність дефектного режиму.

Каскадна перевірка ризику задається як:

$$\hat{r}_t = V(o_t) \quad (3.114)$$

де  $V(\cdot)$  – верифікаційний оцінювач другого рівня;  $\hat{r}_t$  – уточнена оцінка ризику.

Керувальна дія визначається політикою:

$$u_t = \pi(\hat{r}_t, s_t) \quad (3.115)$$

де  $\pi(\cdot)$  відображає стан та оцінку ризику у керувальний вплив.

Кусочно-визначений вибір дій за інтервалами ризику задається як:

$$u_t = \begin{cases} \pi_{\log}(s_t), & 0 \leq \hat{r}_t \leq \tau_{\text{soft}}, \\ \pi_{\text{soft}}(s_t), & \tau_{\text{soft}} < \hat{r}_t \leq \tau_{\text{hard}}, \\ \pi_{\text{hard}}(s_t), & \tau_{\text{hard}} < \hat{r}_t \leq 1. \end{cases} \quad (3.116)$$

де  $\tau_{\text{soft}}, \tau_{\text{hard}}$  – пороги рівнів втручання;  $\pi_{\log}, \pi_{\text{soft}}, \pi_{\text{hard}}$  – відповідні режими керування.

Оптимізаційне формулювання вибору політики задається як:

$$\pi^* = \underset{\pi}{\operatorname{argmin}} \mathbb{E}[\sum_{t=0}^T C_{\text{fail}}(s_t, \pi(\hat{r}_t, s_t))] \quad (3.117)$$

де  $C_{\text{fail}}(\cdot)$  – вартість переходу в дефектний стан або пов'язаних втрат (матеріал, простій, час).

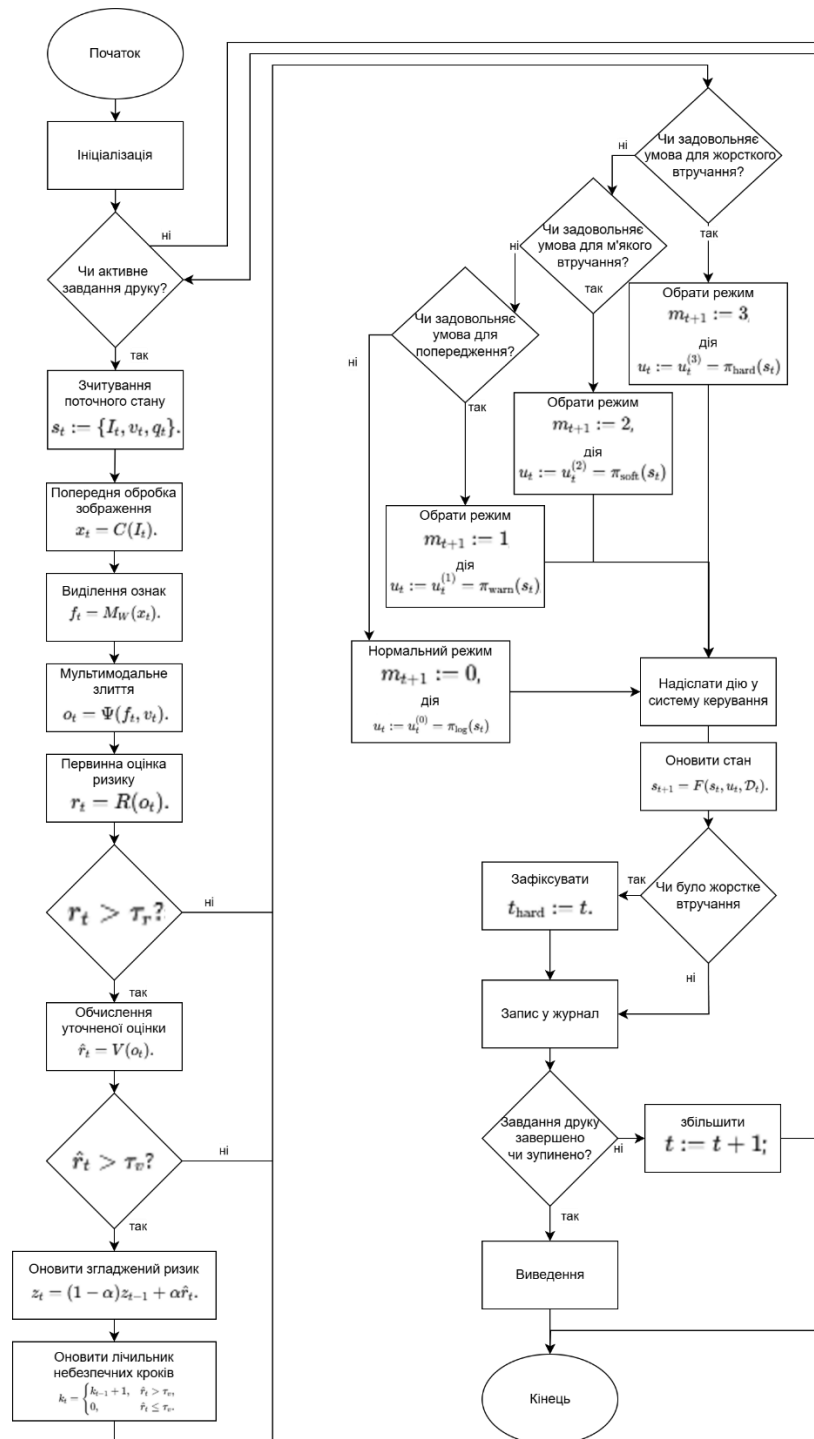


Рис. 3.14. Узагальнена блок-схема адаптивної політики втручання у процесі 3D-друку за рівнем ризику

Динаміка системи у замкненому циклі задається як:

$$s_{t+1} = F(s_t, \pi(\hat{r}_t, s_t), D_t) \quad (3.118)$$

де  $F(\cdot)$  – оператор переходу до нового стану;  $D_t$  – випадкові або системні збурення технологічного процесу.

Експоненціальне згладжування уточненої оцінки ризику задається як:

$$z_t = (1 - \alpha)z_{t-1} + \alpha\hat{r}_t, \quad \alpha \in (0,1), \quad (3.119)$$

де  $z_t$  – згладжена оцінка ризику;  $\alpha$  – параметр згладжування.

Лічильник послідовних кроків з підтвердженням підвищенням ризиком задається як:

$$k_t = \begin{cases} k_{t-1} + 1, & \hat{r}_t > \tau_v, \\ 0, & \hat{r}_t \leq \tau_v. \end{cases} \quad (3.120)$$

де  $k_t$  – кількість послідовних кроків із перевищенням порога верифікації  $\tau_v$ .

Узгодження порогів каскаду та політики задається як:

$$0 \leq \tau_r \leq \tau_v \leq \tau_{\text{soft}} \leq \tau_{\text{hard}} \leq 1 \quad (3.121)$$

де  $\tau_r$  – поріг тригера;  $\tau_v$  – поріг верифікації;  $\tau_{\text{soft}}, \tau_{\text{hard}}$  – пороги рівнів втручання.

Каскадна логіка обчислення уточненого ризику з урахуванням тригера задається як:

$$\hat{r}_t = \begin{cases} 0, & R(\Psi(M_W(C(I_t)), v_t)) \leq \tau_r, \\ V(\Psi(M_W(C(I_t)), v_t)), & R(\Psi(M_W(C(I_t)), v_t)) > \tau_r. \end{cases} \quad (3.122)$$

, де перша гілка відповідає відсутності підозри (верифікація не запускається), а друга – запуску уточнювальної перевірки після спрацювання тригера.

Узагальнене подання адаптивної політики з урахуванням миттєвого ризику, згладженого ризику, стійкості та режиму керування задається як:

$$u_t = \pi(\hat{r}_t, z_t, k_t, m_t, s_t) \quad (3.123)$$

де  $m_t \in \{0,1,2,3\}$  – поточний режим керування.

Одна з можливих форм вибору гілок за умовами задається як:

$$u_t = \begin{cases} u_t^{(0)}, & \hat{r}_t \leq \tau_v \wedge z_t \leq \tau_{\text{soft}} \wedge m_t = 0, \\ u_t^{(1)}, & \tau_v < \hat{r}_t \leq \tau_{\text{soft}} \vee (z_t > \tau_{\text{soft}} \wedge k_t \geq K_1), \\ u_t^{(2)}, & \tau_{\text{soft}} < \hat{r}_t \leq \tau_{\text{hard}} \vee (z_t > \tau_{\text{hard}} \wedge k_t \geq K_2), \\ u_t^{(3)}, & \hat{r}_t > \tau_{\text{hard}} \vee (z_t > \tau_{\text{hard}} \wedge k_t \geq K_3), \end{cases} \quad (3.124)$$

де  $u_t^{(0)} = \pi_{\log}(s_t)$  відповідає журналюванню та можливому попередженню;  $u_t^{(1)} = \pi_{\text{warn}}(s_t)$  – попереджувальному впливу;  $u_t^{(2)} = \pi_{\text{soft}}(s_t)$  – м'якому втручанню;  $u_t^{(3)} = \pi_{\text{hard}}(s_t)$  – жорсткому втручанню;  $K_1, K_2, K_3$  – пороги стійкості (число послідовних кроків підвищеного ризику для переходів між рівнями).

Обмеження на надто часті жорсткі втручання задається як:

$$(t - t_{\text{hard}}) \geq \Delta t_{\text{hard}} \quad (3.125)$$

де  $t_{\text{hard}}$  – момент останнього застосування жорсткого втручання;  $\Delta t_{\text{hard}}$  – мінімально допустимий інтервал між жорсткими втручаннями.

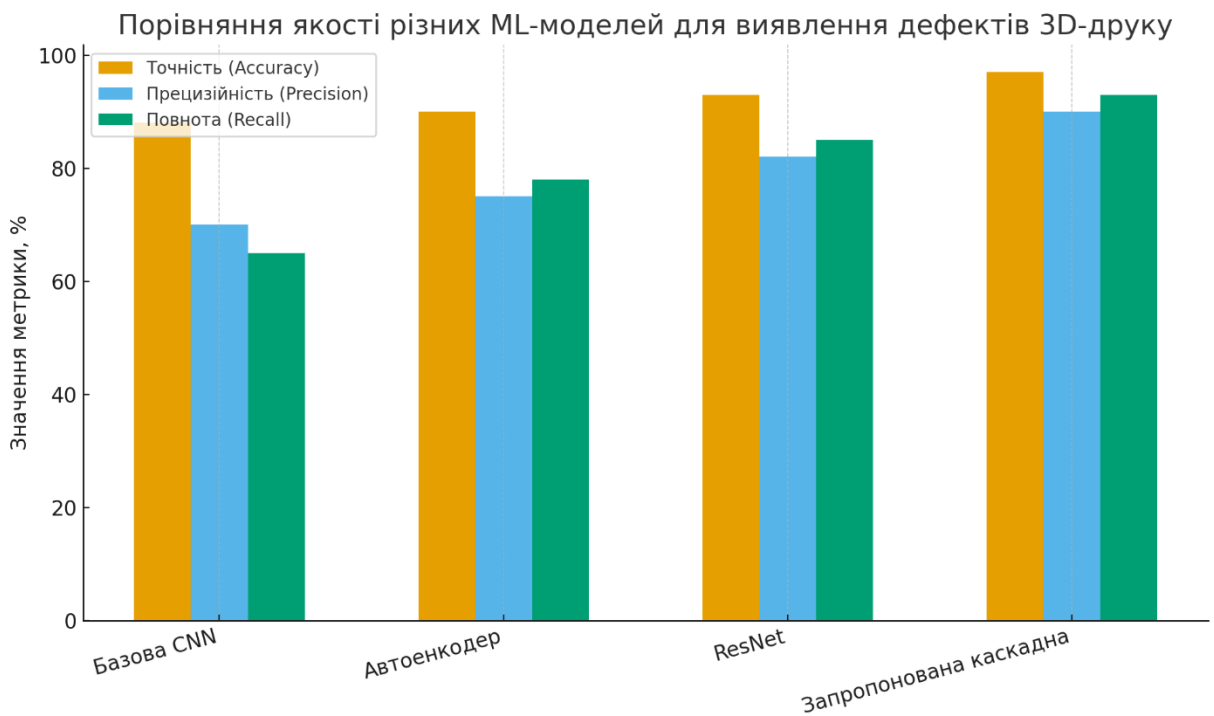


Рис. 3.15. Порівняння якості різних ML-моделей для виявлення дефектів 3D-друку

Композиційне подання замкненого циклу адаптивного керування задається як:

$$s_{t+1} = F(s_t, \pi(\hat{r}_t, z_t, k_t, m_t, s_t), D_t) \quad (3.126)$$

де перехід у новий стан визначається динамікою процесу та обраною адаптивною дією.

Для підтвердження працездатності каскадного інтелектуального контуру наглядного контролю (НР1) та адаптивної політики втручання виконано розрахункове оцінювання показників якості виявлення дефектів, частоти хибних спрацювань, характеру зміни ризику у часі та очікуваного економічного ефекту.

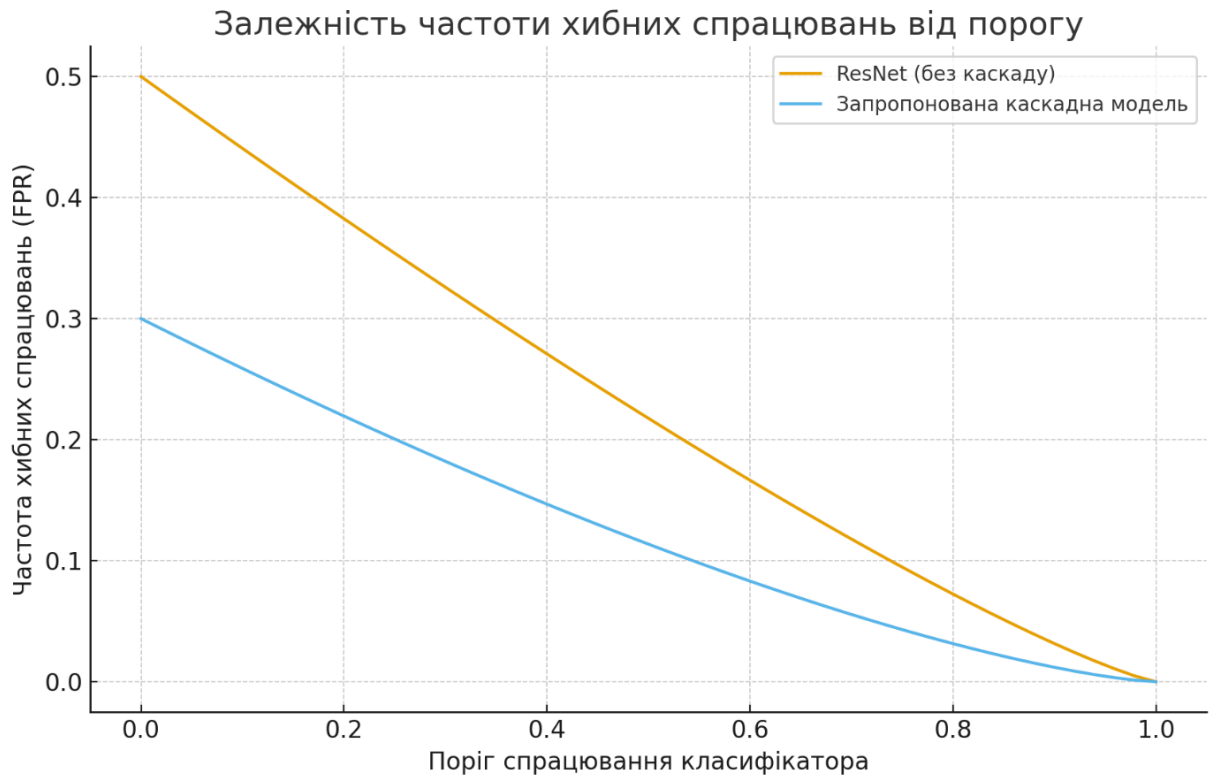


Рис. 3.15. Залежність частоти хибних спрацювань (FPR) від порога спрацювання класифікатора

Насамперед порівняно якість моделей машинного навчання для задачі виявлення дефектів 3D-друку, зокрема базової згорткової моделі, автоенкодера, ResNet та запропонованої каскадної схеми. Показано, що перехід до більш виразних архітектур підвищує точність, прецизійність та повноту, а застосування каскаду забезпечує додаткове поліпшення метрик за рахунок другого етапу верифікації, що узгоджується з логікою НР1 щодо зниження хибних тривог.



Рис. 3.16. Робота запропонованого методу: ризик та його згладження

Зменшення хибних спрацювань є ключовим для промислового застосування, оскільки безпідставні паузи або зупинки призводять до прямих втрат часу й ресурсів.



Рис. 3.17. Динаміка оцінки ризику та пороги втручання у процесі 3D-друку

Залежність частоти хибних спрацювань від порога спрацювання класифікатора для ResNet без каскаду та для запропонованої каскадної моделі демонструє, що каскадна схема забезпечує нижчий рівень FPR практично на всьому діапазоні порогів, тобто розділення процесу на етапи «швидкий тригер → уточнення/верифікація» є доцільним для реалізацій реального часу.

Для інтерпретації роботи адаптивної політики втручання (HP3) показано часову динаміку миттєвої оцінки ризику  $r_t$ , згладженого ризику  $z_t$  та порогів  $\tau_r$ ,  $\tau_{\text{soft}}$ ,  $\tau_{\text{hard}}$ . Наведені залежності демонструють, що згладжування зменшує вплив одиничних флуктуацій, формує більш стійкий керівний сигнал та підтримує коректний перехід між рівнями втручання.

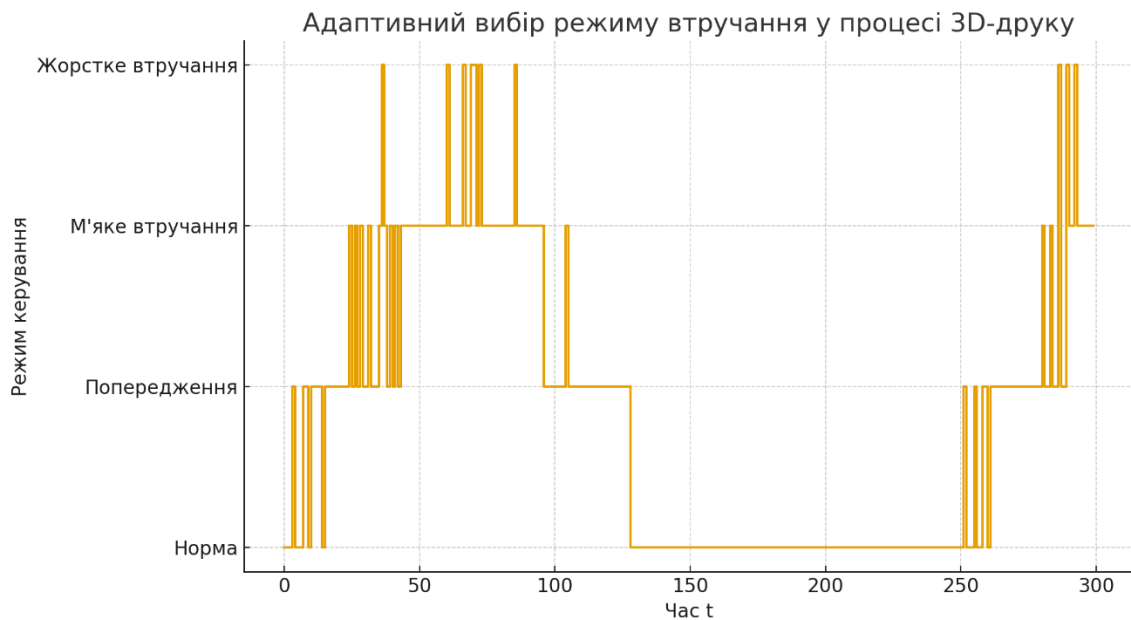


Рис. 3.18. Адаптивний вибір режиму втручання у процесі 3D-друку

Додатково наведено приклад часової динаміки оцінки ризику та розміщення порогових рівнів, що визначають умови переходу між режимами втручання у процесі 3D-друку. Візуалізація порогів і ризику у часі підкреслює принцип HP2–HP3, згідно з яким керувальна дія формується не за одиничними відхиленнями параметрів, а за ризик-орієнтованим правилом з верифікацією та адаптивністю.

Відповідно до HP3, ризик використовується як керівний параметр для вибору режиму керування, а адаптивність проявляється у зміні рівня втручання протягом



виконання завдання друку залежно від поточної ситуації. Часова послідовність вибору режимів «норма → попередження → м'яке/жорстке втручання» демонструє багаторівневий характер політики та узгоджується з формалізацією режимів  $m_t$ .



Рис. 3.19. Частота керувальних дій у процесі

Для кількісної характеристики інтенсивності керувальних впливів наведено частоту застосування дій у кожному режимі. Спостерігається переважання нормальної роботи та попереджень за відносно малої частки м'яких втручань і практичної відсутності жорстких зупинок у вибраному сценарії, що узгоджується з вимогою НРЗ обмежувати надмірні втручання.

Економічний ефект інтелектуального контролю та керування обґрунтовується порівнянням очікуваних втрат за різних рівнів виробничого навантаження. Залежність очікуваних втрат від кількості завдань друку  $N$  демонструє кумулятивний ефект зменшення браку та простоїв у міру зростання інтенсивності використання обладнання, що підтверджує практичну доцільність політики втручання НР2.

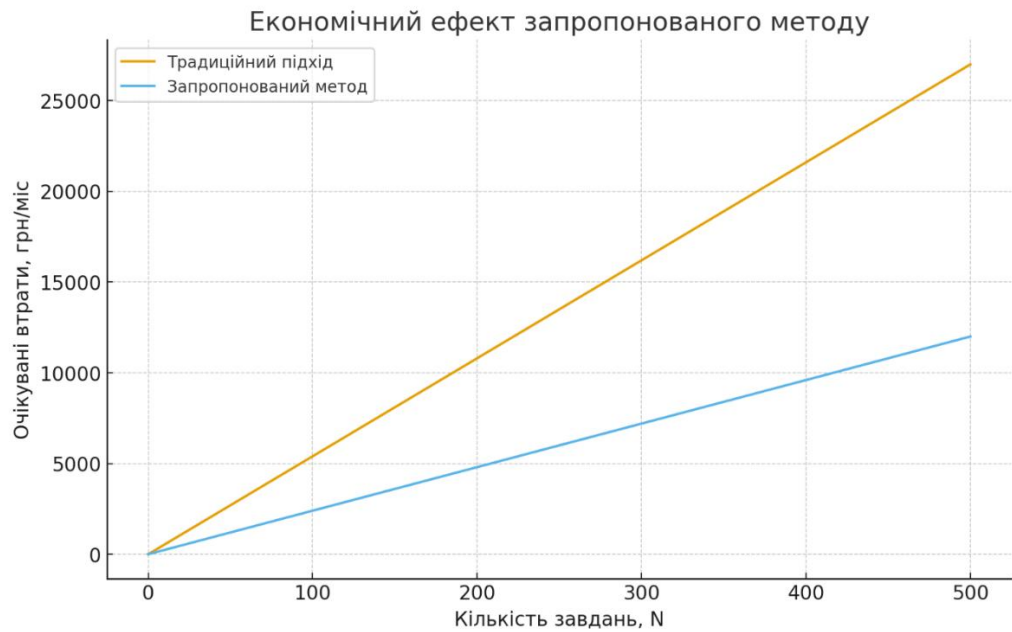


Рис. 3.20. Економічний ефект запропонованого методу

Економію, що зумовлена зменшенням браку, визначено як різницю витрат традиційного підходу та запропонованого методу:

$$\Delta L(N) = L_{\text{trad}}(N) - L_{\text{prop}}(N), \quad (3.127)$$

де  $\Delta L(N)$  – заощадження внаслідок зменшення витрат на брак при кількості завдань  $N$  за місяць;  $L_{\text{trad}}(N)$  – витрати за традиційного підходу;  $L_{\text{prop}}(N)$  – витрати за запропонованого методу.

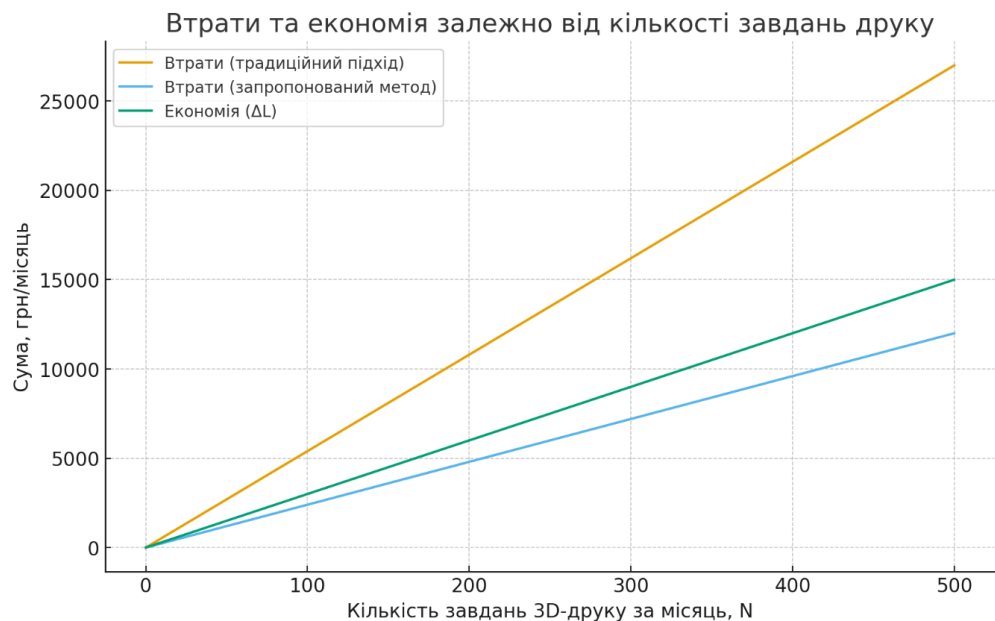


Рис. 3.21. Витрати та економія залежно від кількості завдань 3D-друку за місяць

На графіку витрат і економії (рис. 3.21.) показано, що сумарні витрати зростають пропорційно навантаженню, а відстань між кривими витрат характеризує вигоду від інтелектуального контролю, який досягається завдяки превентивному втручанню та зниженню кількості неуспішних друків.

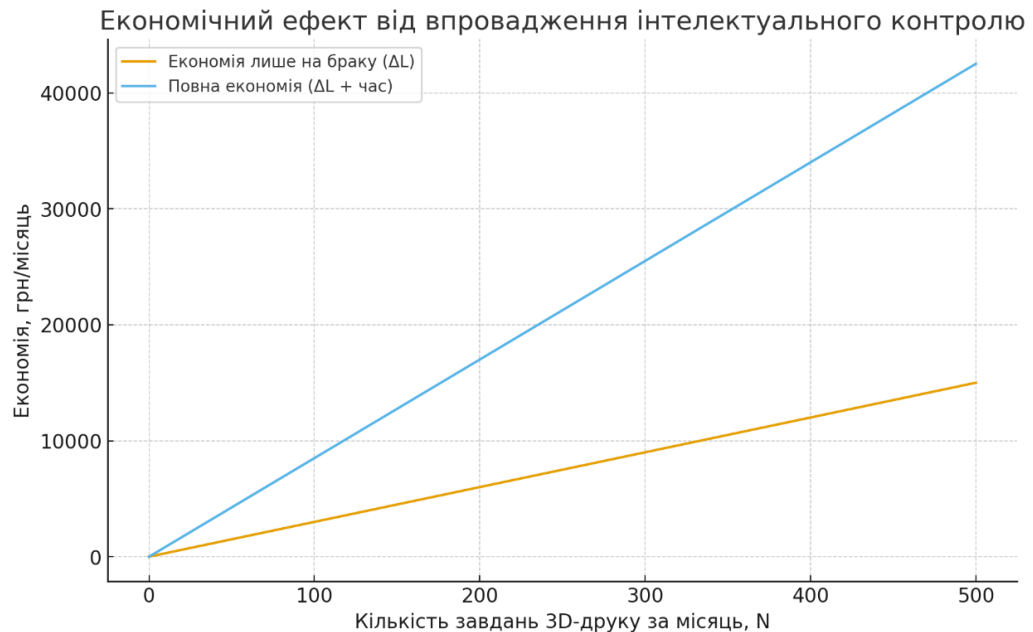


Рис. 3.21. Економічний ефект від упровадження інтелектуального контролю

Повну економію, що враховує не лише зменшення браку, а й часовий чинник (скорочення простоїв та повторних виготовлень), узагальнено так:

$$\Delta L_{\Sigma}(N) = \Delta L(N) + \Delta T(N) \cdot c_t, \quad (3.128)$$

де  $\Delta L_{\Sigma}(N)$  – повна економія;  $\Delta T(N)$  – зекономлений технологічний час (або зменшення простоїв) при навантаженні  $N$ ;  $c_t$  – вартість одиниці часу (нормо-година, машинний час тощо).

Графічне зіставлення демонструє, що повна економія може зростати швидше за економію лише за рахунок браку, оскільки до матеріальних витрат додається скорочення витрат часу та організаційних простоїв завдяки ранньому виявленню й превентивним діям (НР2-НР3).

Для підкріплення економічних висновків наведено структуру місячних витрат на брак за фіксованого навантаження  $N = 300$  завдань/місяць. Зменшення витрат спостерігається за кожною статтею (матеріал, електроенергія, праця оператора,

амортизація), що узгоджується з логікою НР2 щодо зниження повторних друків і тривалості неефективної роботи обладнання.

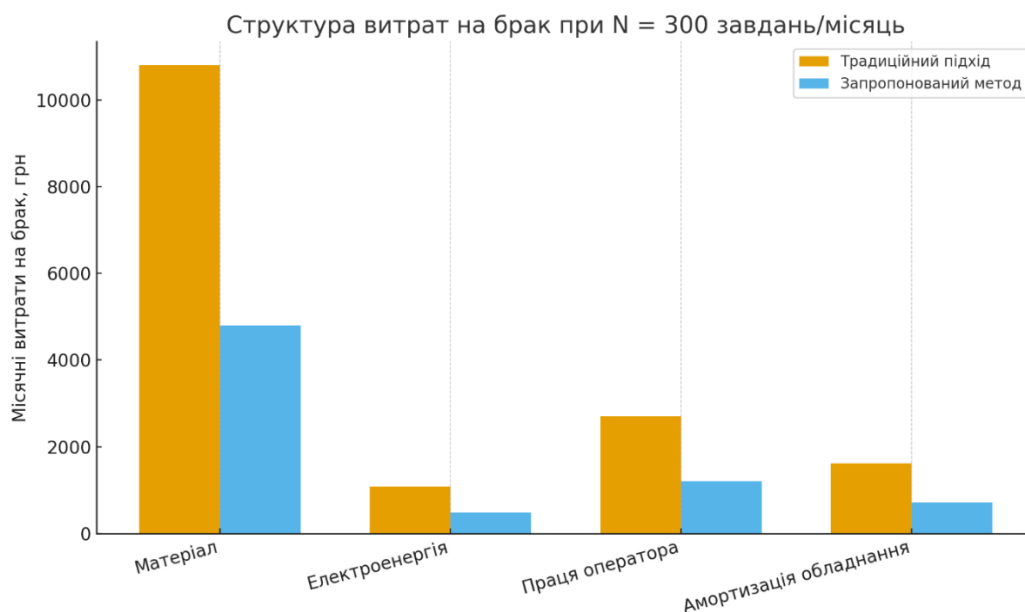


Рис. 3.22. Структура витрат на брак при N = 300 завдань

Порівняльна оцінка якості різних підходів (ручний контроль, PID-регулювання, сенсорний підхід, інтелектуальний метод) демонструє компроміс між імовірністю браку та частотою хибних спрацювань.

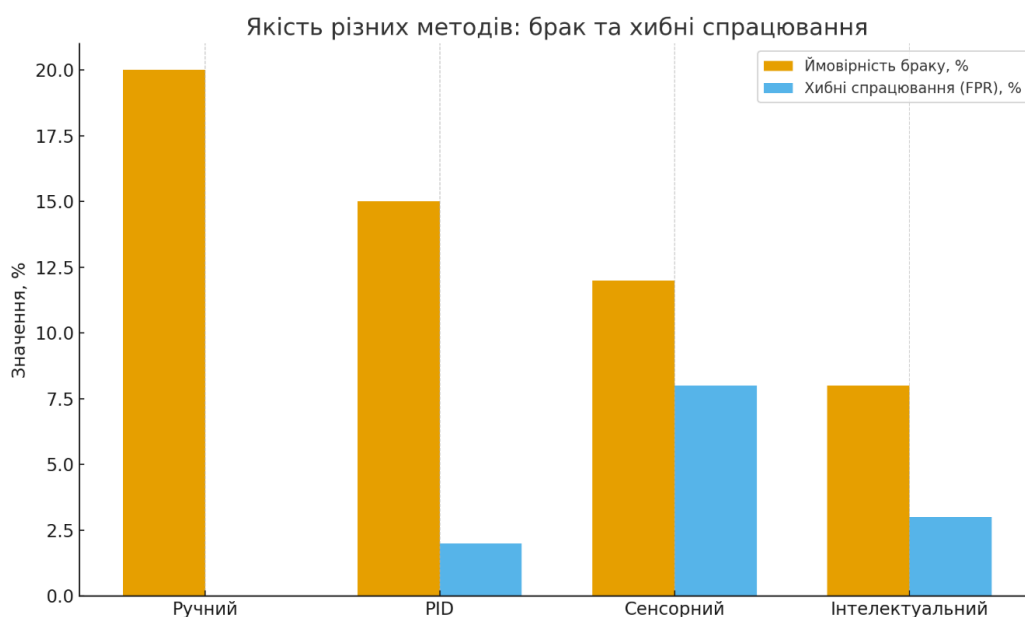


Рис. 3.23. Якість різних методів: імовірність браку та хибні спрацювання

Інтелектуальний метод забезпечує нижчу імовірність браку за прийнятного рівня хибних спрацювань, що відповідає меті НР2 (перехід до превентивного керування без надмірних помилкових втручань).

Для однакового навантаження коректно зіставлено очікувані втрати різних підходів у натуральному виразі (грн/місяць). Показано, що інтелектуальний метод забезпечує найменші втрати серед розглянутих варіантів, що узгоджується з економічними залежностями та структурою витрат на брак.

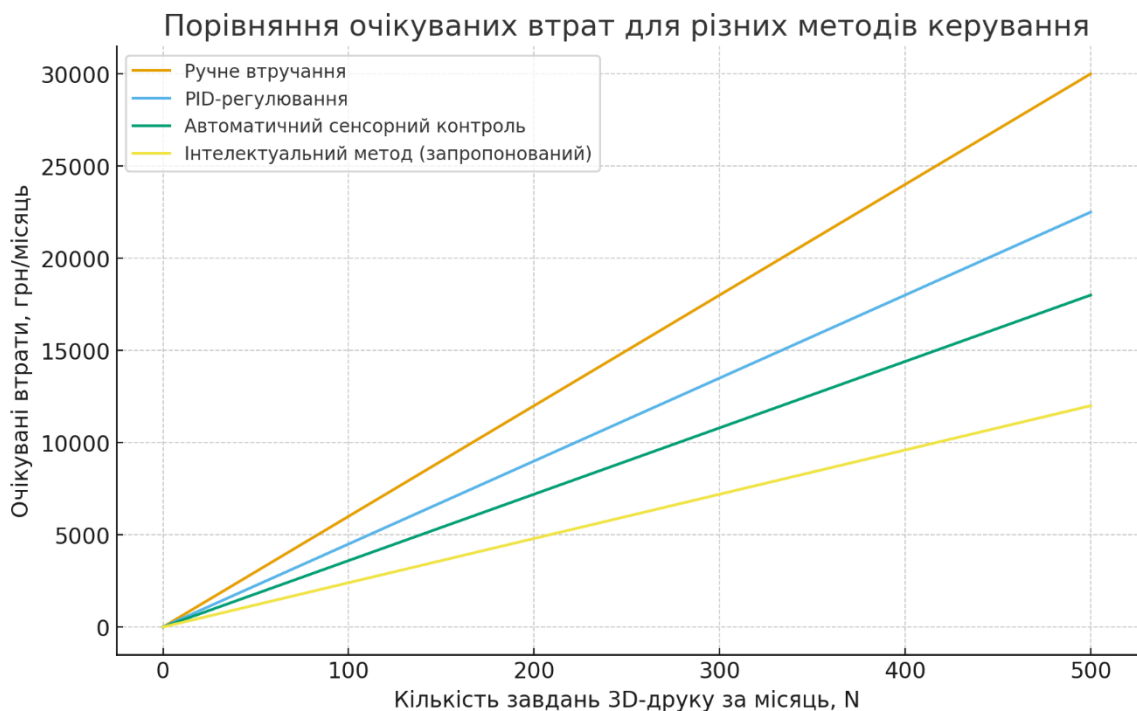


Рис. 3.24. Порівняння очікуваних втрат для різних методів при однаковому навантаженні

Узгоджене використання трьох результатів формує цілісну інтелектуальну технологію керування процесом 3D-друку: НР1 забезпечує мультимодальне спостереження та каскад «тригер–верифікація», НР2 вводить політику втручання й оптимізаційний критерій мінімізації очікуваних втрат, НР3 деталізує адаптивну структуру політики, що підвищує стійкість керування до випадкових піків ризику та зменшує ймовірність надмірних зупинок шляхом згладжування, часових критеріїв і обмежень частоти жорстких втручань. Це забезпечує перехід від

локального реактивного контролю до превентивного, ризик-орієнтованого керування у замкненому контурі реального часу.

### **Висновки до розділу 3**

У третьому розділі розроблено інформаційну технологію, орієнтовану на практичну інтеграцію інтелектуального візуального контролю з керуванням процесом друку, включно з формалізацією ризико-орієнтованих політик та процедур випробувань. Прийняття рішень описано як відображення, що використовує інтегральний індикатор ризику, телеметрію та контекст G-коду, а виходом є керувальна дія (пауза, корекція параметрів або відсутність втручання); для зменшення помилкових спрацювань введено два пороги ризику та інтервал підвищеної уваги.

Запропоновано формалізований апарат оцінювання своєчасності реакції «кадр  $\rightarrow$  дія» через декомпозицію повної латентності та контроль її квантилів, що дозволяє вводити жорсткі критерії для критичних сценаріїв друку. Як практичний інструмент контролю визначено зведену систему метрик і граничних значень, зокрема для дрібних дефектів і перцентилів затримки, а також для частки «врятованих» друків, частоти хибних пауз і аптайму критичних сервісів.

Показано, що коректність вимірювання часових характеристик потребує узгодження часових шкал між камерою, хост-системою та прошивкою; для незалежної валідації застосовано зовнішній світловий маркер, який одночасно потрапляє до відеокадру та журналу подій.

Одночасно визначено підхід до оцінювання енергоефективності й ресурсних характеристик (CPU та пам'ять), що дозволяє порівнювати конфігурації не лише за швидкодією, а й за витратами енергії на обробку кадру.

Забезпечено уніфікацію подання польових результатів у табличному форматі «метрика  $\rightarrow$  конфігурація моделі», де одночасно враховуються точнісні показники, латентність у вигляді медіани та інтервалу [P5–P95], а також частота хибних пауз як індикатор експлуатаційної «ціни» втручань. 3.

## ВИСНОВКИ

У роботі досягнуто мети підвищення надійності та якості процесу FDM/FFF-3D-друку шляхом створення узгодженого інтелектуального наглядного контуру керування, який інтегрує мультимодальний моніторинг стану процесу, моделі глибинного навчання для раннього виявлення дефектів та формалізовані політики безпечних керувальних втручань в умовах невизначеності, обмежених обчислювальних ресурсів і жорстких часових вимог. Продемонстровано, що практична результативність такого контуру визначається не ізольованою точністю розпізнавання, а збалансованою сукупністю властивостей: своєчасністю реакції «кадр – дія», стійкістю рішень у часі, керованістю втручань, частотою небажаних пауз і надійністю критичних сервісів. Саме тому у роботі прийнято системний підхід, у якому модуль розпізнавання розглядається як складова замкненого наглядного контуру з вимірюваними часовими, якісними та експлуатаційними характеристиками.

Перший отриманий результат полягає в удосконаленні моделі інтелектуального наглядного контролю FDM-друку, що реалізує каскадний принцип оцінювання та верифікації ризику, а також забезпечує відтворюваний протокол спостереження і прийняття рішень у реальному часі. У межах цієї моделі сформовано підхід до виявлення дефектів із урахуванням дрібних і швидкоплинних аномалій, коли первинне спрацювання узгоджується з подальшою перевіркою та стабілізацією рішення на часовому інтервалі. Це дає змогу зменшувати частоту хибних спрацювань без втрати чутливості до критичних сценаріїв друку, зокрема на ранніх шарах, під час формування мостів і тонких елементів.

Другий результат полягає у формалізації методу інтелектуального автоматизованого керування процесом 3D-друку, який перетворює ризикову оцінку та контекст технологічного стану на регламентовану керувальну дію. Метод відрізняється тим, що рішення задається не фіксованими порогами окремих параметрів, а процедурою вибору дії з урахуванням очікуваних втрат, технологічних обмежень і безпекових вимог. Такий підхід передбачає узгодження

рівня ризику з класом втручання (від рекомендацій і підтверджуваних пауз до аварійної зупинки), а також визначає вимоги до прозорості й аудитованості рішень, що є принциповими для експлуатації на реальному обладнанні.

Третій результат полягає в побудові моделі адаптивного вибору керувальних рішень у процесі 3D-друку, яка забезпечує стійкість поведінки політик у часі та зменшує небажані втручання за рахунок механізмів згладжування і гістерезису. Така модель враховує динамічний характер ризику, відмінність між короточасними флуктуаціями оцінки та стійкими ознаками дефекту, а також підтримує комбінування інформації з різних джерел стану (візуальні ознаки, контекст траєкторії, телеметрія). У підсумку забезпечується узгоджений компроміс між раннім виявленням небезпечних сценаріїв і мінімізацією хибних пауз, що безпосередньо визначає придатність системи до тривалої експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується тим, що у роботі запропоновано цілісну систему метрик, критеріїв прийнятності та методику випробувань, придатну для контрольного аналізу й подальшого виробничого моніторингу. Зокрема, визначено групи показників якості розпізнавання, технологічного ефекту втручань та експлуатаційної продуктивності, а також наведено зведений формат критеріїв, який використовується як стислий список під час оцінювання конфігурацій комплексу.

У межах цих критеріїв, зокрема, застосовано вимоги: середня точність за площею для дрібних дефектів не нижча за 0,7; дев'яносто п'ята перцентиль затримки «кадр  $\rightarrow$  дія» не більша за 0,8 с; дев'яносто дев'ята перцентиль затримки не більша за 1,0 с; частка «врятованих» друків не нижча за 0,6; частота хибних пауз не більша за 0,1 події/год; доступність критичних сервісів не нижча за 0,99 (табл. 3.11).

Окремо важливо, що у роботі уніфіковано спосіб подання польових результатів, який одночасно відображає точність, латентність і експлуатаційні наслідки (зокрема частоту хибних пауз) та, відповідно, спрощує обґрунтування рішень щодо розгортання тієї чи іншої конфігурації у реальному режимі друку. Такий формат забезпечує зіставність альтернативних налаштувань і прозорість



висновків, оскільки інтерпретація якості детекції пов'язується з фактичним навантаженням на оператора та виробничою продуктивністю.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням номенклатури дефектів і сценаріїв, поглибленням мультимодальної верифікації за рахунок додаткових каналів телеметрії, а також уніфікацією протоколів випробувань для різних класів обладнання й матеріалів. Водночас домінуючими критеріями розвитку мають залишатися керованість і безпека втручань, відтворюваність експериментів та експлуатаційна надійність, оскільки саме ці властивості визначають придатність інтелектуального наглядового контуру до серійного застосування на парку 3D-принтерів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку // Наука та інновації. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 5–17.
2. Пивовар Д. В. Сучасні 3D-технології в машинобудуванні та автомобільному транспорті // Технічні науки та технології. – 2020. – № 2. – С. 72–80.
3. Marlin Firmware. G0–G1 — Linear Move : official G-code documentation. – 2025. – URL: <https://marlinfw.org/docs/gcode/G000-G001.html> (дата звернення: 21.06.2025).
4. Ultimaker. CuraEngine Wiki: Internals [Електронний ресурс]. – GitHub. – URL: <https://github.com/Ultimaker/CuraEngine/wiki/Internals> (дата звернення: 6.04.2025).
5. Marlin Firmware. Code Structure [Електронний ресурс]. – 2025. – URL: [https://marlinfw.org/docs/development/code\\_structure.html](https://marlinfw.org/docs/development/code_structure.html) (дата звернення: 12.01.2025).
6. Литвиненко О. Є., Бойко А. М. Аналіз впливу параметрів філаменту на якість виробів, виготовлених методом FDM // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2019. – № 15. – С. 98–104.
7. Володько М. Ю., Клименко Т. Є., Талімонова Н. Л. Вплив технологічних режимів адитивного 3D-друку на якість продукції // Вісник ХНТУ. – 2021. – № 4. – С. 56–63.
8. Розум Т. В., Коваленко С. М., Литвин О. В. Удосконалення технології виготовлення виробів методом 3D-друку // Технологічні системи. – 2022. – № 3. – С. 41–48.
9. Сидорчук Л. М., Мельник В. І. Підготовка полімерних матеріалів для адитивного виробництва // Хімічна промисловість України. – 2020. – № 3. – С. 41–47.
10. Бондарчук А. П., Олейніков І. А., Бажан Т. О. Застосування методів машинного навчання до управління 3D-принтером // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2024. – № 1. – С. 4–15..

11. Гриценко Ю. М. Розроблення системи контролю виробів 3D-друку в роботизованому виробництві // Вісник НТУ «ХПІ». – 2020. – № 5. – С. 23–30.
12. Prusa Research. Adjusting belt tension (CORE One L, CORE One) [Електронний ресурс] // Prusa Knowledge Base. – URL: [https://help.prusa3d.com/article/adjusting-belt-tension-core-one-l-core-one\\_845048](https://help.prusa3d.com/article/adjusting-belt-tension-core-one-l-core-one_845048) (дата звернення: 22.03.2025).
13. Кравченко О. В., Денисюк С. П. Аналіз кінематичних схем 3D-принтерів для прецизійного друку // Механіка та машинобудування. – 2021. – № 2. – С. 64–71..
14. Петренко М. А., Шевченко Д. В. Методи калібрування координатних систем адитивних установок // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2022. – № 1. – С. 112–118..
15. E3D Online. 60 Second Tips: Bowden v Direct Drive [Електронний ресурс]. – URL: <https://e3d-online.com> (дата звернення: 07.06.2025).
16. Яремчук Р. С., Костюк І. М. Динамічне керування подачею матеріалу в системах 3D-друку // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2020. – № 4. – С. 87–93.
17. Дорошенко В. П., Куц О. І. Моделі температурного керування в адитивних технологіях // Автоматизація виробничих процесів. – 2019. – № 2. – С. 29–36.
18. Куничик О. В., Терещенко В. М. Використання 3D-друку для навчання систем комп'ютерного зору // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2021. – № 2. – С. 18–25.
19. ELCAT. Steinhart–Hart Equation [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.newport.com> (дата звернення: 03.03.2025).
20. Marlin Firmware. Unified Bed Leveling [Електронний ресурс]. – URL: <https://marlinfw.org> (дата звернення: 15.04.2025).
21. Гончаренко Є. В. Статистичні методи контролю якості технологічних процесів // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2018. – № 4. – С. 22–28.

22. Костенко О. С., Буряк І. О. Застосування фільтра Калмана в задачах технічної діагностики // Електроніка та системи управління. – 2020. – № 1. – С. 55–62.
23. Заячковський А. В., Ткаленко О. М. Моніторинг та використання IoT для автоматизації промислових процесів // Зв'язок. – 2025. – № 3. – С. 3–7.
24. Klipper Documentation. Resonance compensation (Input Shaper) [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.klipper3d.org> (дата звернення: 17.03.2025).
25. Лисенко В. П., Марченко О. О. Алгоритми антивіндал-захисту в системах автоматичного керування // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси. – 2019. – № 2. – С. 14–20.
26. Moonraker Documentation. Introduction (HTTP API / WebSockets / MQTT) [Електронний ресурс]. – URL: <https://moonraker.readthedocs.io> (дата звернення: 30.01.2025).
27. Marlin Firmware. M92 — Set axis steps-per-unit [Електронний ресурс]. – URL: <https://marlinfw.org/docs/gcode/M092.html> (дата звернення: 12.06.2025).
28. Бондаренко О. М., Савчук П. В. Сучасні методи моніторингу процесів адитивного виробництва // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика. – 2022. – № 6. – С. 101–109.
29. Андрощук Г. О. Адитивні технології: ризики та безпека застосування // Наукові праці НАН України. – 2020. – № 1. – С. 44–52.
30. Marlin Firmware. Thermal runaway protection [Електронний ресурс]. – URL: <https://marlinfw.org> (дата звернення: 08.04.2025).
31. Marlin Firmware. Troubleshooting: temperature / heating errors (MINTEMP/MAXTEMP тощо) [Електронний ресурс]. – URL: <https://marlinfw.org> (дата звернення: 19.05.2025).
32. Prusa Firmware Buddy. Configuration\_adv.h (USE\_WATCHDOG) [Електронний ресурс]. – URL: <https://github.com/prusa3d> (дата звернення: 11.02.2025).

33. Гриценко Ю. М., Сидоренко О. П. Сенсорні методи контролю якості виробів адитивного виробництва // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2021. – № 3. – С. 31–38.
34. Marlin Firmware. M413 — Power-loss recovery [Електронний ресурс]. – URL: <https://marlinfw.org/docs/gcode/M413.html>(дата звернення: 06.03.2025).
35. Prusa Knowledge Base. Power Panic (power-loss recovery) [Електронний ресурс]. – URL: <https://help.prusa3d.com>(дата звернення: 14.04.2025).
36. Полонський К. В., Ткаленко О. М. Кібербезпека систем адитивного виробництва в Industry 4.0 // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2024. – № 2. – С. 77–86.
37. He, J., Chung, J., Tii, A. H. та ін. Machine condition monitoring for defect detection in fused deposition modelling: a review [Електронний ресурс]. – 2024. – URL: <https://link.springer.com>(дата звернення: 09.01.2025).
38. Жебка В. В., Базак Ю. К., Сторчак К. П. Особливості прогнозування збоїв в розумному будинку на основі методів машинного навчання // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2023. – № 4 (81). – С. 4–12.
39. Moallemi, M., Sharifi-Tehrani, M., Kumar, A. та ін. Exploring scalable, distributed real-time anomaly detection using edge sensor preprocessing [Електронний ресурс]. – arXiv, 2022. – URL: <https://arxiv.org>(дата звернення: 18.03.2025).
40. Клименко І. В., Романюк С. М. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами адитивного виробництва // Інформаційні системи та технології. – 2023. – № 1. – С. 33–41.
41. Marlin Firmware. Marlin firmware: home [Електронний ресурс]. – URL: <https://marlinfw.org>(дата звернення: 04.02.2025).
42. OctoPrint Documentation. REST API [Електронний ресурс]. – URL: <https://docs.octoprint.org/en/master/api/index.html>(дата звернення: 16.06.2025).
43. Prusa Research. How to check the G-code viewer in PrusaSlicer [Електронний ресурс]. – URL: [https://help.prusa3d.com/article/how-to-check-the-g-code-viewer-in-prusaslicer\\_52638](https://help.prusa3d.com/article/how-to-check-the-g-code-viewer-in-prusaslicer_52638)(дата звернення: 21.01.2025).

44. Raspberry Pi Ltd. Raspberry Pi 5 [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>(дата звернення: 12.07.2025).
45. Fu, Y. та ін. In situ monitoring for fused filament fabrication process / Additive Manufacturing. – 2021. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420311210>(дата звернення: 28.02.2025).
46. Li, Y. та ін. In-situ monitoring and diagnosing for fused filament fabrication process using vibration sensor / Sensors. – 2019. – Vol. 19, No. 11. – Art. 2589. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/11/2589>(дата звернення: 10.05.2025).
47. Ferraris, E. та ін. Thermography-based in-process monitoring of fused filament fabrication of polymeric parts [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850619301556>(дата звернення: 01.04.2025).
48. Nikooharf, M. H. Toward advanced/digitalized FFF: real-time multimodal monitoring [Електронний ресурс]. – URL: <https://d-nb.info/1373688165/34>(дата звернення: 23.06.2025).
49. Scikit-learn developers. roc\_auc\_score — scikit-learn documentation [Електронний ресурс]. – URL: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.roc\\_auc\\_score.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.roc_auc_score.html)(дата звернення: 15.03.2025).
50. Scikit-learn developers. average\_precision\_score — scikit-learn documentation [Електронний ресурс]. – URL: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.average\\_precision\\_score.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.average_precision_score.html)(дата звернення: 07.07.2025).
51. Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., Zisserman, A. The PASCAL visual object classes (VOC) challenge [Електронний ресурс]. – URL: [https://www.cvlibs.net/projects/autonomous\\_vision\\_survey/slides/Everingham2010IJCV/top.pdf](https://www.cvlibs.net/projects/autonomous_vision_survey/slides/Everingham2010IJCV/top.pdf)(дата звернення: 14.02.2025).
52. Sheng, V. S., Ling, C. X., Zhang, H. Thresholding for making classifiers cost-sensitive // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2006.

– [Електронний ресурс]. – URL: <https://aaai.org/Papers/AAAI/2006/AAAI06-076.pdf>(дата звернення: 09.06.2025).

53. Deng, J., Dong, W., Socher, R. та ін. ImageNet: a large-scale hierarchical image database [Електронний ресурс]. – arXiv:0909.2114, 2009. – URL: <https://arxiv.org/abs/0909.2114>(дата звернення: 27.01.2025).

54. Yosinski, J., Clune, J., Bengio, Y., Lipson, H. How transferable are features in deep neural networks? [Електронний ресурс]. – arXiv:1411.1792, 2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1411.1792>(дата звернення: 18.04.2025).

55. PyTorch Team. TorchVision models — ResNet (18/34/50/101/152) [Електронний ресурс]. – URL: <https://pytorch.org/vision/stable/models/resnet.html>(дата звернення: 07.03.2025).

56. Kim, H., Lee, H., Ahn, S.-H. Systematic deep transfer learning method for spaghetti-shape defect monitoring of FDM // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. 65. – [Електронний ресурс]. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.10.009>(дата звернення: 22.05.2025).

57. Lin, T.-Y., Dollár, P., Girshick, R. та ін. Feature pyramid networks for object detection [Електронний ресурс]. – arXiv:1612.03144, 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1612.03144>(дата звернення: 11.02.2025).

58. PyTorch Team. Quantization — PyTorch documentation [Електронний ресурс]. – URL: <https://pytorch.org/docs/stable/quantization.html>(дата звернення: 03.06.2025).

59. PyTorch Team. Model pruning — torch.nn.utils.prune [Електронний ресурс]. – URL: <https://pytorch.org/docs/stable/generated/torch.nn.utils.prune.html>(дата звернення: 26.01.2025).

60. Raspberry Pi Ltd. Raspberry Pi 5 [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>(дата звернення: 30.06.2025).

61. PyTorch Team. Transfer learning for computer vision tutorial [Електронний ресурс]. – URL: [https://pytorch.org/tutorials/beginner/transfer\\_learning\\_tutorial.html](https://pytorch.org/tutorials/beginner/transfer_learning_tutorial.html)(дата звернення: 12.03.2025).

62. Simonyan, K., Zisserman, A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition (VGG) [Електронний ресурс]. – arXiv:1409.1556, 2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1409.1556>(дата звернення: 08.07.2025).
63. Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B. та ін. MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications [Електронний ресурс]. – arXiv:1704.04861, 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1704.04861>(дата звернення: 17.02.2025).
64. Fu, Y., Wang, Y., Yan, C. та ін. Deep learning in situ monitoring and defect detection in additive manufacturing [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420311210>(дата звернення: 05.05.2025).
65. TensorFlow. Pruning for on-device inference with XNNPACK [Електронний ресурс]. – TensorFlow model optimization guide. – 2025. – URL: [https://www.tensorflow.org/model\\_optimization/guide/pruning/pruning\\_for\\_on\\_device\\_inference](https://www.tensorflow.org/model_optimization/guide/pruning/pruning_for_on_device_inference)(дата звернення: 21.06.2025).
66. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. You only look once: unified, real-time object detection [Електронний ресурс]. – arXiv:1506.02640, 2016. – URL: <https://arxiv.org/abs/1506.02640>(дата звернення: 14.01.2025).
67. Minaee, S., Boykov, Y., Porikli, F. та ін. Image segmentation using deep learning: a survey [Електронний ресурс]. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – URL: [https://web.cs.ucla.edu/~tianmin/shares/pami\\_segmentation\\_survey.pdf](https://web.cs.ucla.edu/~tianmin/shares/pami_segmentation_survey.pdf)(дата звернення: 28.04.2025).
68. Hojjati, H., Ho, T. K. K., Armanfard, N. Self-supervised anomaly detection in computer vision and beyond: a survey // Neural Networks. – 2024. – [Електронний ресурс]. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2024.106106>(дата звернення: 19.05.2025).
69. OctoEverywhere. MCP server for 3D printing [Електронний ресурс]. – URL: <https://octoeverywhere.com/blog/mcp-server-for-3d-printing/>(дата звернення: 07.02.2025).



70. TensorFlow. TensorFlow Lite Python quickstart [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.tensorflow.org/lite/guide/python>(дата звернення: 24.06.2025).
71. Куничик О. В., Полоневич О. В., Ткаленко О. М. Застосування методів комп'ютерного зору для виявлення дефектів 3D-друку // Зв'язок. – 2021. – № 1. – С. 55–59..
72. Raspberry Pi Ltd. Raspberry Pi 5 product brief (Issue: 2025-12) [Електронний ресурс]. – URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi5/raspberry-pi-5-product-brief.pdf>(дата звернення: 28.06.2025).
73. He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. Deep residual learning for image recognition [Електронний ресурс]. – arXiv:1512.03385, 2015. – URL: <https://arxiv.org/abs/1512.03385>(дата звернення: 11.02.2025).
74. Canny, J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4767851>(дата звернення: 19.04.2025).
75. TensorFlow. Transfer learning and fine-tuning [Електронний ресурс]. – URL: [https://www.tensorflow.org/tutorials/images/transfer\\_learning](https://www.tensorflow.org/tutorials/images/transfer_learning)(дата звернення: 07.05.2025).
76. Moretti, M. та ін. Towards the development of a smart fused filament fabrication system: a comprehensive approach for in-process monitoring and optimization // Rapid Prototyping Journal. – 2020. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-11-2019-0283/full/html>(дата звернення: 23.01.2025).
77. Shorten, C., Khoshgoftaar, T. M. A survey on image data augmentation for deep learning // Journal of Big Data. – 2019. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://doaj.org/article/e96484ae5a5f47daaeeb7c4d3f32c3fd>(дата звернення: 14.06.2025).
78. Google AI Edge; TensorFlow. Model optimization [Електронний ресурс]. – URL: <https://ai.google.dev/edge/litert/models/optimization>(дата звернення: 02.02.2025).

79. OctoPrint Documentation. Viewmodels (events and progress callbacks) [Електронний ресурс]. – URL: <https://docs.octoprint.org/en/main/plugins/viewmodels.html>(дата звернення: 25.05.2025).
80. Залуковський О. М. Розробка 3D-принтера для виготовлення модульних каркасів домів : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра. – Херсон : Херсонський національний технічний університет, 2025. – 79 с. – URL: <https://eir.kntu.net.ua/jspui/bitstream/>.
81. Forster A. M. Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability : NIST Interagency/Internal Report 8059. – Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2015. – DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8059>.
82. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. – 2nd ed. – New York : Springer, 2015. – 498 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
83. Bryła J., Martowicz A. Study on the Importance of a Slicer Selection for the 3D Printing Process Parameters via the Investigation of G-Code Readings // Machines. – 2021. – Vol. 9, No. 8. – Art. 163. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9080163>.
84. Shorten C., Khoshgoftaar T. M. A Survey on Image Data Augmentation for Deep Learning // Journal of Big Data. – 2019. – Vol. 6. – Art. 60. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>.
85. Tan M., Le Q. V. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2019. – P. 6105–6114.
86. Zhang Y., Bernard A., Gupta R. K. Transfer Learning for Monitoring Additive Manufacturing Processes // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 36. – Art. 101552. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101552>.
87. Viola P., Jones M. Rapid Object Detection Using a Boosted Cascade of Simple Features // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2001. – P. 511–518.

88. Marlin Firmware Documentation. Thermal Protection and Emergency Procedures [Электронный ресурс]. – URL: <https://marlinfw.org/docs/> (дата звернення: 17.12.2025).
89. Sze V., Chen Y.-H., Yang T.-J., Emer J. S. Efficient Processing of Deep Neural Networks: A Tutorial and Survey // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105, No. 12. – P. 2295–2329. – DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2761740>.
90. Upton E., Halfacree G. Raspberry Pi User Guide. – 5th ed. – Hoboken : Wiley, 2024. – 312 p.
91. OctoPrint Project. System Architecture and Plugin Framework Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.octoprint.org/> (дата звернення: 17.12.2025).

## Додаток А. Акти впровадження

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту  
телекомунікацій і глобального  
інформаційного простору  
Національної академії наук  
України



" 5 " 11 2025 р. О.М. Трофимчук

### АКТ

впровадження наукових результатів дисертації

ОЛЕЙНІКОВА Івана Анатолійовича

на тему «Метод та модель інтелектуального автоматизованого керування  
3D-друком на основі машинного навчання»

Комісія у складі голови комісії – завідувача відділу дослідження навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України д.т.н., професора Триснюка В.М., та членів комісії: головного наукового співробітника Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України д.т.н. с.н.с. Яковлева Є.О., старшого наукового співробітника, к.т.н., старшого дослідника Охарева В.О. розглянула запропоновані матеріали в межах дисертаційного дослідження здобувача ОЛЕЙНІКОВА Івана Анатолійовича на тему «Метод та модель інтелектуального автоматизованого керування 3D-друком на основі машинного навчання»

Комісією підтверджено, що реалізація поставленого в дисертаційному дослідженні наукового завдання сприяє суттєвому підвищенню надійності та якості процесу FDM 3D-друку, а також значному розширенню

функціональних можливостей інформаційних технологій автоматизованого керування адитивними виробничими процесами. Це досягається завдяки вирішенню наукового завдання з розроблення науково обґрунтованого методу та моделі інтелектуального автоматизованого керування 3D-друком на основі машинного навчання, що забезпечує адаптивне виявлення дрібномасштабних дефектів, оцінювання ризику технологічних відхилень та підтримку прийняття керувальних рішень у режимі, наближеному до реального часу.

У дисертаційній роботі вперше розроблено та експериментально реалізовано модель інтелектуального наглядного контролю процесу FDM-друку, яка поєднує мультимодальний моніторинг, глибинні нейронні мережі класу ResNet і ризик-орієнтовані політики втручання. Забезпечено автоматизоване виявлення та класифікацію характерних дефектів 3D-друку, зокрема ниткоутворення, локальних провисань, деламінації, структур типу «спагеті» та мікрозсувів шарів, з високою достовірністю за умов варіативних режимів друку, різних матеріалів і кінематичних конфігурацій принтерів.

Створено та апробовано прототип інформаційної технології інтелектуального автоматизованого керування FDM 3D-друком, який забезпечує візуальний і телеметричний контроль процесу, формування коригувальних керувальних дій та безпечну інтеграцію з прошивками Marlin і Klipper. Технологія реалізована у вигляді модульного програмно-апаратного комплексу на базі мінікомп'ютера Raspberry Pi 5 з відкритим програмним стеком, що дозволяє розгортання системи як у лабораторних, так і в експлуатаційних умовах.

Комісією встановлено, що в роботі особливу увагу приділено розвитку інтелектуальних наглядних систем керування технічними об'єктами, які використовують методи комп'ютерного зору та машинного навчання замість традиційних порогових алгоритмів контролю. Запропонований підхід забезпечує підвищення стійкості процесу друку до збурень, змін властивостей матеріалу та апаратних відхилень, а також зменшення кількості хибних аварійних зупинок.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що впровадження розроблених у дисертаційному дослідженні елементів інформаційних технологій дозволяє моделювати та аналізувати різні сценарії процесу 3D-друку, зокрема нестабільні режими екструзії, теплові відхилення та механічні збурення. Отримані результати використано для налаштування

параметрів системи, оцінювання ефективності політик втручання та скорочення непродуктивних витрат матеріалу й часу. Таким чином результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Навчально-наукового інституту інформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

Голова комісії:

Члени комісії



В.М. Триснюк

Є.О. Яковлев

В.О. Охарева





ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Державного  
університету інформаційно-  
комунікаційних технологій Корченко О. Г.

11 2025 року

**А К Т**

**впровадження в навчальний процес Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій наукових положень і результатів дисертаційної роботи Олейнікова Івана Анатолійовича: «Метод та модель інтелектуального автоматизованого керування 3D-друком на основі машинного навчання»**

Науково-педагогічна комісія у складі голови – директора навчально-наукового інституту Інформаційних технологій доктора технічних наук, професора Нестеренко К.С. та членів комісії: завідувача кафедри Технологій цифрового розвитку доктора технічних наук, професора Жебки В.В., завідувача кафедри Комп'ютерної інженерії кандидата технічних наук, доцента Лащевської Н.О. склала даний акт про те, що наукові положення і результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Олейнікова І.А. на тему «Метод та модель інтелектуального автоматизованого керування 3D-друком на основі машинного навчання», а саме

1. Удосконалена модель інтелектуального наглядного контролю процесу 3D-друку, яка, на відміну від відомих, використовує каскадну структуру детекції та верифікації дефектів на основі глибинних моделей машинного навчання, що дозволяє формувати високоточні оцінки стану та визначати ймовірність дефектів у реальному часі.

2. Розроблено метод інтелектуального автоматизованого керування процесом 3D-друку, наукова новизна якого полягає у використанні динамічної політики втручання, що базується на оцінці ризику та результатах машинного навчання, що забезпечує адаптивну зміну параметрів друку відповідно до ідентифікованих аномалій. Запропонований метод дає можливість зменшити частку відбракованих виробів, підвищити технологічну відтворюваність і

забезпечити безпечне втручання у процес формування шарів у режимі реального часу.

3. Набула подальшого розвитку модель мультисенсорної інтеграції інформації про стан технологічного процесу, яка, на відміну від традиційних локальних підходів, поєднує візуальну, температурну, координатну та телеметричну інформацію в єдиній вимірювальній структурі та використовує методи машинного навчання для удосконаленої локалізації джерел дефектів. Це забезпечує реалізацію інтелектуальних циклів корекції та уточнення параметрів друку на основі комплексних даних у системах автоматизованого керування.

Наукові результати введено в навчальний процес кафедри Технологій цифрового розвитку Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій при викладанні дисципліни «Комп'ютерне моделювання» та «Розробка ігор» для студентів спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» денної форми навчання.

Голова комісії:

Директор навчально-наукового інституту Інформаційних технологій

доктор технічних наук, професор



Нестеренко К.С.

Члени комісії:

Завідувач кафедри Технологій цифрового розвитку

доктор технічних наук, професор



Жебка В.В.

Завідувач кафедри Інформаційних систем та технологій

доктор технічних наук, професор



Сторчак К.П.



