

СУХОСТАВСЬКИЙ ВАДИМ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0008-0122-8011>e-mail: vadim.ua@gmail.com**СКИБА МИКОЛА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-1451-4186>e-mail: mykolaskybaxnu@gmail.com**КРАСІЙ МИХАЙЛО**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0002-7905-1419>e-mail: m.krasiy@gmail.com**ТОЛСТЮК АРТЕМ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0002-4200-7182>e-mail: tvenergetik@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАМКНУТОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ FDM 3D ДРУКУ

Забезпечення стабільної якості виробів, виготовлених методом FDM, ускладнюється стохастичністю теплових процесів, неньютонівською реологією розплаву та чутливістю геометрії шару до параметрів подачі й руху. У роботі запропоновано замкнену математичну модель контролю якості, що поєднує фізичні підмоделі процесу з оцінюванням стану, детекцією дефектів і оптимальним керуванням. Об'єкт подано як нелінійну дискретну систему $x_{k+1} = f(x_k, u_k, d_k) + w_k$, $y_k = h(x_k, u_k) + v_k$ зі складовими: (i) тепла динаміка екструдера та сопла (енергобаланс з теплопровідністю, конвекцією та охолодженням потоком), (ii) реологія/витрата (Гатен–Пуазейль зі степеневою в'язкістю), (iii) геометрія формування шару (масозбереження $q = v_{xy} \cdot h \cdot w$), (iv) латентні показники якості (адгезія α , пористість ϕ , зсув Δs). Сенсорна модель охоплює температурні, інерційні та візуальні вимірювання з шумами. Для злиття моделі й даних застосовано спостерігач EKF/UKF з діагностикою за інноваціями (NIS/NEES). Блок детекції поєднує ознаки комп'ютерного зору з резидуальною статистикою, формуючи ймовірність дефекту та інтегральну впевненість c_k . Якість шару оцінюється функціоналом Q_k , що агрегує відхилення геометрії, температури та латентних показників. Керування виконує MPC: на ковзному горизонті мінімізуються майбутні втрати якості з урахуванням динаміки та технологічних обмежень, а для швидких відхилень діють прості адаптивні корекції (подача/швидкість). Наглядач безпеки реалізує подієву логіку (м'які корекції або пауза/стоп) за перевищенням порогів. Показано структурну схему, нумеровані рівняння, таблицю позначень, часові масштаби контурів і настанови з тюнінгу ваг, порогів та коваріацій шумів. Запропонована модель є придатним «шаблоном» для інтеграції в прошивки/зовнішні контролери, підвищує відтворюваність FDM-друку за рахунок своєчасного виявлення та компенсації дефектів і слугує основою для цифрових двійників та подальшої оптимізації процесу.

Ключові слова: FDM 3D-друк; замкнене керування; контроль якості in-situ; комп'ютерний зір; оцінювання стану (EKF/UKF); модельно-прогнозне керування (MPC); критерій якості шару Q_k ; реологія розплаву; тепла модель екструдера та сопла; виявлення дефектів.

SUKHOSTAVSKYI VADYM, SKYBA MYKOLA, KRASH MYKHAILO, TOLSTIUK ARTEM

Khmelnitskyi National University

MATHEMATICAL MODEL OF A CLOSED-LOOP QUALITY CONTROL SYSTEM FOR FDM 3D PRINTING

Ensuring consistent quality in FDM printing is challenging due to stochastic thermal behavior, non-Newtonian melt rheology, and the strong sensitivity of bead geometry to feed and motion parameters. This paper presents a closed-loop mathematical model for quality control that tightly integrates physics-based submodels with state estimation, defect detection, and optimal control. The process is formulated as a nonlinear discrete-time system $x_{k+1} = f(x_k, u_k, d_k) + w_k$, $y_k = h(x_k, u_k) + v_k$ comprising: (i) a thermal model of heater block and nozzle (energy balance with conduction, convection, and flow-induced cooling), (ii) rheology/flow (Hagen–Poiseuille with power-law viscosity), (iii) layer geometry (mass conservation $q = v_{xy} \cdot h \cdot w$), and (iv) latent quality indicators (interlayer adhesion α , porosity ϕ , in-plane shift Δs). The sensing layer covers temperature, inertial, and vision channels with explicit noise models. An EKF/UKF observer fuses model and data; consistency is monitored via NIS/NEES. The detection block combines computer-vision features with residual statistics to produce a defect probability and a fused confidence c_k . Layer quality is quantified by a cost Q_k aggregating deviations in geometry, temperature, and latent indicators. Control is performed by MPC: over a receding horizon it minimizes the predicted quality loss subject to plant dynamics and technological constraints, while lightweight adaptive corrections handle fast deviations (flow/speed trims). A safety supervisor implements event-based logic (soft corrections or pause/stop) if thresholds are exceeded. We provide a structural diagram, numbered equations, a symbol table, time-scale separation guidelines, and practical tuning advice for weights, thresholds, and noise covariances. The proposed model acts as a deployable template for firmware/external controllers, improves FDM reliability through timely defect detection and compensation, and forms a rigorous basis for digital twins and subsequent process optimization.

Keywords: DM 3D printing; closed-loop control; in-situ quality monitoring; computer vision; state estimation (EKF/UKF); Model Predictive Control (MPC); layer quality cost Q_k ; melt rheology; hotend/nozzle thermal model; defect detection.

Стаття надійшла до редакції / Received 19.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Вступ

FDM 3D-друк (fused deposition modeling – моделювання методом пошарового наплавлення термопласту) є одним із найпоширеніших методів адитивного виробництва завдяки його універсальності та

низькій вартості. Проте забезпечення стабільно високої якості надрукованих виробів залишається серйозним викликом для технології. Під час друку можуть виникати численні дефекти: внутрішні порожнечі і незаповнення (що знижують міцність), надлишкове заповнення, нерівномірну товщину шарів, зміщення шарів, «сповзання» деталей, викривлення (warping) та інші неточності геометрії [4]. Відхилення у параметрах процесу – температурі екструзії, швидкості друку, швидкості подачі матеріалу тощо – прямо впливають на якість і точність отриманих виробів [4]. У традиційних FDM-принтерах система керування є відкритою: передбачено замкнуті контури лише для підтримання температури сопла і нагрівальної платформи (PID-регулятори для стабілізації температури заданого значення) [1]. Натомість рух подаючих крокових двигунів (координатних осей X, Y, Z та екструдера) виконується у розімкнутому циклі без прямого сенсорного контролю положення або кількості поданого матеріалу. Відсутність зворотного зв'язку не дозволяє виявити і миттєво скоригувати такі проблеми, як пропуск кроків двигунів, прослизання філаменту в подаючому механізмі чи часткове засмічення сопла, що призводять до недоекструзії (недостатньої подачі матеріалу) і відповідних дефектів виробу [1].

Для вирішення цієї проблеми активно досліджуються методи інтеграції датчиків та зворотного зв'язку у процес FDM-друку з метою реалізації замкнутих систем контролю якості (Closed-Loop Quality Control). Ідея полягає в тому, щоб безперервно відстежувати ключові показники процесу та якості вироблення (швидкість і кількість подачі матеріалу, фактичне положення вузлів, форму накладеного шару, стан поверхні тощо) і в режимі реального часу порівнювати їх із заданими або еталонними значеннями. У випадку виявлення відхилення система автоматично вносить корективи до параметрів друку (швидкості руху, температури, подачі тощо) або призупиняє процес, запобігаючи розвитку дефекту [4]. Запровадження такої системи дозволяє оперативно реагувати на появу дефектів та забезпечувати стабільність якості навіть за умов зміни зовнішніх факторів чи властивостей матеріалу.

Аналіз останніх досліджень показує ефективність підходу із замкнутим керуванням для покращення якості FDM-друку. Так, у роботі Moretti та Rossi [1] реалізовано замкнутий контур керування подачею філаменту з використанням енкодера: вимірюючи фактичне переміщення філаменту, система коригує швидкість подачі для усунення прослизання. Це дозволило знизити похибку подачі матеріалу з ~9% до <0,25%, збільшивши густину надрукованих зразків і зменшивши кількість внутрішніх пустот [1]. Інші автори впроваджували зворотний зв'язок по координатних осях – встановлення датчиків положення (наприклад, оптичних або лінійних енкодерів) на вісі X, Y, Z – що дало змогу компенсувати втрату кроків і неточності переміщень механізмів друку [1-2]. Такі рішення забезпечують автоматичну корекцію позиціонування при виникненні відхилень, наприклад, викликаних перегрівом двигунів, інерційними переваженнями чи зіткненнями екструдера з деталлю [1]. Застосування комп'ютерного зору та інших датчиків для моніторингу якості теж демонструє перспективи. Зокрема, Liu та ін. [3] розробили систему аналізу зображень надрукованого шару, яка здатна виявляти дефекти типу недо- чи пере-екструзії та автоматично коригувати пов'язані параметри процесу (наприклад, швидкість подачі матеріалу) [1]. Подібний підхід дозволяє виправляти дефекти, хоча має обмеження: необхідна наявність певного впорядкованого візерунку шарів для надійного аналізу, а корекція відбувається з затримкою до завершення даного шару [1].

Таким чином, сучасні тенденції у розвитку FDM-технологій спрямовані на перехід від відкритих систем до замкнутих систем керування процесом друку, які інтегрують різноманітні датчики і алгоритми контролю. Математичне моделювання такої системи є актуальним завданням, оскільки дозволяє формалізувати її роботу, оптимізувати параметри керування та оцінити вплив зворотного зв'язку на кінцеву якість продукції. Метою даної роботи є розробка загальної математичної моделі замкнутої системи контролю якості FDM 3D-друку та детальне пояснення її структури і принципу дії.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єкт дослідження – процес формування виробів методом FDM 3D-друку, оснащений системою контролю якості із замкнутим зворотним зв'язком. Іншими словами, об'єктом є сама система контролю якості FDM-друку, що включає 3D-принтер, датчики, засоби обробки сигналів та контролер для корекції параметрів друку.

Методи дослідження – аналітичне моделювання динаміки систем керування, методи теорії автоматичного керування (класичні PID-регулятори, аналіз стійкості та похибок), а також системний аналіз літературних даних про існуючі рішення контролю якості у адитивному виробництві. Для верифікації концепції застосовано комп'ютерне моделювання типових ситуацій виникнення дефектів та їх компенсації шляхом зворотного зв'язку; проведено порівняння з реальними системами, описаними в наукових працях. Теоретичною базою слугували фундаментальні роботи в галузі адитивного виробництва і автоматичного керування [1–6] та сучасні прикладні розробки систем моніторингу якості 3D-друку [7].

Постановка завдання

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналіз процесу FDM 3D-друку з точки зору керованих параметрів і показників якості. Виділити основні фактори, що впливають на якість виробу (температурні режими, кінематика руху, подача матеріалу, навколишні умови тощо) та формалізувати критерії якості (точність геометрії, адгезія шарів, відсутність дефектів поверхні, пористість і міцність).
2. Розробка структури замкнутої системи контролю якості. Необхідно запропонувати структуру системи зі зворотним зв'язком, визначити її основні компоненти: датчики (вимірювальні підсистеми), контролери (алгоритми зворотного зв'язку) та виконавчі органи (механізми принтера, які регулюють процес). Сформулювати концептуальну блок-схему системи.
3. Математичне моделювання підсистем. Скласти математичні рівняння, що описують динаміку окремих підсистем друку:

- контур температури сопла (тепловий баланс, PID-регулятор);
- контур температури платформи;
- контур подачі філаменту (кінематика екструдера, можливе прослизання);
- контури руху по осях (механічна динаміка приводу, потенційні похибки позиціонування).

Також описати модель формування шару та показники якості (наприклад, залежність товщини чи ширини екструдованої нитки від параметрів подачі і швидкості друку).

4. Інтеграція підсистем у замкнутий цикл. Об'єднати моделі в єдину систему зворотного зв'язку. Ввести змінні, що характеризують якість виготовлення (наприклад, відхилення товщини шару від номіналу, наявність дефектів типу розриву нитки тощо) та зв'язати їх із показаннями датчиків. Сформулювати закон керування – як контролер обчислює корекцію сигналів управління на основі відхилень якості.

5. Аналіз роботи моделі. Дослідити поведінку математичної моделі при виникненні типових збурень: наприклад, раптове зменшення подачі (імітація прослизання філаменту), перевищення швидкості друку, погана адгезія першого шару тощо. Показати, як замкнута система реагує на такі ситуації (виявляє та коригує).

6. Співставлення з практичними реалізаціями. Розглянути існуючі реалізації промислових і комерційних систем контролю якості FDM-друку (наприклад, 3D-принтери з вбудованими камерами та датчиками) та порівняти їх із запропонованою моделлю. Проаналізувати, які компоненти моделі вже втілені на практиці, а які потребують подальших досліджень.

Виконання цих завдань дозволить отримати цілісну математичну модель системи та зробити висновки щодо її ефективності і доцільності впровадження у 3D-принтерах.

Результати та їх обговорення

Загальні принципи контролю якості FDM-друку. Якість виробів FDM залежить від точного дотримання заданих параметрів процесу на кожному етапі друку. У типовому 3D-принтері зі строковим керуванням контролер (мікропроцесор) генерує команди на основі G-коду – послідовності інструкцій щодо переміщень і екструзії. Без замкнутих каналів зворотного зв'язку контролер припускає, що команди виконуються ідеально, тобто що кожен кроковий двигун перемістився на належний крок, кожна порція філаменту подана рівно на задану довжину, а температура підтримується постійною. На практиці ж мають місце відхилення: наприклад, при прискореннях та інерційних навантаженнях крокові двигуни можуть втрачати кроки; механізм протягання філаменту може частково проковзувати; сама товщина філаменту може коливатися; можливі коливання температури та інші фактори. Усе це призводить до нагромадження похибок та появи описаних раніше дефектів (нестиковки шарів, порожнечі, нитки «спагеті» тощо).

Впровадження сенсорів в систему дозволяє напряму вимірювати критичні параметри і тим самим контролювати реальний процес. Наприклад, використання енкодерів на осях і двигуні екструдера дає інформацію про фактичне переміщення каретки і подачу філаменту [1-2]. Це дозволяє виявити ситуації невідповідності: якщо фактичний рух відстає від запрограмованого, контролер може компенсувати, збільшивши подачу кроків або швидкість. Аналогічно, якщо енкодер на подачі філаменту покаже менше поданого матеріалу, ніж планувалося, система може уповільнити швидкість друку або підвищити температуру (щоб легше йшов матеріал) чи вжити інших заходів.

Окрім механічних датчиків, важливу роль відіграє комп'ютерний зір та інші види аналізу в реальному часі. Камери, спрямовані на зону друку, можуть фіксувати зображення шарів і виявляти дефекти: розрив нитки, утворення грудок матеріалу, відшарування моделі від столу або появу «спагеті» (клубків зволікання при відриві нитки) тощо. Застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу таких зображень продемонструвало здатність розпізнавати дефекти зі високою точністю [4-5]. Більше того, деякі дослідники реалізували системи, що не лише виявляють, але й автоматично реагують на дефекти під час друку. Приміром, у матеріалах роботи [1] наведено експеримент, де система з комп'ютерним зором виявила ознаки недоекструзії на поверхні деталі і впродовж ~5 секунд автоматично збільшила подачу матеріалу (екструзійний множник), що дозволило усунути дефект у подальших шарах [4]. Таке швидке реагування (на порядку секунд) є критичним для успішної корекції, аби дефект не встиг розвинутися або закріпитися у структурі виробу.

Важливо зазначити, що температура друку вже давно контролюється в замкнутому режимі – термодатчики постійно вимірюють температуру сопла і нагрівача столу, а мікроконтролер коригує потужність нагрівачів для утримання потрібної температури (PID-контур). Це запобігає коливанням температури, які могли б спричинити проблеми з плинністю матеріалу чи адгезією шарів [1]. Таким чином, деякі внутрішні контури (температурні) вже є стандартом. Наша мета – розширити принцип зворотного зв'язку на геометричні та матеріальні аспекти процесу: подачу філаменту, траєкторію руху і формування шару.

Існуючі підходи до реалізації зворотного зв'язку. На основі огляду літератури [1–6] можна виділити декілька рівнів, на яких впроваджується зворотний зв'язок:

1. Рівень приводу (механічний): контроль положення та швидкості руху. Сюди відносяться системи з енкодерами на двигунах осей X, Y, Z і екструдера. Наприклад, Weiss et al. [2] успішно застосували недорогі енкодери, щоб замкнути контур керування положенням головки принтера, компенсуючи втрату кроків [1]. Комерційно подібна концепція зустрічається в окремих моделях 3D-принтерів з так званими «розумними» stepper-модулями, які відстежують фактичний кут повороту (наприклад, плати контролерів на базі Trinamic з функцією StallGuard можуть виявляти пропущені кроки). Проте масово FDM-принтери досі залишаються відкритими на цьому рівні через простоту і здешевлення конструкції.

2. Рівень процесу екструзії: контроль подачі матеріалу. Одним із рішень є вимірювання кутового положення екструдера (вбудований енкодер в мотор подачі). Це дозволяє виявити пропуск кроків мотора екструдера і скоригувати його обертання [1]. Однак такий метод не контролює реальне переміщення філаменту – наприклад, якщо філамент буксує під шестернею, енкодер на валу мотора це не покаже [1]. Тому більш ефективним є пряме вимірювання переміщення філаменту. Для цього використовують або оптичні датчики руху філаменту, або другий енкодер на пасивному ролику, притиснутому до філаменту [1, 6]. Такі датчики можуть визначити, чи рухається філамент і скільки саме подано. Moretti та Rossi [1] реалізували саме цей підхід: оптичний енкодер відстежував подачу нитки, і якщо зчитана довжина відставала від номінальної, контролер збільшував швидкість мотора екструдера для компенсації. Результатом стало значне зменшення недоекструзії і підвищення однорідності структури виробу [1].

3. Рівень формування шару (якість шару): безпосередній аналіз того, як було покладено матеріал. Це найвищий рівень контролю, де система «дивиться» на надрукований шар (за допомогою камери або лазерного сканера) і оцінює його якість. Виявивши аномалії – наприклад, нитка покладена занадто тонко (ознака недоекструзії) або занадто товсто/грубо (ознака переоекструзії або надмірного витиснення) – система може відрегулювати подачу матеріалу, швидкість руху чи температуру для наступних шарів [1]. Liu et al. [3] повідомляють про успішне виявлення таких дефектів і корекцію швидкості подачі матеріалу в автоматичному режимі. Інші роботи пропонують вимірювати ширину екструдованої доріжки за допомогою лазерного датчика відразу після її нанесення – такий принцип запатентовано компанією Stratasys (патент US10369776B2) для забезпечення сталої ширини і товщини нитки [1]. Подібний підхід реалізовано в сучасних принтерах Bambu Lab та Creality (див. наступний розділ), де використовується LiDAR-сканування першого шару: лазерний датчик високої роздільної здатності сканує покладену сітку першого шару і вимірює висоту/товщину ниток, на основі чого автоматично коригується відстань до платформи і коефіцієнт подачі філаменту [9].

Важливо відмітити, що чим вищий рівень контролю (ближче до кінцевої якості виробу), тим складніше і повільніше зворотний зв'язок, але тим більший вплив він має. Контур на рівні шару зазвичай має більшу затримку (бо потрібно дочекатися формування шару) і вимагає потужних обчислень (обробка зображень), проте він безпосередньо гарантує досягнення потрібної геометрії та якості поверхні. Натомість низькорівневі контури (позиції, подача) спрацьовують дуже швидко і запобігають відхиленням, але все ж опосередковано впливають на кінцеву якість. Тому комплексна система якості включає декілька вкладених контурів зворотного зв'язку, які доповнюють один одного. Далі наведено математичний опис такої інтегрованої системи.

Загальна замкнута математична модель системи контролю якості FDM 3D-друку.

Опис позначень наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Опис позначень		
Позначення	Опис	Одиниці SI
T^e, T^n	температура екструдера/сопла	K
C^e, C^n	теплова ємність екструдера/сопла	JK ⁻¹
P_h	потужність нагрівача	W
K_{en}	теплопровідний зв'язок екструдер-сопло	WK ⁻¹
h_e, h_n	коефіцієнти конвективних втрат	WK ⁻¹
T_{amb}	температура довкілля	K
$\dot{m}$	масова витрата розплаву	kg s ⁻¹
c_p	питома теплоємність матеріалу	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
T_f	температура філаменту на вході	K
q	об'ємна витрата розплаву	m ³ s ⁻¹
R, L	радіус і довжина каналу сопла	m
Δp	перепад тиску в каналі	Pa
η_{eff}	ефективна в'язкість розплаву	Pas
γ	швидкість зсуву	s ⁻¹
K, n	параметри степеневі моделі в'язкості	K: Pas ⁿ
h	висота (товщина) шару	m
ω	ширина екструдованої доріжки	m
u_{xy}	лінійна швидкість укладання в площині XY	ms ⁻¹
α	коэф. міжшарової адгезії (0–1)	–
t_{bond}, τ	ефективний час зварювання, характерний час	s
ϕ	пористість (частка незаповненого об'єму)	–
Δs	зсув шару (похибка вирівнювання)	m
T_m^e, T_m^n	виміряні температури	K
a_m	виміряні прискорення акселерометром	ms ⁻²
ϕ_k	ознаки комп'ютерного зору (кадр k)	–
$\hat{x}$	оцінка вектора стану	–
r_k, a_k	резидуал та статистика аномальності	–
Q_k	критерій якості шару	–
F_f	подача філаменту (лін. швидкість/команда)	ms ⁻¹

1 Узагальнена дискретна модель зі зворотним зв'язком:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, d_k) + w_k, \quad y_k = h(x_k, u_k) + v_k \quad (1)$$

Пояснення. Модель стану (ліва) та вимірювань (права) для дискретного кроку k .

x_k включає $[T^e, T^n, q, w, \alpha, \varphi, \Delta s, \dots]$; u_k включає $[P_h, F_f, v_{xy}, T^{n*}, \dots]$; d_k – збурення (коливання діаметра філаменту, обдув, флуктуації навколишніх умов).

w_k, v_k моделюють невизначеності; їхні коваріації налаштовують із тестових даних.

2 Теплова модель екструдера і сопла:

$$C^e = \frac{dT^e}{dt} = P_h(t) - K_{en}(T^e - T^n) - h_e(T^e - T_{amb}), \quad (2)$$

$$C^n = \frac{dT^n}{dt} = K_{en}(T^e - T^n) - h_e(T^n - T_{amb}) - \dot{m}(t)c_p(T^n - T_f), \quad (3)$$

Пояснення. Енергобаланс двох зосереджених теплових ємностей (екструдер і сопло).

Перевірка розмірностей: у (1.2) кожен доданок має одиниці W (Js⁻¹).

Чутливість: $\partial T^n / \partial \dot{m} < 0$ (більший потік $\Rightarrow$ охолодження сопла); компенсація – збільшити P_h або зменшити v_{xy} .

Типові значення PLA: $c_p \approx 1800 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $T^n \approx 460 \text{ K}$ to (numerical range) 500 K (тобто 187 °C to (numerical range) 227 °C).

3 Реологія екструзії та витрата:

$$\Delta p = \frac{8\eta_{eff}(T^n, \dot{\gamma})L}{\pi R^4} q, \quad \gamma \approx \frac{4q}{\pi R^3}. \quad (4)$$

$$\eta_{eff}(T^n, \dot{\gamma}) = K(T^n) \cdot \dot{\gamma}^{n-1}. \quad (5)$$

Пояснення. Гідродинаміка каналу сопла з псевдопластичною в'язкістю.

Ефект температури: $K(T^n)$ монотонно зменшується із зростанням T^n , полегшуючи екструзію (менший Δp при сталому q).

Обмеження механіки: якщо $\Delta p > \Delta p_{max}$, можливі буксування/зажовування філаменту; отже MPC має обмеження на q, v_{xy} .

Перевірка: у (1.4) права частина має одиниці тиску Pa.

4 Геометрія формування шару:

$$q = v_{xy} \cdot A, \quad A \approx h \cdot w, \quad (6)$$

$$w = \frac{q}{v_{xy} \cdot h}. \quad (7)$$

Пояснення. Масозбереження та робоча ширина доріжки.

Чутливість: $\frac{\partial w}{\partial q} = \frac{1}{v_{xy} \cdot h}$, $\frac{\partial w}{\partial v_{xy}} = \frac{q}{v_{xy}^2 \cdot h}$, $\frac{\partial w}{\partial h} = -\frac{q}{v_{xy} \cdot h^2}$.

Приклад: $h = 0,2 \text{ mm}$, $v_{xy} = 50 \text{ mm/s}$, ціль $\omega^* = 0,48 \text{ mm} \rightarrow q^* = v_{xy} \cdot h \cdot \omega^* = 4,8 \text{ mm}^3/\text{s}$.

Практика: для стабільності ω у замкнутому контурі комбінують корекції q (через F_f) і v_{xy} залежно від дефекту.

5 Латентні показники якості:

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\frac{t_{bond}}{\tau}\right) \quad (8)$$

$$\phi = 1 - \frac{v_{extr}}{v_{layer}}, \quad (9)$$

$$\Delta s = \sqrt{(x_{act} - x_{ref})^2 + (y_{act} - y_{ref})^2}. \quad (10)$$

Пояснення. Міри адгезії, пористості, вирівнювання.

Адгезія: збільшення t_{bond} (повільніший друк, вища T^n , обмежений обдув) $\rightarrow$ зростає α .

Пористість: $\phi \downarrow$ при збільшенні перекриття доріжок, корекції q та ω .

Зсув: великі Δs часто корелюють із піками прискорень/вібрацій у a_m .

6 Сенсорна модель:

$$T_m^e = T^e + n_T, \quad T_m^n = T^n + n_N, \quad (11)$$

$$a_m(t) = a(t) + n_a(t), \quad (12)$$

$$\phi_k = \Phi(I_k) + n_\phi. \quad (13)$$

Пояснення. Канали вимірювання: температура, інерційні сенсори, комп'ютерний зір.

Калібрування: перевірка офсетів n_T, n_N при кімнатній температурі; для зору – валідація ω на тестових патернах.

Частота: T – 10–100 Гц; a_m – 200–2000; зір – 1–10 Гц (кадри/шари).

7 Оцінювання стану (ЕКФ/UKF) і діагностика:

$$\hat{x}_{k+1} = f(\hat{x}_k, u_k) + L_k(y_k - h(\hat{x}_k, u_k)), \quad (14)$$

$$r_k = y_k - h(\hat{x}_k, u_k), \quad a_k = r_k^T S_r^{-1} r_k, \quad (15)$$

$$NIS_k = r_k^T S_k^{-1} r_k, \quad NEES_k = \hat{x}_k^T P_k^{-1} \hat{x}_k. \quad (16)$$

Пояснення. Спостерігач стану і статистики узгодженості.

NIS/NEES: метрики валідації узгодженості фільтра з моделлю шумів; корисні для автоналаштування коваріацій.

NIS (Normalized Innovation Squared) — коротка міра узгодженості за інновацією фільтра.

NEES (Normalized Estimation Error Squared) — коротка міра узгодженості за помилкою оцінки стану
Інтерпретація: систематично завищені NIS → занижений R (модель занадто довіряє сенсорам);
занижені → завищений R.

8 Виявлення та класифікація дефектів:

$$p_k^{(det)} = \text{soft max}(NN(\phi_k)) [\text{дефект}], \quad ck = \alpha \cdot \frac{\alpha_k}{\tau_a} (1 - \alpha) \cdot p_k^{(det)}. \quad (17)$$

Пояснення. Злиття «фізичної» і «візуальної» детекції в інтегральну впевненість ск.

Пороги: τ (м'які дії), τ_{hard} (аварійна пауза).. Налаштовувати на валідаційному наборі друків.

Стабільність: використовуйте гістерезис (кілька послідовних спрацьовувань) для уникнення «миготіння».

Softmax - це функція, що перетворює вектор чисел на розподіл імовірностей (сума = 1), підсилюючи найбільші значення.

9 Критерій якості шару:

$$Q_k = \omega_\phi \|e_{\phi,k}\|_2^2 + \omega_\omega (\omega_k - \omega_k^*)^2 + \omega_T (T_k^n - T_k^*)^2 + \omega_\alpha (1 - \alpha_k)^2 + \omega_\phi \phi_k^2. \quad (18)$$

Пояснення. Зважена квадратична міра якості шару.

Нормування: масштабуйте складові до порівнянних діапазонів (напр., ділення на допуски), інакше $\omega_{\{\cdot\}}$ важко тюнити.

Багатоцільовість: збільшення ω_α при завданні на міцність; збільшення ω_ω при завданні на точність геометрії.

10 Керування: MPC та адаптивні корекції:

$$\min_{\{u_{k+i}\}_{i=0}^{N-1}} \sum_{i=0}^{N-1} (Q_{k+i} + \|W_u \Delta u_{k+i}\|_2^2). \quad (21)$$

$$\text{s.t. } x_{k+i+1} = f(x_{k+i}, u_{k+i}), \quad u_{\min} \leq u_{k+i} \leq u_{\max}, \quad \Delta u_{\min} \leq \Delta u_{k+i} \leq \Delta u_{\max}, \quad (22)$$

$$F_{f,k+1} = F_{f,k} - K_\omega (\omega_k - \omega_k^*) - K_\phi 1^T e_{\phi,k}, \quad u_{xy,k+1} = u_{xy,k} + K_v (\omega_k - \omega_k^*). \quad (23)$$

Пояснення. Поєднання оптимального та адаптивного регулювання.

Розв'язання MPC: для лінеаризованої моделі → квадратичне програмування (QP) зі швидким вирішенням; warm-start з попереднього кроку.

Безпека: обов'язкові обмеження на T^n , q , v_{xy} ; жорсткі межі запобігають механічним і термічним пошкодженням.

11 Наглядач безпеки:

$$c_k > \tau_{hard} \rightarrow \text{пауза/стоп друку}; \quad \tau < c_k \leq \tau_{hard} \rightarrow \text{м'які корекції } (v_{xy} \downarrow, F_f \uparrow, T^n \uparrow). \quad (22)$$

Пояснення. Подієва логіка верхнього рівня, що перекидає MPC при ризиках.

Узагальнення моделі і часові масштаби.

Модель інтегрує фізику ((1.2)–(1.5)), геометрію ((1.6)–(1.7)), латентні якості ((1.8)–(1.10)) та інформаційні підсистеми ((1.11)–(1.13), (1.14)–(1.16), (1.17), (1.18), (1.19)–(1.22)). Швидкі контури (температура, подача, рух) працюють на 1–10 мс; оцінювання – 10–100 мс; зоровий контроль/якість – 0.5–10 с. Розділення масштабів спрощує налаштування та забезпечує стійкість.

Запропонована модель описує FDM-процес як нелінійну дискретну систему зі станом x_k , керуванням u_k та вимірюваннями y_k : $x_{k+1} = f(x_k, u_k, d_k) + w_k$, $y_k = h(x_k, u_k) + v_k$. «Об'єкт» (принтер) розкладено на фізичні підмоделі: теплову (динаміка T^e, T^n), реологічну/витратну (в'язкість η_{eff} , тиск Δp , витрата q), геометрію шару (зв'язок q, v_{xy}, h, w) та латентні показники якості (α — адгезія, ϕ — пористість, Δs — зсув). Сенсорна модель формалізує вимірювання температур, вібрацій/IMU і зображень. Для злиття моделі та даних використовується EKF (Extended Kalman Filter) — розширений фільтр Калмана, що лінеаризує f, h навколо поточної оцінки за допомогою якобіанів, або UKF (Unscented Kalman Filter) — варіант без лінеаризації, який пропускає «сигма-точки» крізь f, h і краще відтворює нелінійну статистику. Виходом спостерігача є оцінка стану $\hat{x}_k$ і діагностичні резидуали, які підживлюють модулі виявлення дефектів і керування.

Дані сенсорів та $\hat{x}_k$ аналізує блок детекції, який комбінує ознаки комп'ютерного зору і резидуали, класифікує аномалії (недо/переекструзія, зсув, перегрів) і обчислює критерій якості шару Q_k . На цій основі працює MPC (Model Predictive Control) — модельно-прогнозний контролер, що на кожному кроці розв'язує оптимізацію на ковзному горизонті: мінімізує майбутні втрати якості (напр., відхилення w, T^n, α, ϕ) за динаміки $f(\cdot)$ і з урахуванням обмежень (межі температур, тиску/витрати, швидкостей). Для швидких відхилень додаються адаптивні корекції (прямі підстроювання подачі/швидкості за похибкою ширини доріжки чи візуальних ознак). Наглядач безпеки — верхній рівень, який контролює «жорсткі» пороги (наприклад, T , струм, c_k — впевненість у дефекті) і за потреби переведе систему на безпечне керування u_{safe} (пауза/стоп чи щадні режими). Логіка контуру така: еталон (G-code, допуски) → MPC/адаптація → виконавчі органи → об'єкт → сенсори → EKF/UKF → детекція/якість → зворотний зв'язок до MPC, тоді як модуль безпеки постійно наглядає та перехоплює керування у критичних ситуаціях.

Опис алгоритму замкненої математичної моделі контролю якості FDM-друку, узгоджений із математичною моделлю.

Алгоритм описує багаторівневий замкнутий контур: еталон → (MPC+адаптація) → виконавчі органи → об'єкт із фізичними підмоделями (тепло–реологія–геометрія–латентна якість) → сенсори → (EKF/UKF) → детектор/критерій якості → зворотний зв'язок до контролера, тоді як наглядач безпеки моніторить процес і при ризиках примусово переводить систему у безпечний режим.

1) Задання / G-code (еталон)

Роль. Джерело цілей: геометрія деталі, траєкторія, допуски та технологічні обмеження.

Вихідні сигнали. Бажані профілі/обмеження для внутрішніх контурів і показників якості: T_n^* , висота шару h , цільова ширина доріжки w^* , швидкість v_{xy}^* , тощо. Також — ваги у критеріях якості й обмеження для MPC.

Відповідність моделі. Узагальнена постановка станів/вимірювань (state-space) (ss).

2) Контролер (MPC + адаптація)

Входи. Еталон/обмеження з блоку 1; оцінка стану $\hat{x}$ від EKF/UKF; сигнал якості Q_k та/або тип дефекту від детектора.

Виходи. Вектор керувань $u=[F_f, v_{xy}, P_h, T_n^*]$: подача філаменту, швидкість укладання, потужність нагрівача, уставка температури сопла.

Закон керування. На кожному кроці розв'язується задача модельно-прогнозного керування:

- функціонал мінімізує втрати якості та зміни керувань (mpc_cost),

- обмеження на динаміку та технологічні межі (mpc_const).

Паралельно діють адаптивні корекції для швидкого підстроювання, наприклад:

$$F_{f,k+1} = F_{f,k} - K_w(w_k - w_k^*) - K_\phi 1^T e_{\phi,k},$$

$$v_{xy,k+1} = v_{xy,k} + K_v(w_k - w_k^*)(\text{adaptive}).$$

3) Наглядач безпеки (safety observer)

Входи. $\hat{x}$, вимірювання y , команда u , індикатор дефекту/довіри c_k .

Функція. Високопріоритетний сторож: стежить за межами температур/струмів/тисків і порогами якості.

Дії. Якщо $c_k > \tau_{\text{hard}}$ чи порушено безпеку — блокує звичайне керування та формує безпечні дії u_{safe} (пауза/стоп, зниження швидкості, скидання нагрівачів) (safety).

Вихід. На виконавчі органи надсилається або u , або u_{safe} .

4) Виконавчі органи

Що керується. Приводи XYZ, екструдер (подача F_f), нагрівачі (потужність P_h , уставка T_n^*), вентилятор.

Вихід. Фізичний вплив на об'єкт (принтер) — реалізація керувань у матеріальному процесі.

5) Об'єкт керування: FDM-принтер (з вкладеними підмоделями)

Контейнерний блок «Процес», що перетворює керування у стан друку.

5.1 Теплова підмодель

Дві зосереджені ємності: екструдер T^e і сопло T^n .

Рівняння енергобалансу: (thermal_e, thermal_n)

Пояснення: нагрів P_h , теплопровідність між вузлами K_{en} , конвекційні втрати h_e, h_n , охолодження потоком $\dot{m} \cdot c_p$.

5.2 Реологія/витрата

Зв'язок перепаду тиску Δp , витрати q , геометрії сопла (Гаген–Пуазейль) і неньютонівської в'язкості (степеневий закон): (poiseuille, powerlaw).

Вплив: $K(T^n) \downarrow$ при $T^n \uparrow \rightarrow$ легше екструдувати; обмеження Δp_{max} .

5.3 Геометрія формування шару

Баланс об'єму:

$$q = v_{xy} \cdot A, A \approx h \cdot w \rightarrow w = \frac{q}{v_{xy} \cdot h} (\text{massbalance, width}).$$

Це дає вихідну геометрію доріжки (ширина) для контролю якості.

5.4 Латентні показники якості:

- міжшарова адгезія $\alpha = 1 - \exp(-t_{\text{bond}}/\tau)$ (adhesion),

- пористість $\varphi = 1 - \frac{V_{\text{extr}}}{V_{\text{layer}}}$ (porosity),

- зсув шару Δs (shift).

Це внутрішні якості, що прямо впливають на міцність і точність.

6) Сенсори (вимірювальні канали)

Термальні: $T_m^e = T^e + n_T$, $T_m^n = T^n + n_N$ (tempmeas).

Інерційні/вібраційні: $a_m = a + n_a$ (acc).

Візуальні/сканування: ознаки $\phi_k = \Phi(I_k) + n_\phi$ (vision).

Вихід. Вектор вимірювань u для оцінювача/детектора.

7) Оцінювач стану (EKF/UKF)

Призначення. Злиття моделі та сенсорів для отримання згладженої оцінки $\hat{x}$ діагностичних залишків.

Рекурсія спостерігача: (ekf); резидуал та статистики аномальності/узгодженості a_k , NIS, NEES (residual, nis-nees)

Вихід. $\hat{x}$ на контролер і детектор; a_k — на детекцію.

8) Детектор дефектів + критерій якості

Детекція/класифікація. NN/ML над візуальними ознаками з урахуванням резидуалів $\rightarrow$ імовірність дефекту $p_k^{(\text{def})}$ і злитий показник впевненості c_k (fusion).

Критерій якості шару.

$$Q_k = w_\phi \|e_{\phi,k}\|_2^2 + w_w (w_k - w_k^*)^2 + w_T (T_k^n - T_k^{n*})^2 + w_\alpha (1 - \alpha_k)^2 + w_\phi \phi_k^2(\text{quality}).$$

Вихід. Q_k і/або тип дефекту $\rightarrow$ контролер; $c_k \rightarrow$ наглядач безпеки.

9) Зворотний зв'язок і цикл роботи

1. Принтер формує шар за керуваннями u .
2. Сенсори зчитують $y \rightarrow$ EKF/UKF обчислює $\hat{x}$, резидуали a_k .
3. Детектор оцінює $p_k^{(\text{def})}$, формує c_k та обчислює Q_k .
4. Контролер (MPC) мінімізує майбутні втрати якості (з урахуванням обмежень), **плюс** вносить швидкі адаптивні корекції (за w , ознаками зору).
5. Наглядач безпеки перевіряє пороги: якщо $c_k > \tau_{\text{hard}}$ або порушено межі — переходить на u_{safe} .
6. Цикл повторюється на наступному кроці/шарі.

10) Сигнали та інтерфейси (коротко).

Еталон/обмеження $\rightarrow$ Контролер: цілі якості, T_n^* , w^* , h , допуски.

Контролер $\rightarrow$ Виконавчі органи: $u = [F_x, v_{xy}, Ph, T_n^*]$.

Виконавчі $\rightarrow$ Об'єкт: фізична реалізація керувань.

Об'єкт $\rightarrow$ Сенсори: вимірювання y (температури, вібрації, зображення).

Сенсори $\rightarrow$ EKF/UKF: дані для оцінки $\hat{x}$.

EKF/UKF $\rightarrow$ Детектор/Контролер: $\hat{x}$, a_k .

Детектор $\rightarrow$ Контролер/Безпека: Q_k , тип дефекту; c_k (для safety).

Безпека $\rightarrow$ Виконавчі: переключення між u та u_{safe} .

11) Часові масштаби (для налаштування)

Внутрішні контури (температура, подача, рух): 1–10 мс.

EKF/UKF і сенсорне злиття: 10–100 мс.

Візуальна детекція/оцінка якості: 0,5–10 с (шар/сегмент).

Розділення масштабів усуває взаємне збурення контурів і спрощує тюнінг.

Приклади реалізації промислових систем контролю якості 3D-друку.

Розвиток комерційних FDM-принтерів останнього покоління вже втілює багато з описаних вище концепцій. Розглянемо коротко кілька прикладів: високошвидкісний принтер Bambu Lab X1-Carbon, новітній Creality K1 Max та програмно-апаратну платформу Obico (раніше відому як The Spaghetti Detective). Кожна з них має власну реалізацію замкнутих контурів контролю якості, і їх порівняння дає уявлення про сучасний стан впровадження цієї технології.

Bambu Lab X1-Carbon. Цей принтер преміум-класу оснащено відразу кількома системами моніторингу. По-перше, він має вбудовану камеру і спеціалізований процесор (NPU) для AI-аналізу зображень у реальному часі [9]. Кожні кілька секунд камера робить знімок області друку, і нейронна мережа аналізує його на предмет появи дефектів типу «спагеті» (хаотичних клубків філаменту, що виникають при відриві нитки) [9]. Якщо мережа з достатньою впевненістю виявляє таку аномалію на послідовності кадрів, принтер автоматично ставить друк на паузу [9]. Таким чином реалізовано зворотний зв'язок: дефект – зупинка процесу, щоб уникнути подальшого браку і шкоди. Користувач отримує повідомлення і може втрутитися. По-друге, X1-Carbon має систему Micro LiDAR – мікролазерний далекомір, що виконує сканування поверхні платформи та першого шару з точністю до кількох мікрометрів [9]. Перед друком ця система перевіряє рівність платформи (виконується авто-калібрування подвійним методом: за допомогою LiDAR і додаткового датчика сили) [9]. Після початку друку LiDAR сканує перший надрукований шар: вимірює висоту та ширину покладених ниток по всій поверхні і порівнює з очікуваними значеннями. На основі цього вносяться корективи – наприклад, якщо в якійсь області шар вийшов занадто тонким (нитка притиснута, значить сопло було занадто низько або мало матеріалу), система підніме трохи сопло і/або збільшить подачу філаменту в тих зонах [9]. Власне, у звітах принтера видно карту першого шару: позначено ділянки, де шар вищий або нижчий від норми, і виконано відповідне регулювання. Це і є реалізація замкнутого контуру якості на рівні першого шару – критичного для успішності всього друку. Окрім того, Bambu Lab X1C використовує акселерометри для автонастроювання механіки (вимірювання резонансів для системи Input Shaping, що зменшує вібрації і покращує якість поверхонь при високій швидкості). Хоча ця функція не працює як зворотний зв'язок під час друку, вона автоматично калібрує систему перед друком, теж покращуючи якість. Всі ці засоби роблять X1-Carbon одним із найбільш «розумних» принтерів: він автономно контролює ключові аспекти якості і мінімізує участь користувача. Недоліком можна вказати відносну закритість екосистеми – алгоритми Bambu Lab є пропрієтарними і працюють лише на рідному обладнанні.

Creality K1 Max. Це один з нових конкурентів на ринку високошвидкісних FDM-принтерів, який переймає багато рішень у Bambu Lab. Модель K1 Max оснащена лазерним LiDAR-датчиком для догляду за першим шаром та AI-камерою для контролю друку [9]. LiDAR (лазерний далекомір) у K1 Max має роздільну здатність близько 1 мкм і так само сканує перший шар. Якщо виявлено проблеми – погану адгезію, нерівномірний шар – принтер ставить друк на паузу і повідомляє користувача [9]. Тобто Creality зробила дещо інший крок: замість автоматичного коригування параметрів, принаймні на першому шарі, принтер просто зупиняється, надаючи користувачу можливість виправити (можливо, почистити платформу чи підправити налаштування) [9]. AI-камера в K1 Max виконує схожу функцію, як у Bambu: вона слідує за появою типових збоїв – ниток «спагеті», сторонніх об'єктів чи відокремлення деталей [9]. У разі виявлення таких проблем

система або ставить друк на паузу, або надсилає сигнал користувачу (через додаток Creality Cloud) [9]. Таким чином, K1 Max реалізує замкнений цикл контролю якості переважно у режимі виявлення і сповіщення. Автоматичної корекції параметрів (як то зміни потоку чи швидкості) він, за наявними даними, не виконує, окрім хіба що автокалібрування початкових параметрів перед друком. Але навіть це значно покращує надійність друку: багато користувачів відмічають, що більшість помилок (поганий перший шар або «спагеті») були припинені і не призвели до зіпсованих деталей, економлячи час і матеріал. K1 Max також позиціонується як більш відкритий до користувацьких модифікацій (можна переключити на альтернативну прошивку Klipper), хоча тоді, можливо, втрачається підтримка фірмових AI-функцій creality.com.

Obico (The Spaghetti Detective). Це підхід дещо іншого плану – програмна платформа з відкритим кодом, яка додає інтелектуальний контроль якості до практично будь-якого 3D-принтера, використовуючи зовнішню камеру та хмарні обчислення. Obico працює як плагін до OctoPrint або Klipper, отримуючи фотознімки процесу і аналізуючи їх за допомогою неймережі на предмет різноманітних збоїв. Система спеціалізується на виявленні «спагеті» – коли друк пішов неправильно і замість моделі екструдер намотує клубки пластика у повітрі [9]. При виявленні проблеми Obico може автоматично поставити принтер на паузу (через OctoPrint API) та/або надіслати користувачу повідомлення (email, push тощо) з фотографією проблеми [9]. Користувач може переглянути зображення і вирішити, чи продовжувати друк чи скасувати його. Таким чином, Obico реалізує зворотний зв'язок за принципом «людина в контурі»: автоматична система зупиняє і сигналізує, а людина приймає кінцеве рішення. Це обумовлено тим, що 100% точність розпізнавання гарантувати важко, і краще перестраховатися, залучивши оператора. Однак Obico не стоїть на місці – команда розробників впроваджує нові функції. Одне з останніх нововведень – Nozzle Ninja, окрема неймережа, що аналізує перший шар друку [9]. Для цього використовується маленька камера, встановлена біля сопла, яка крупним планом знімає перший шар, а після його завершення алгоритм оцінює якість: рівномірність укладання, адгезію, відсутність пробілів чи зайвого матеріалу [9]. Результат оцінюється у вигляді оцінки (наприклад, A, B, C ...) і детального звіту з підказками, що було не так (наприклад, «замалий зазор – сопло надто низько» або «недостатня екструзія в цій ділянці») [9]. Користувач отримує це в додатку чи на email відразу після друку першого шару [9]. Хоча поки що Obico не автоматизує зміну налаштувань, такий оперативний зворотний зв'язок дає можливість вчасно зупинити друк і виправити проблему (знову ж вручну) – що по суті теж замикає контур якості, тільки із людиною як контролером. Платформа Obico приваблива тим, що вона не прив'язана до конкретного принтера – потрібна лише камера і підключення до інтернету. Це робить її гнучким рішенням, особливо для ентузіастів та малих виробництв, де є багато різних моделей принтерів.

Комерційні виробники вже впроваджують елементи замкнених систем контролю: передусім, це стосується моніторингу першого шару (що критично для подальшого успіху друку) та виявлення катастрофічних збоїв типу клубків «спагеті». При цьому повністю автоматична корекція параметрів поки реалізована обмежено – здебільшого система втручається шляхом зупинки процесу та повідомлення користувача. Це зумовлено прагненням безпеки та страхом помилкових спрацьовувань: краще призупинити, ніж продовжити з неправильними поправками. Втім, дослідницькі прототипи (як описано у попередніх розділах) демонструють, що і повна автоматизація можлива і дає гарні результати [1,3]. Можна очікувати, що з розвитком довіри до AI та нагромадженням достатніх баз даних помилок, майбутні прошивки 3D-принтерів зможуть вносити виправлення самостійно (наприклад, збільшувати потік при ознаках неоекструзії), з мінімальним ризиком нашкодити.

Висновки

У статті розроблено та докладно описано математичну модель замкнутої системи контролю якості процесу FDM 3D-друку. Модель включає багато-рівневу структуру з внутрішніми контурами керування (позиційним, екструзійним, температурним) та зовнішнім контуром якості, що базується на зворотному зв'язку від сенсорів (оптичних, лазерних тощо). Така система здатна в режимі реального часу виявляти відхилення у процесі друку (втрата кроків, недоподача матеріалу, дефекти укладання шарів) і автоматично коригувати параметри для їх усунення. Теоретичний аналіз та дані літератури підтверджують ефективність підходу: замкнений контроль подачі філаменту дозволяє практично ліквідувати неоекструзію і пов'язані з нею дефекти щільності та міцності виробів [1]; застосування візуального контролю шарів дає можливість своєчасно виявляти дефекти поверхні і підтримувати високу точність геометрії [3–5]. Елементи запропонованої моделі вже реалізовані на практиці і забезпечують зниження відсотку бракованих друків та економію ресурсів. Зокрема, інтеграція AI-камер і LiDAR-сканерів у 3D-принтери стала важливим кроком до повністю самокоригувальних адитивних систем.

Водночас, повномасштабне впровадження замкнених систем контролю якості FDM стикається з викликами. Серед них – складність математичного моделювання всіх аспектів процесу друку (реологія розплаву, адгезія шарів, теплові напруження тощо) та обробки великого обсягу даних від сенсорів у режимі реального часу. Необхідно забезпечити стабільність і швидкодію контурів керування, аби корекція не викликала нових коливань чи артефактів. Питання довіри до автоматичних рішень теж важливе: користувачі мають бути впевнені, що система не «виправить» те, що не було поламаним (мінімізувати хибні спрацьовування). Тому на нинішньому етапі часто реалізують напівзамкнені системи, де останнє слово залишається за людиною (пауза і підтвердження дії).

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку включають вдосконалення моделей машинного навчання для точнішого розпізнавання дефектів друку, розвиток стандартних інтерфейсів для додавання

датчиків до принтерів, а також розробку уніфікованих алгоритмів корекції, що можуть бути адаптовані під різні матеріали і режими друку. Математична модель, представлена в цій статті, може слугувати основою для імітаційного моделювання і випробування різних стратегій керування перед їхньою реалізацією на фізичному обладнанні. Загальний висновок – запровадження замкнених систем контролю якості є наступним кроком еволюції FDM 3D-друку, що дозволить перетворити його з мистецтва, залежного від майстерності оператора, на надійний промисловий процес з прогнозованими результатами.

Література

1. Moretti M., Rossi A. Closed-loop filament feed control in fused filament fabrication. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 500–513.
2. Weiss B., Storti D. W., Ganter M. A. та ін. Low-cost closed-loop control of a 3D printer gantry. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, vol. 21, no. 5, pp. 482–490.
3. Liu C., Law A. C. C., Roberson D., Kong Z. Image analysis-based closed-loop quality control for additive manufacturing with fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, vol. 51, pp. 75–86.
4. Behseresht S., Love A., Valdez-Pastrana O. A., Hassanpour Y. Enhancing FDM precision with serial communication-driven closed-loop control and image analysis for fault diagnosis-correction. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 7, art. 1459.
5. Narayanan B. N., Beigh K., Loughnane G. та ін. SVM and CNN based approaches for defect detection in FFF additive manufacturing. *Proceedings of SPIE*, vol. 11139: *Applications of Machine Learning*.
6. Mercado Rivera F. J., Rojas Arciniegas A. J. Additive manufacturing methods: Techniques, materials, and closed-loop control applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 109, pp. 17–31.
7. Soriano Heras E., Blaya Haro F., de Agustín del Burgo J. M. та ін. Filament advance detection sensor for fused deposition modelling 3D printers. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 5, p. 1495.
8. Soriano Heras E., Blaya Haro F., de Agustín del Burgo J. M. та ін. Filament advance detection sensor for fused deposition modelling 3D printers. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 5, p. 1495.
9. Kousiatza C., Karalekas D. In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process. *Materials & Design*, 2016, vol. 97, pp. 400–406.
10. AI Failure Detection in 3D Printing – Obico Blog. Електронний ресурс. 2023.
11. Bambu Lab Wiki – Spaghetti Detection & LiDAR. Електронний ресурс. 2023.

References

1. Moretti M., Rossi A. Closed-loop filament feed control in fused filament fabrication. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 500–513.
2. Weiss B., Storti D. W., Ganter M. A. та ін. Low-cost closed-loop control of a 3D printer gantry. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, vol. 21, no. 5, pp. 482–490.
3. Liu C., Law A. C. C., Roberson D., Kong Z. Image analysis-based closed-loop quality control for additive manufacturing with fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, vol. 51, pp. 75–86.
4. Behseresht S., Love A., Valdez-Pastrana O. A., Hassanpour Y. Enhancing FDM precision with serial communication-driven closed-loop control and image analysis for fault diagnosis-correction. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 7, art. 1459.
5. Narayanan B. N., Beigh K., Loughnane G. та ін. SVM and CNN based approaches for defect detection in FFF additive manufacturing. *Proceedings of SPIE*, vol. 11139: *Applications of Machine Learning*.
6. Mercado Rivera F. J., Rojas Arciniegas A. J. Additive manufacturing methods: Techniques, materials, and closed-loop control applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 109, pp. 17–31.
7. Soriano Heras E., Blaya Haro F., de Agustín del Burgo J. M. та ін. Filament advance detection sensor for fused deposition modelling 3D printers. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 5, p. 1495.
8. Soriano Heras E., Blaya Haro F., de Agustín del Burgo J. M. та ін. Filament advance detection sensor for fused deposition modelling 3D printers. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 5, p. 1495.
9. Kousiatza C., Karalekas D. In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process. *Materials & Design*, 2016, vol. 97, pp. 400–406.
10. AI Failure Detection in 3D Printing – Obico Blog. Elektronnyi resurs. 2023.
11. Bambu Lab Wiki – Spaghetti Detection & LiDAR. Elektronnyi resurs. 2023.