

**Невлюдов І.Ш.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Нікітін Д.О.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Стрілець Р.Є.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Валюженич О.О.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНИМ 3D-ДРУКОМ

Стаття присвячена дослідженню проблеми автоматизації процесів фотополімерного 3D-друку, що на сучасному етапі набуває особливої актуальності у зв'язку з широким розповсюдженням адитивних технологій у різних галузях промисловості. У статті розкрито особливості застосування 3D-друку не лише для створення прототипів чи одиничних виробів, а й у серійному виробництві, що зумовлює зростаючі вимоги до ефективності, стабільності та надійності технологічних процесів. Розглянуто необхідність зменшення частки ручних операцій, серед яких завантаження матеріалу чи вилучення готових виробів, та доведено, що найбільш критичним завданням є забезпечення автоматизованого контролю якості деталей у процесі друку. З'ясовано, що стандартні 3D-принтери, які за своєю природою є верстатами з числовим програмним керуванням, виконують більшість операцій автоматично, однак залишаються залежними від оператора у питаннях контролю відповідності параметрів якості. Визначено, що відсутність системи зворотного зв'язку призводить до необхідності застосування оптичного нагляду, що унеможливує повноцінний моніторинг процесу для ряду фотополімерних технологій, зокрема SLA, DLP, LCD, SLM, PolyJet, MJ. Розкрито ключову проблему, яка полягає в тому, що модель у початкових етапах друку повністю занурена у фотополімерну смолу, що не дозволяє здійснювати візуальний контроль. Доведено, що це створює ризики пізнього виявлення дефектів, коли друк триває безперервно протягом декількох годин або навіть діб, а виявлення браку можливе лише після завершення виготовлення. У статті визначено перспективи створення систем автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком, здатних забезпечити моніторинг якості виробів у реальному часі, а також регулювання параметрів процесу залежно від властивостей фотополімеру та геометрії моделі. З'ясовано, що впровадження таких систем дозволить значно підвищити продуктивність технології, скоротити час виготовлення деталей, знизити ймовірність браку та покращити відтворюваність результатів. Розкрито напрями застосування фотополімерних технологій у медицині, ювелірній справі, приладобудуванні та ливарному виробництві, де автоматизація контролю має принципове значення для забезпечення високої якості кінцевих виробів.

Таким чином, у статті доведено, що розробка системи автоматизованого керування процесами фотополімерного 3D-друку є актуальною та необхідною науково-технічною задачею. Її реалізація сприятиме інтеграції адитивних технологій у масштабне промислове виробництво, забезпечить підвищення ефективності виробничих процесів і відкриє нові можливості для розвитку сучасних галузей промисловості.

**Ключові слова:** 3D-друк, фотолітографія, LCD, система керування технологічним процесом, моделювання, адитивне виробництво, виробництво.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на активний розвиток адитивних технологій, фотополімерний 3D-друк залишається складним у керуванні процесом затвердіння матеріалу під дією світлового випромінювання. В існуючих системах відсутні універсальні алгоритми, що забезпечують автоматичний контроль параметрів друку, таких як інтенсивність та тривалість експонування, товщина шару, швидкість переміщення платформи, а також рівномірність полімеризації по всій робочій площині. Крім конструктивних рішень обладнання, необхідно також визначити аналітичні залежності між технологічними параметрами експонування, оптичними характеристиками фотополімеру, точністю відтворення геометрії моделі та механічними властивостями готового виробу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фотополімерний 3D-друк на основі LCD-технології стрімко розвивається завдяки своїй здатності забезпечувати високу точність та деталізацію виготовлених моделей. Якість результату друку при цьому значною мірою залежить від ефективної роботи системи керування – апаратно-програмного комплексу, що забезпечує синхронізацію всіх елементів друку.

Якісні показники цієї системи визначаються рядом критеріїв, таких як точність позиціонування, стабільність температурного режиму, ефективність контролю експозиції, швидкість друку та здатність до повторюваного відтворення моделей. Для подальшої роботи необхідно розглянути кожен із цих аспектів, наведемо приклади з досліджень та висвітлимо підходи до оптимізації системи керування [1, 2].

**Точність позиціонування.** Одним із ключових показників системи керування є її здатність забезпечувати точне та стабільне позиціонування платформи друку з виробом, що друкується, та оптичної системи. У фотополімерному друці навіть незначне відхилення по координатах може спричинити розмиття шарів, деформації геометрії та втрату дрібних деталей [3, 4].

Сучасні принтери зазвичай оснащуються лінійними направляючими з високою точністю та кроковими двигунами, які керуються мікроконтролером. Забезпечення точності до 5-10 мікронів є критично важливим, особливо для моделей з великою кількістю дрібних елементів. Важливо також враховувати зворотний зв'язок системи – наявність датчиків положення дозволяє контролювати рух платформи та своєчасно реагувати на механічні або програмні відхилення. Також до проблем позиціонування можна віднести занадто сильне прилипання виробу,

що друкується до прозорого матеріалу дна ванни, що може призвести до пропуску шарів та подальшого відривання виробу від платформи.

З точки зору теорії автоматичного управління цей параметр описується як статична похибка системи. Вона виникає при перехідних процесах або в усталеному режимі, коли вихід не точно відповідає заданому значенню. Типовою моделлю є система з керуванням положенням (наприклад, положення платформи по осі Z). Передаточна функція включає пропорційне, інтегральне або ПІД-регулювання для зменшення похибки. Ціллю оптимізації є мінімізація усталеної похибки до нуля ( $\epsilon \rightarrow 0$ ) або зменшити її до допустимого рівня. Для практичної реалізації можливе застосування датчиків положення та ПІД-регулятора дозволяє точно тримати координати, навіть при змінному навантаженні та зміні швидкості руху.

Стабільність температурного режиму. Температура фотополімерної смоли має незначний вплив на її в'язкість, швидкість полімеризації та якість затвердіння шарів. Надмірне охолодження уповільнює реакцію та спричиняє неповне затвердіння, тоді як перегрів – до передчасної полімеризації, розширення смоли, утворення бульбашок та інших дефектів. Всі ці явища є незначними але висока температура досить сильно впливає на плівкові матеріали дна ванни. При підвищенні температури збільшується адгезія між плівкою дна ванни та виробом, що друкується. Це також може збільшити вірогідність відриву виробу від платформи [5]. З точки зору теорії автоматичного управління це класичне завдання регулювання температури як керованого параметра. Математична модель може бути представлена як диференціальне рівняння теплопередачі, яке описується передаточною функцією низькопропускового фільтра. Система керування це ПІ або ПІД-регулятор з використанням датчиків (наприклад, термістора) для вимірювання температури. Критеріями керування є мала перерегуляція, короткий час перехідного процесу, висока стійкість. Реалізація контролера зворотного зв'язку дозволяє підтримувати температуру смоли в межах  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , незважаючи на зовнішні збурення.

Контроль експозиції включає в себе як тривалість, так і інтенсивність УФ-випромінювання. Неправильно підібрані параметри можуть призвести до недополімеризованих шарів (що знижує механічну міцність виробу) або до «пересвічування» (викликає розтікання полімеру за межі потрібного контуру). Система керування повинна мати можливість точно задавати час експозиції для кожного шару, а також інтенсивність світла – зазви-

чай це реалізується через широтно-імпульсну модуляцію (PWM) світлодіодів або цифрове керування драйверами. Деякі системи додатково реалізують зворотний зв'язок від фотодатчиків, що дозволяє автоматично коригувати світловий потік при зміні зовнішніх умов або старінні світлодіодів [6, 7].

З точки зору теорії автоматичного управління це керування інтенсивністю впливу на об'єкт (енергетичним параметром), часто моделюється як система з інтегруючим елементом. Модель можна представити як реакцію світлочутливої смоли на енергію світла – інтегральна залежність (кумулятивний ефект). Реалізація виконується формуванням широтно-імпульсної модуляції сигналу (ШІМ) з фіксованою або змінною частотою.

Метою є дозування подачі енергії, яка відповідає необхідному ступеню полімеризації (контроль за часом інтеграції). Контролер задає точний час експозиції, а фотодатчики контролюють яскравість світла, утворюючи контур зворотного зв'язку. Швидкість друку. Швидкість друку визначає продуктивність пристрою, проте не повинна досягатися за рахунок погіршення якості. Система керування дозволяє налаштувати індивідуальні параметри для різних типів моделей: висота шару, швидкість підйому платформи, паузи між шарами тощо. Додатково впроваджується динамічна адаптація швидкості в залежності від площі експонованої області – якщо шар містить велику суцільну поверхню, необхідно дати більше часу для її затвердіння [8].

З точки зору теорії автоматичного управління це показник динаміки системи, що характеризує швидкість досягнення нового стану. Критеріями якості є час перехідного процесу ( $t_p$ ), перерегулювання ( $\sigma$ ), аперіодичність. Оптимізація являє собою компроміс між швидкістю та стабільністю; надто швидка система може втрачати стабільність. Для реалізації застосовуються адаптивні алгоритми, які корегують швидкість друку в реальному часі залежно від площі шару або складності геометрії. Відтворюваність результатів. Якість 3D-друку визначається не лише окремими вдалимими результатами, а й здатністю стабільно повторювати їх. Для цього система керування повинна включати в себе збереження параметрів сеансів, автоматичну діагностику та відновлення процесу після збою. Наявність інтерфейсів для збереження логів, підключення до мережі та моніторингу в реальному часі дозволяє не лише виявляти проблеми, а й навчати систему на основі попередніх результатів [9, 10].

З точки зору теорії автоматичного управління даний показник описується через робастність –

здатність системи зберігати стійкість і точність при зміні параметрів або збуреннях. Модель є нечіткою визначеною системою з параметричною невизначеністю. Для реалізації використовується підхід з побудовою адаптивних систем управління або застосуванням стійких регуляторів (робастне ПІД-керування). Практична реалізація забезпечується автоматичним калібруванням, логуванням параметрів, виявленням збоїв, самодіагностикою – все це підвищує робастність системи друку.

Якісна система керування є критичним елементом для досягнення високої точності, стабільності та надійності у фотополімерному LCD-друці. Інтеграція апаратних і програмних рішень, включаючи системи зворотного зв'язку, температурний контроль, гнучкі налаштування експозиції та адаптивну швидкість друку, значно покращує результати. Тільки завдяки детальному аналізу всіх складових можна створити систему, яка забезпечить конкурентоспроможну якість друку [5].

Проведений аналіз джерел інформації, аналіз особливостей технології фотополімерного 3D-друку та системи керування фотополімерного 3D-друку, матеріалів, що використовуються в цій технології та показників якості як системи керування так і якісні показники фотополімерного 3D-друку, що дозволило визначити недоліки технологічного процесу фотополімерного друку та системи керування:

- використання великої кількості різноманітних фотополімерів з різними фізичними та хімічними властивостями викликає необхідність визначення технологічних параметрів для кожного фотополімеру;

- обрані методи керування мають велику складність контролю друку в реальному часі та необхідність присутності людини для оцінки якості друку та подальшої обробки моделі;

- велика кількість технологічних параметрів мають значний вплив на якісні показники друкованих моделей (відхилення розмірів, наявність дефектів).

Тобто технологія фотополімерного друку, незважаючи на значний розвиток та набуття поширеності у різних сферах використання, потребує подальшого вдосконалення методів автоматизованого контролю, систем керування фотополімерного 3D-друку, визначення показників якості системи керування та фотополімерного 3D-друку з подальшим їх аналізом та дослідженням для розробки методів та засобів автоматизованих систем керування адитивною технологією фотополімерного 3D-друку.

**Виклад основного матеріалу.** Для розробки системи автоматизованого керування процесом відривом фотополімерної моделі від плівки необхідно визначити основні складові елементи цієї системи керування.

Для цього необхідно розробити схему системи керування технологічним процесом фотополімерного друку [11, 12]. Загальна структура автоматизованої системи керування передбачає забезпечення контролю та стабільності основних показників якості надрукованих деталей, зокрема шорсткості поверхні та відповідності геометричних розмірів заданим.

Загальна схема автоматизованого керування процесом фотополімерного 3D-друку зображено на рис. 1.

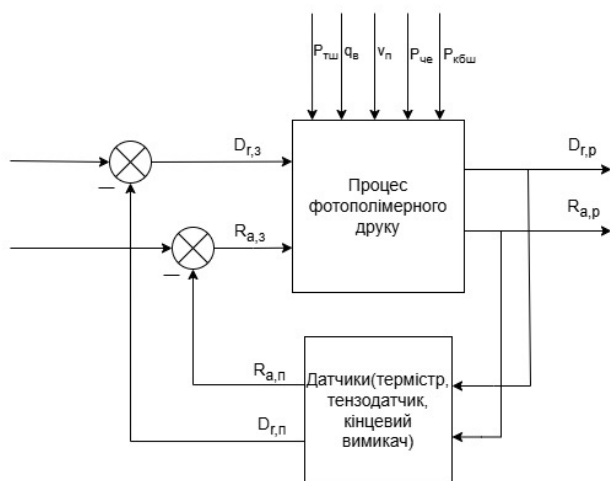


Рис. 1. Загальна схема керування процесом фотополімерного друку

Загальна схема автоматизованого керування передбачає порівняння за допомогою датчиків зворотнього зв'язку (термістор, тензорезистор, кінцевий вимикач) заданих показників якості друку (шорсткості поверхні  $R_a$ , точності збереження заданих розмірів  $Dr$ ) з вихідними та подальшим їх корегуванням. На систему керування впливають технологічні параметри, які задаються у слайсері, такими параметрами є кількість базових шарів, товщина шару, час експонування, швидкість руху платформи та інші характеристики. Математично структура моделі має наступний вигляд:

$$D_{r,p}, R_{a,p} = F(D_{r,z}, R_{a,z}, P_{тш}, q_v, v_p, P_{че}, P_{кбш}) \quad (1)$$

де,  $D_{r,p}$  – отримані розміри деталі;  $R_{a,p}$  – отримана шорсткість деталі;  $D_{r,z}$  – задані розміри деталі;  $R_{a,z}$  – задана шорсткість деталі;  $P_{тш}$  – параметри товщини шару;  $q_v$  – інтенсивність експонування УФ світлодіода;  $v_p$  – параметри швидкості пере-

міщення платформи;  $P_{че}$  – параметри часу експонування;  $P_{кбш}$  – параметри кількості базових шарів.

Виходячи із загальної структури САК ТП фотополімерного друку можливо визначити основні складові АСК ТП фотополімерного друку. До складу АСК ТП входять наступні забезпечення [13, 14]:

- функціональне забезпечення, яке відповідає за формування УФ випромінювання, формування зображення на екрані(маски), перемішування та визначення розташування платформи по осі Z;

- інформаційне забезпечення, відповідає за технологічні параметри, що задаються в слайсері перед друком і впливають на технологічний процес, такими параметрами є час експонування, швидкість переміщення, товщина шару, кількість базових шарів та ін.;

- математичне забезпечення охоплює математичні моделі процесу друку, в результаті аналізу та моделювання у першому та другому розділі було визначено, що для покращення характеристик процесу друку необхідно врахувати розроблену регресійну модель відхилень розмірів від технологічних параметрів, модель керування за силою відриву та САК процесу відриву від температури;

- алгоритмічне забезпечення містить алгоритм перемішування, алгоритм визначення сили відриву від площі в процесі друку, алгоритм експонування шару, алгоритм визначення початкового положення платформи;

- технічне забезпечення містить модуль експонування, що включає в себе світлодіодну матрицю, модуль відображення, що включає в себе екран (маску), модуль переміщення, що включає в себе двигун, драйвер, модуль контролю за силою відриву, що включає в себе тензодатчик та модуль контролю за температурою що включає в себе термістор і плату керування.

Основними елементами, що визначають збереження якісних показників та необхідні для покращення системи керування є елементи, що відповідають за контроль сили відриву та контроль температури фотополімера, яка впливає на швидкість полімеризації і тим самим на силу відриву від плівки.

На основі проведеного регресійного аналізу для покращення показників якості керування, в САК фотополімерним 3D-друком пропонується в якості математичного забезпечення модель керування за силою відриву від площі та САК модель процесу відриву за температурою [15].

В алгоритмічному забезпеченні пропонується алгоритм визначення сили відриву від площі на

основі алгоритму перемішування. Для забезпечення вищевказаних алгоритмічного та математичного забезпечення необхідно створити програмний комплекс на основі Arduino з використанням технічних засобів для забезпечення цілей автоматизованої системи керування фотополімерним 3D-друком.

Для досягнення поставленої мети необхідно побудувати функціональну схему автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком. Ця схема містить наступні елементи:

- плата керування, яка надсилає сигнали на кроковий двигун, екран та світлодіодну матрицю;
- світлодіодна матриця, яка потоком УФ випромінювання ініціює процес полімеризації;
- екран (маска), який виводить зображення шару;
- кроковий двигун, який відповідає за систему переміщення;
- в якості зворотнього зв'язку по якому здійснюється контроль міститься тензодатчик, кінцевий вимикач та термістор;

– в якості об'єкта керування – процес керування фотополімерним 3D-друком.

Функціональна схема процесу фотополімерного 3D-друку зображена на рис. 2.

Визначення вхідних та вихідних параметрів є ті ж самі параметри, що і на узагальненій схемі САК ТП фотополімерного друку: вхідними параметрами є задані розміри та шорсткість, вихідними параметрами є розраховані значення шорсткості та відхилення розмірів.

Для структурної схеми системи керування було визначено передатні функції її елементів, експериментально підібрано коефіцієнти та постійні часу. Структурна схема системи з визначеними передатними функціями зображена на рис. 3.

В подальшому використовуючи загальну схему MatLab Simulink, що зображена на рис. 4, було проведено перетворення схеми для знаходження загальної передатної функції системи керування.

Таким чином використовуючи ПЗ Matlab за допомогою наступних команд була порашована загальна передатна функція з використанням кое-

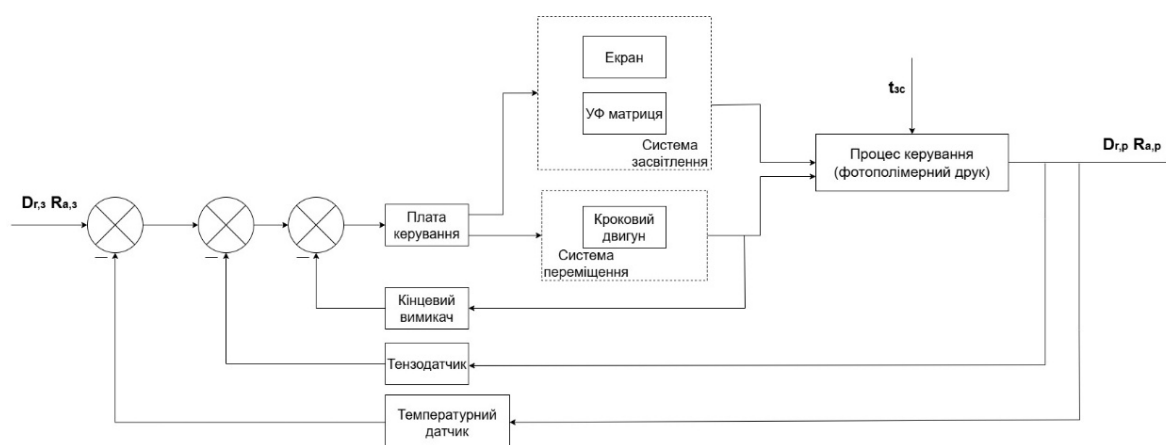


Рис. 2. Функціональна схема системи керування процесом фотополімерного 3D-друку

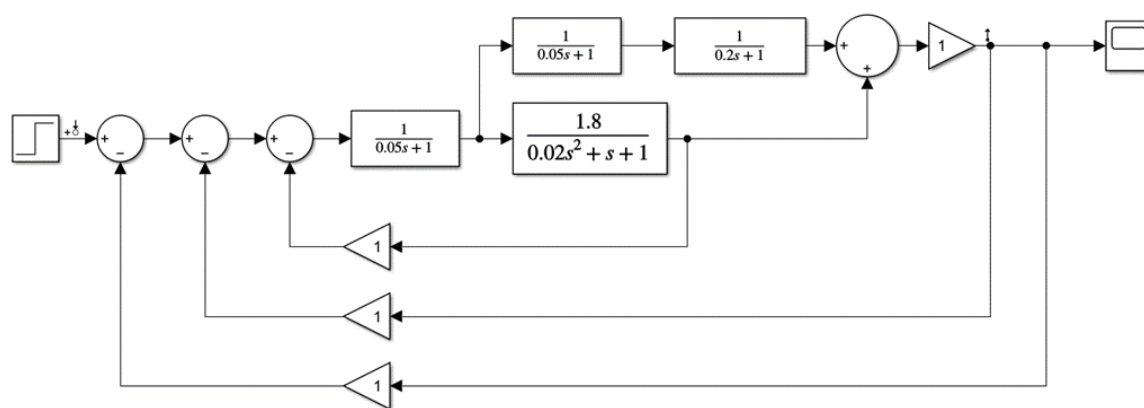


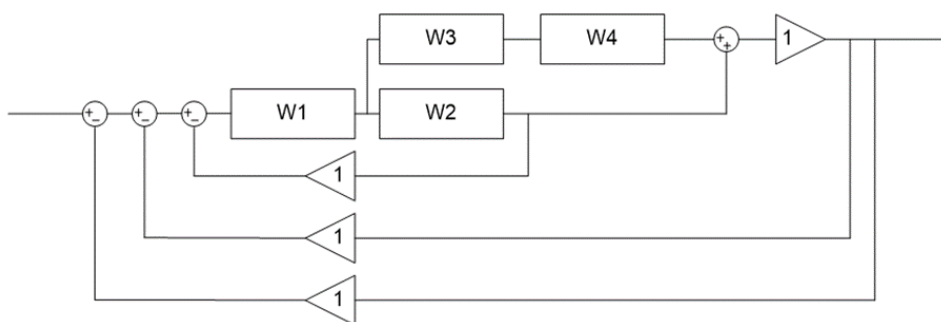
Рис. 3. Схема для моделювання фотополімерного друку у ПЗ MatLab Simulink

фіцієнтів та визначені полюса та нулі командою `pole(wend)`.

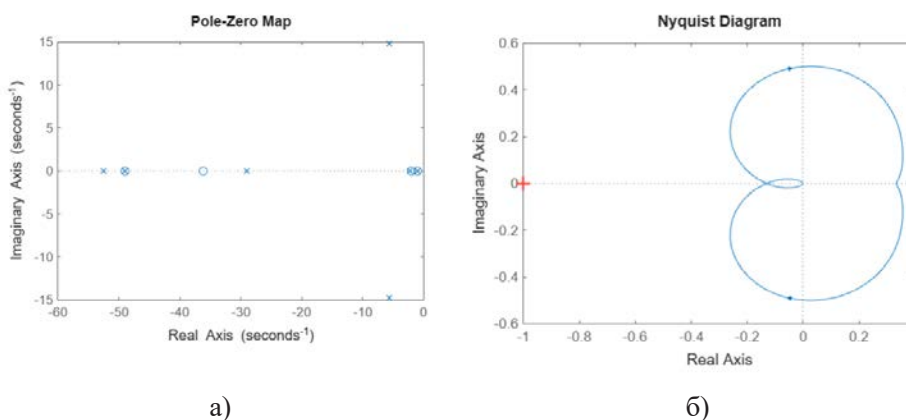
В результаті використовуючи команду `rzmar(Wкінц)` було отримано графік, що зображений на рис. 5 а. Згідно діаграми можливо зробити висновок, що система є стійкою. Також використовуючи для системи пакет лінеаризації було отримано годограф Найквіста, що зображений на рис. 5 б.

Виходячи з отриманого годографа та критерія стійкості Найквіста можливо зробити висновок що система є стійкою. Отримана перехідна характеристика системи зображена на рис. 6 а. Також було отримано частотні характеристики системи, що зображені на рис. 6 б.

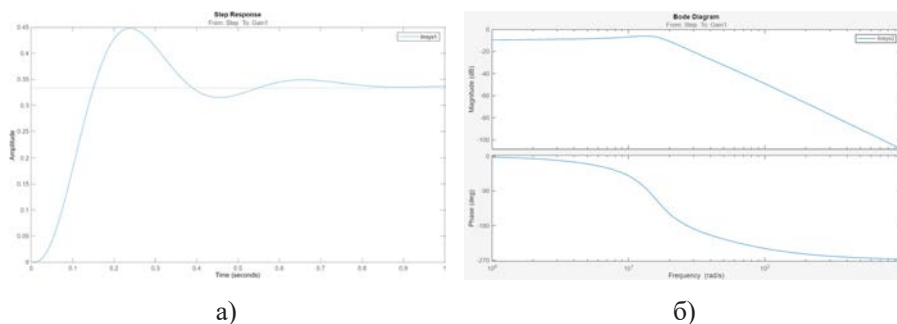
В результаті дослідження системи керування фотополімерним 3D-друком можливо зробити



**Рис. 4. Загальна схема для знаходження передавальної функції системи керування**



**Рис. 5.**  
**а – діаграма нулів та полюсів моделі керування; б – годограф Найквіста**



**Рис. 6.**  
а – перехідна характеристика системи;  
б – частотні характеристики системи

висновок, що з додаванням в систему керування зворотнього зв'язку у вигляді тензодатчика та термістора система є стійкою.

**Висновки.** У статті запропоновано нову систему автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком, яка динамічно регулює параметри експонування залежно від властивостей матеріалу та геометрії моделі. Це досягається завдяки адаптивним алгоритмам, що контролюють інтенсивність світлового потоку, час полімеризації шарів, швидкість платформи та рівномірність затвердіння.

Система забезпечує стабільну якість друку, зменшення внутрішніх напружень і підвищення міцності виробів. Вперше реалізовано інтеграцію датчиків оптичної густини, температури та тензодатчиків, що дозволяють у режимі реального часу

контролювати процес відриву та коригувати параметри друку. Запропонована методика включає:

- розробку загальної системи автоматизованого керування;
- математичне моделювання процесу відриву моделі від плівки;
- імітаційне дослідження цього процесу в Python із використанням тензодатчика;
- моделювання елементів системи у MATLAB Simulink.

Результати сприяють підвищенню точності та надійності виготовлення деталей, зменшенню дефектів і часу друку. Основним підсумком є створення адаптивної системи, що підвищує якість, відтворюваність і економічність фотополімерного 3D-друку.

### Список літератури:

1. Нікітін Д.О., Коротун Є.В. Дослідження параметрів фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку. Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики. Матеріали II Міжнародної наукової конференції. Кривий Ріг, 10 січня 2024 р. Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. с. 292–294. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-571210.36074/mcnd-19.01.2024>.
2. Нікітін Д.О. Розробка моделі керування температурою фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. № 1(75). pp. 31–37.
3. Zhang J., Xiao P. 3D Printing of Photopolymers. *Polymer Chemistry*. 2018. Vol. 9. pp. 1530–1540.
4. Ambrosio D., Gabrion X., Malécot P., Amiot F., Thibaud S. Influence of manufacturing parameters on the mechanical properties of projection stereolithography–manufactured specimens. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. pp. 265–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04415-5>.
5. Xue D., Zhang J., Wang Y., et al. Digital light processing-based 3D printing of cell-seeding hydrogel scaffolds with regionally varied stiffness. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2019. Vol. 5. pp. 4825–4833.
6. Zhou L.Y., Fu J., He Y. A review of 3D printing technologies for soft polymer materials. *Advanced Functional Materials*. 2020. Vol. 30. 2000187.
7. Layani M., Wang X., Magdassi S. Novel materials for 3D printing by photopolymerization. *Advanced Materials*. 2018. Vol. 30. e1706344.
8. Суберляк О.В., Скорохода В.Й., Семенюк Н.Б. Теоретичні основи хімії та технології полімерів. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. 340 с. ISBN 978-617-607-612-4.
9. Радченко С.Г. Методологія регресійного аналізу: монографія. Київ : Корнійчук, 2011. 376 с.
10. Важинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень. Суми : СумДПУ ім. А.С.Макаренка, 2016. 260 с.
11. Білей П., Адамовський М., Ханік Я., Довга Н., Сорока Л. Методологія наукових досліджень технологічних процесів. Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2003. 352 с.
12. Дефекти та вимоги до якості ІОТ. URL: <https://vseosvita.ua/library/embed/0100cue4-c3ba.docx.html>.
13. Варенко В.М. Основи аналітики: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2022. 248 с. ISBN 978-617-520-284-5.
14. Venkataswamy Reddy M. Statistical Methods in Psychiatry Research and SPSS. 2nd ed. Apple Academic Press, 2019. 442 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429023309>.
15. Noorani R. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection. CRC Press, 2017. 271 p.

### Nevlyudov I.Sh., Nikitin D.O., Strilets R.E., Valyuzhenych O.O. DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR PHOTO-POLYMER 3D PRINTING

*The article is devoted to the study of the problem of automation of photopolymer 3D printing processes, which is becoming particularly relevant at the present stage due to the widespread use of additive technologies in various industries. The article reveals the peculiarities of using 3D printing not only for creating prototypes or single products, but also in serial production, which leads to growing demands for the efficiency, stability, and reliability of technological processes. The need to reduce the proportion of manual operations, including loading material or removing finished products, is considered, and it is proven that the most critical task is to ensure automated quality control of parts during the printing process. It has been found that standard 3D*

*printers, which are essentially numerically controlled machines, perform most operations automatically, but remain dependent on the operator for quality control. It has been determined that the absence of a feedback system leads to the need for optical surveillance, which makes it impossible to fully monitor the process for a number of photopolymer technologies, in particular SLA, DLP, LCD, SLM, PolyJet, and MJ. The key problem has been identified, which is that in the initial stages of printing, the model is completely immersed in photopolymer resin, which prevents visual inspection. It has been proven that this creates risks of late detection of defects when printing continues continuously for several hours or even days, and defects can only be detected after production is complete. The article identifies the prospects for creating automated control systems for photopolymer 3D printing that are capable of monitoring product quality in real time, as well as adjusting process parameters depending on the properties of the photopolymer and the geometry of the model. It has been found that the introduction of such systems will significantly increase the productivity of the technology, reduce the time required to manufacture parts, reduce the likelihood of defects, and improve the reproducibility of results. The areas of application of photopolymer technologies in medicine, jewellery, instrument making and foundry production, where automation of control is of fundamental importance for ensuring high quality of final products, are revealed. Thus, the article proves that the development of an automated control system for photopolymer 3D printing processes is a relevant and necessary scientific and technical task. Its implementation will contribute to the integration of additive technologies into large-scale industrial production, ensure the improvement of production processes, and open up new opportunities for the development of modern industries.*

**Key words:** 3D printing, photolithography, LCD, technological process control system, modelling, additive manufacturing, production.

Дата надходження статті: 19.09.2025

Дата прийняття статті: 03.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025