

УДК 621.74:004.94

I. Ш. НЕВЛЮДОВ, Р. Є. СТРИЛЕЦЬ, Д. О. НІКІТІН, Д. М. БОНДАРЕНКО,  
Б. С. МІСАН, О. С. ПАЩЕНКО  
Харківський національний університет радіоелектроніки

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ У ТЕХНОЛОГІЇ FFF/FDM З ВИКОРИСТАННЯМ APID ТА MPC АЛГОРИТМІВ

Досягнення в галузі адитивних технологій стрімко впроваджуються у промисловість, медицину, освіту та інші сфери діяльності. Однією з найбільш поширених та відносно дешевою технологій адитивного виробництва є Fused Filament Fabrication (FFF) Fused Deposition Modeling (FDM) друк, яка працює за принципом шарової екструзії розплавленого полімерного матеріалу – філаменту. Водночас якість виготовлення виробів залежить від безлічі параметрів, таких як: конструкція принтеру для друку, матеріал, програмне забезпечення, мікроклімат при виробництві виробу. Одним фактором який впливає на якість 3D-друку, є залежність від стабільності температурного режиму екструдера філаменту, оскільки навіть незначні відхилення температури екструдера в межах від 3 °C до 5 °C можуть призводити до появи дефектів при формуванні шарів моделі, низькій адгезії між шарами, деформації та зниження механічної міцності виробів.

Виходячи з цієї проблеми актуальною є задача підвищення точності та стабільності температурного керування в процесі екструзії філаменту під час друку, особливо в умовах динамічних теплових навантажень, що виникають при виготовленні моделі. Традиційні методи контролю, які базуються на використанні PID-регуляторів, не завжди забезпечують необхідну швидкість часу перерегулювання температури через інерційність нагрівальної головки екструдера, вплив зовнішніх факторів, швидкості переміщення екструдера, швидкості подачі матеріалу, інтенсивність охолодження моделі.

У цій роботі проведено аналіз фізико-теплових процесів, що відбуваються під час екструзії філаменту при використанні технології FFF/FDM 3D-друку, а також досліджено вплив температурних режимів на відхилення геометричних розмірів та появу поверхневих дефектів друкованих виробів. Розглянуто сучасні методи контролю температури та підходи до її регулювання, включаючи класичні та інтелектуальні алгоритми керування. Проаналізовані переваги та недоліки сучасних підходів до реалізації адаптивного автоматизованого керування температурою екструзії Adaptive PID (APID) та прогнозуючого керування на базі Model Predictive Control (MPC). Особливості цих алгоритмів, є можливість вносити динамічні зміни в параметри регулювання в залежності від поточного теплового стану системи, що дозволяє враховувати змінні умови процесу друку та зменшувати вплив зовнішніх збурень під час друку виробу. Експериментальні дослідження були проведені на модернізованому 3D-принтері з використанням програмного забезпечення Klipper, що дозволило реалізувати гнучке налаштування параметрів керування та здійснювати високочастотний моніторинг температурних режимів друку. У ході експериментів оцінено ефективність різних алгоритмів регулювання за показниками перерегулювання, часу стабілізації, амплітуди температурних коливань та якості сформованих виробів.

Отримані результати свідчать, що застосування адаптивних методів керування дозволяє зменшити амплітуду температурних коливань, підвищити стабільність процесу екструзії та покращити якість друкованих виробів. Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленого підходу для модернізації існуючих систем керування 3D-принтерів та підвищення ефективності адитивного виробництва.

**Ключові слова:** FFF/FDM-друк, екструзія полімерів, температурний контроль, адаптивне керування, APID, MPC, 3D-друк.

I. Sh. NEVLYUDOV, R. E. STRILETS, D. O. NIKITIN, D. M. BONDARENKO,  
B. S. MISAN, O. S. PASCHENKO  
Kharkiv National University of Radio Electronics

## METHODS AND TECHNIQUES FOR ADAPTIVE CONTROL OF POLYMER EXTRUSION TEMPERATURE IN FFF/FDM TECHNOLOGY USING APID AND MPC ALGORITHMS

Advances in additive manufacturing are rapidly being adopted in industry, medicine, education, and other fields. One of the most widespread and relatively inexpensive additive manufacturing technologies is Fused Filament Fabrication (FFF) or Fused Deposition Modeling (FDM) printing, which operates on the principle of layer-by-layer extrusion of molten polymer material – the filament. At the same time, the quality of manufactured products depends on numerous

parameters, such as: the design of the 3D printer, the material, the software, and the environmental conditions during production. A separate factor affecting the quality of 3D printing is the stability of the filament extruder's temperature, since even minor deviations in the extruder temperature within the range of 3 °C to 5 °C can lead to defects in the formation of model layers, low adhesion between layers, deformations, and a reduction in the mechanical strength of the products.

Given this problem, the task of improving the accuracy and stability of temperature control during the filament extrusion process while printing is particularly relevant, especially under dynamic thermal loads that arise during model fabrication. Traditional control methods, which are based on the use of PID controllers, do not always ensure the required temperature response time due to the inertia of the extruder heating head, the influence of external factors, the extruder travel speed, the material feed rate, and the intensity of model cooling.

This paper analyzes the physical and thermal processes occurring during filament extrusion in FFF/FDM 3D printing technology and investigates the effect of temperature conditions on dimensional deviations and the occurrence of surface defects in printed parts. Modern methods of temperature control and approaches to its regulation are considered, including classical and intelligent control algorithms. The advantages and disadvantages of modern approaches to implementing Adaptive PID (APID) adaptive automated extrusion temperature control and Model Predictive Control (MPC)-based predictive control are analyzed. A key feature of these algorithms is the ability to make dynamic changes to control parameters depending on the current thermal state of the system, which allows for accounting for variable printing conditions and reducing the impact of external disturbances during product printing. Experimental studies were conducted on a modified 3D printer using Klipper software, which enabled flexible configuration of control parameters and high-frequency monitoring of printing temperature regimes. During the experiments, the effectiveness of various control algorithms was evaluated based on overshoot, stabilization time, temperature fluctuation amplitude, and the quality of the printed products.

The results obtained indicate that the use of adaptive control methods reduces temperature fluctuations, increases the stability of the extrusion process, and improves the quality of printed products. The practical significance of this work lies in the potential to use the developed approach to modernize existing 3D printer control systems and enhance the efficiency of additive manufacturing.

**Keywords:** FFF/FDM printing, polymer extrusion, temperature control, adaptive control, APID, MPC, 3D printing.

### Постановка проблеми

Незважаючи на широке впровадження друкованих виробів за технологією FFF/FDM-друку, проблема забезпечення стабільності процесу екструзії філаменту залишається важливою технічною задачею. Основною складністю, якою є динамічні перепади теплових процесів у нагрівальному блоці екструдера, який супроводжується змінними тепловими навантаженнями, інерційністю системи та впливом зовнішніх факторів.

У реальних умовах друку температура екструзії постійно змінюється через швидкості подачі матеріалу, кількості екструзійного матеріалу, який проходить через нагрівальний блок, зміни траєкторії руху друкуючої головки та інтенсивності охолодження виробу. Це призводить до нестабільної в'язкості філаменту та порушенню рівномірності формування шарів моделі. Як наслідок, виникають внутрішні та поверхневі дефекти виробу, через неоднорідну структуру та відхиленням геометричних розмірів моделі. Існуючі системи керування температурою, які засновані на простих PID-регуляторах, не враховують у повній мірі динамічність процесу виготовлення та не забезпечують необхідної швидкодії й точності регулювання в умовах зовнішніх збурень. Це обмежує можливість досягнення стабільних результатів друку при змінних технологічних режимах виготовлення.

Таким чином, виникає необхідність розроблення більш ефективних підходів до керування температурою екструзії, які б дозволяли адаптувати параметри регулювання до поточного стану системи та забезпечували стабільність процесу формування виробів за технологією FFF/FDM.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних наукових працях процес FFF/FDM-друку розглядається як складна багатофакторна термомеханічна система, у якій ключову роль відіграють процеси плавлення, екструзії та тверднення полімерного філаменту. У роботі [1] наведено огляд чисельних методів моделювання FFF/FDM-процесу, де показано, що для підвищення якості виробів необхідно враховувати теплові та реологічні характеристики матеріалу, а також умови формування шарів, але більшу увагу в ній надано саме теплопровідності різних типів нагрівачів екструдера. Питання

комплексного моделювання процесу з урахуванням температурних факторів розглядаються також у дослідженнях [2; 3], де підкреслюється важливість температурного режиму для забезпечення адгезії між шарами та точності виготовлення виробів. Але в ній не розглядалися саме чисельні показники впливу параметру друку моделі на температурні коливання.

У праці [4] представлено експериментально-аналітичне дослідження течії полімерного розплаву в нагрівальному блоці екструдера, де встановлено наявність стабільних і нестабільних режимів екструзії, що залежать від температури та швидкості подачі матеріалу. Показано, що порушення температурного балансу призводить до нелінійної поведінки потоку та погіршення якості формування шару. Дослідження впливу параметрів друку на механічні властивості виробів наведено у роботах [5]. Зокрема, встановлено, що температура екструзії та швидкість друку істотно впливають на міцність, структуру та якість поверхні виробів із PLA. У зазначених роботах також наголошується, що дефекти міжшарової адгезії є одним із основних чинників зниження експлуатаційних характеристик виробів. Окремий напрям становлять дослідження методів моніторингу температури в процесі друку. У статті [6] запропоновано використання інфрачервоних сенсорів для «in situ» контролю температури розплаву, що дозволяє виявляти дефекти безпосередньо під час формування виробу, але цей підхід для контролю температури запропоновано для фотополімерного 3D прототипування на базі SLA, DLP та LCD технології.

Подібні підходи до аналізу динамічних процесів керування розглядаються у навчальному посібнику [7], де висвітлено особливості функціонування нелінійних і дискретних систем автоматичного управління. Зокрема, показано, що у складних технічних системах із змінними параметрами ефективність керування значною мірою залежить від здатності системи враховувати нелінійності, запізнення та зовнішні збурення, що є характерним і для процесу екструзії полімерів у технології FFF/FDM-друку. Питання вдосконалення класичних підходів до керування розглянуто у праці [8], де запропоновано метод синтезу PID-регуляторів на основі критерію  $v$ -Гурвіца. Отримані результати свідчать про можливість підвищення стійкості та точності систем керування, однак навіть удосконалені PID-алгоритми мають обмеження при роботі в умовах значних динамічних збурень і змінних режимів. Разом з тим аналіз джерел свідчить, що існуючі підходи переважно орієнтовані на теоретичні аспекти побудови систем автоматичного управління або на вдосконалення класичних алгоритмів регулювання. Питання ж реалізації комплексного адаптивного керування температурою екструзії з урахуванням специфіки FFF/FDM-друку, змінних режимів роботи обладнання та впливу зовнішніх факторів залишаються недостатньо дослідженими, що обумовлює актуальність подальших наукових розробок у цьому напрямі.

### **Мета дослідження**

Ціллю публікації є викладення підходу до реалізації адаптивного автоматизованого керування температурою екструзії полімерних матеріалів у процесі FFF/FDM-друку. Його проілюстровано на прикладі застосування адаптивних алгоритмів керування APID та MPC для стабілізації температурного режиму екструдера за умов змінних теплових навантажень під час формування виробів в порівнянні з простою PID-регуляцією. Зауважимо, що запропонований підхід може бути застосований за аналогією й до інших систем адитивного виробництва, де необхідне забезпечення точного температурного контролю.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

У рамках проведення експерименту було заздалегідь визначено набір керованих параметрів, їх діапазони зміни та критерії для фіксації результатів. Такий підхід дав змогу порівняти поведінку системи регулювання в однакових умовах і визначити, як вона працює при зміні теплового навантаження.

Базові умови друку тестових зразків, наступні: матеріал друку PLA філамент; температура стола 60 °С; діаметр сопла 0,4 мм; швидкість друку 60 мм/с; товщина шару 0,2 мм. Тестова модель була обрана складної форми з різними типами елементів які зустрічаються під час друку багатьох моделей. Розміри моделі складають 20 × 25 × 38 мм. Усі зразки були надруковані з однієї партії PLA філаменту, що дозволило уникнути впливу різниці у вологості філаменту (рис. 1).

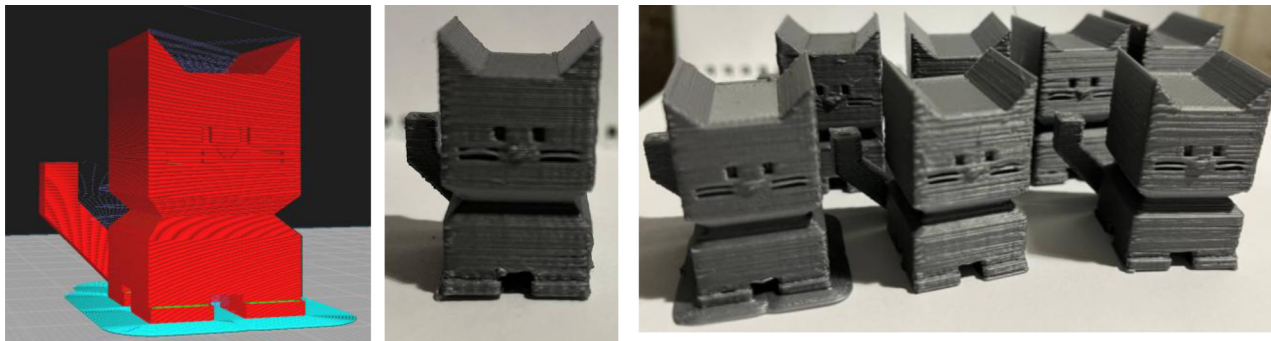


Рис. 1. Тестова модель для дослідження

У ході проведення експериментів будуть змінюватися такі параметри, як: температура екструзії; швидкість друку; швидкість подачі матеріалу «*flow rate*»; інтенсивність обдуву моделі вентилятором; зовнішні збурення рухом головки.

У рамках експерименту температура екструзії буде знаходитися в межах від 190 °С до 210 °С. Зміна температури дозволить спостерігати, як алгоритм регуляції працює на зміни в'язкості філаменту, а також аналізувати наскільки ефективно регулятор може підтримувати стабільну температуру. Швидкість друку буде в межах від 40 мм/хв до 90 мм/хв і регулювалася поступово на трьох рівнях: низька швидкість друку 40 мм/хв; середня швидкість друку 60 мм/хв; висока швидкість друку 90 мм/хв. Така градація дозволила дослідити, як система керування реагує на різні теплові навантаження, а також визначити, як зміна об'ємного потоку матеріалу впливає на стабільність температури сопла під час друку.

Швидкість подачі матеріалу «*flow rate*» змінюється в межах від 90 % до 110 %. Ця проміжок дозволила дослідити, як зміни в об'ємному потоці впливають на теплове навантаження та стабільність підтримання температури в зоні екструзії матеріалу. Інтенсивність обдуву моделі лежить в межах від 0 % до 100 % з кроком 50 %. Такий підхід дозволяв оцінити, наскільки ефективно система керування може компенсувати різку зміну теплових втрати та підтримувати стабільну температуру під час різких змін охолодження. Зовнішні впливи, які виникають через рух друкуючої головки, описуються шляхом введення різких значень прискорень та переходів «*jerk*», а також прискоренням руху голови в межах від 1500 мм/хв. до 3000 мм/хв. Такий підхід дозволив оцінити, як динаміка переміщень екструдера впливає на теплову стабільність нагрівального блоку, а також визначити, наскільки ефективно регулятор може компенсувати короточасні зміни теплового навантаження. Усі експерименти проводилися для трьох типів алгоритмів регулювання: стандартний PID; APID; прогнозуючий MPC [9].

Для кожного параметра буде зроблено по три тестових зразка, щоб зменшити випадкові коливання. Під час друку буде здійснюватися неперервний запис температурної кривої з частотою від 10 Гц до 20 Гц, що дозволяло детально відстежувати поведінку системи керування. Оцінка буде проходити за наступними показниками: величина перерегулювання при зміні режимів; амплітуда та частота температурних коливань; наявність дефектів у надрукованому зразку (пропуски, перегрів, нитки, деформації); стабільність ширини нитки та рівномірність шароутворення.

Зразки, які були надруковані, аналізувалися візуально, під мікроскопом, а також шляхом вимірювання геометричних розмірів моделі. Зміни в структурі поверхні деталі давали можливість провести оцінити стабільність температури під час екструзії філаменту. Для експериментального визначення ефективності алгоритмів керування температурою була проведена серія друків тестових зразків у різних режимах роботи принтера. Дослідження проходило в контрольованих умовах із застосуванням трьох алгоритмів регулювання: стандартного PID, APID та прогнозуючого контролера MPC. В процесі проведення експерименту поступово змінювалися параметри друку моделі: температуру сопла, швидкість друку, подачу матеріалу «flow» та інтенсивність обдуву. Ці зміни дозволяли створити різні теплові навантаження на нагрівальний блок та оцінити, як кожен алгоритм реагує на збурення і відхилення температури від заданого

Таблиця 1

**Результати вимірювань**

№	Алгоритм	T, сопла, °C	Швидкість, мм/с	Flow, %	Обдув, %	ΔT, °C	t <sub>OVER</sub> , с.
Низька температура, 190 °C							
1	PID	190	60	100	50	±4,0	12,5
2	APID	190	60	100	50	±2,1	6,8
3	MPC	190	60	100	50	±0,8	2,9
Базова температура, 210 °C							
4	PID	210	60	100	50	±3,2	10,7
5	APID	210	60	100	50	±1,7	5,4
6	MPC	210	60	100	50	±0,6	2,4
Зменшена швидкість, 40 мм/с							
7	PID	210	40	100	50	±2,7	9,4
8	APID	210	40	100	50	±1,3	5,0
9	MPC	210	40	100	50	±0,5	2,1
Підвищена швидкість, 80 мм/с							
10	PID	210	80	100	50	±4,8	14,1
11	APID	210	80	100	50	±2,0	6,3
12	MPC	210	80	100	50	±0,9	3,4
Зменшений Flow, 90 %							
13	PID	210	60	90	50	±3,9	11,8
14	APID	210	60	90	50	±1,8	6,1
15	MPC	210	60	90	50	±0,7	2,7
Підвищений Flow, 110 %							
16	PID	210	60	110	50	±4,4	13,6
17	APID	210	60	110	50	±2,3	6,4
18	MPC	210	60	110	50	±1,0	3,0
Без обдуву, 0 %							
19	PID	210	60	100	0	±5,0	14,8
20	APID	210	60	100	0	±2,4	7,0
21	MPC	210	60	100	0	±1,1	3,2
Максимальний обдув, 100 %							
22	PID	210	60	100	100	±6,2	16,5
23	APID	210	60	100	100	±2,9	7,8
24	MPC	210	60	100	100	±1,2	3,5
№	Алгоритм	T, сопла, °C	Швидкість, мм/с	Flow, %	Обдув, %	ΔT, °C	t <sub>OVER</sub> , с.
Граничний режим: 210 °C, 90 мм/с, 120 % flow, 100 % обдув							
25	PID	210	90	120	100	±7,1	18,9
26	APID	210	90	120	100	±3,6	8,2
27	MPC	210	90	120	100	±1,4	3,9

значення. В результаті було виготовлено 27 тестових зразків з різними параметрами друку та алгоритмами контролю температури екструдера.

Для кожного набору параметрів друку створювався окремий зразок. Під час друку фіксувалася температурна крива, що дозволило визначити амплітуду температурних коливань  $\Delta T$  та часу перерегулювання  $t_{OVER}$ . Крім температурних характеристик, також враховувалися якість друку моделі та поведінка матеріалу під час друку. У табл. 1, наведено повний експериментальний план з урахуванням параметрів друку, використаного алгоритму та отриманої температурної стабільності.

На основі отриманих значень коливань температури можливо спостерігати, (рис. 2): PID має найбільшу нестабільність та розкид значень; APID значно покращує ситуацію; MPC забезпечує найменші коливання температури в усіх режимах.

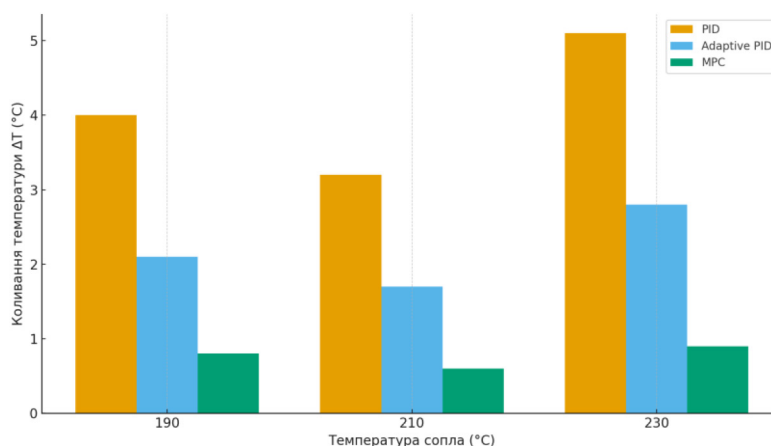


Рис. 2. Порівняння коливань температури для різних алгоритмів керування

Якщо судити по часу перерегулювання  $t_{OVER}$  для трьох алгоритмів керування при різних температурах екструзії в межах від 190 °C до 230 °C (рис. 3): PID регулятор має найдовший час перерегулювання  $t_{OVER}$ ; APID має значно швидшу реакцію; MPC, найменший час перерегулювання  $t_{OVER}$ , майже миттєве вирівнювання.

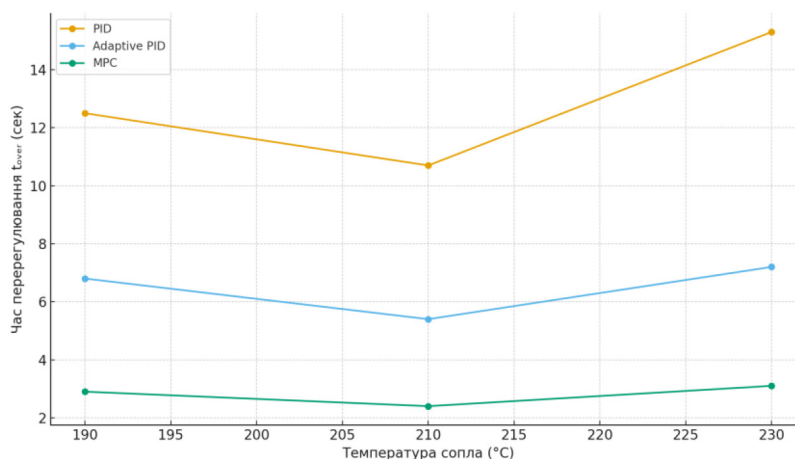


Рис. 3. Порівняння часу перерегулювання для різних алгоритмів

Порівняльний вплив алгоритмів PID, APID та MPC на якість друків виробів (рис. 4), що дозволяє візуально оцінити зміну структури та рівень дефектів залежно від стабільності температурного режиму екструзії.

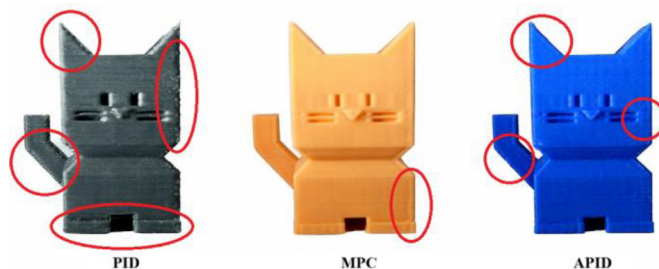


Рис. 4. Тестові зразки з різними алгоритмами контролю температури

Якщо зробити оцінку роботи алгоритмів по основним показникам друку, можна зробити наступні висновки, табл. 2.

Таблиця 2

**Загальні висновки про роботу алгоритмів контролю температури екструдера**

Критерій	PID	APID	MPC
Перерегулювання	високе	низьке	практично відсутнє
Час стабілізації	довгий	короткий	найкоротший
Стабільність при збуреннях	низька	висока	дуже висока
Амплітуда коливань	від 3 °C до 6 °C	від 1 °C до 2 °C	менше 1 °C
Якість екструзії	нестабільна	майже однорідна	найкраща
Обчислювальна складність	низька	середня	висока

У процесі виконання роботи було проведено регресійно-кореляційний аналіз експериментальних даних, які були отримані під час дослідження температурної стабільності нагрівального блоку екструдера. Головною метою цього аналізу було визначити, як технологічні параметри друку впливають на амплітуду температурних коливань  $\Delta T$  та час перерегулювання  $t_{OVER}$  для трьох алгоритмів керування.

Оскільки повно факторний експеримент з чотирма змінними параметрами вимагав би більше 400 комбінацій режимів друку тестових зразків, було вирішено застосувати планований неповно факторний експеримент. Цей підхід охоплює репрезентативні точки по всьому діапазону параметрів, включаючи мінімальні, максимальні та номінальні значення параметрів. Обраний метод дозволяє значно зменшити кількість необхідних друків, при цьому зберігаючи можливість створення коректних статистичних моделей.

Для кожної досліду були зафіксовані значення температури сопла, швидкості друку, подачі матеріалу, інтенсивності обдуву, амплітуди температурних коливань  $\Delta T$  та часу перерегулювання  $t_{OVER}$ . Ці значення необхідні для обчислення коефіцієнтів кореляції Пірсона та створення регресійної моделі. В ході дослідження буде використовуватися дві регресійні моделі, а саме: модель впливу параметрів на амплітуду температурних коливань  $\Delta T$ ; модель впливу параметрів на час перерегулювання  $t_{OVER}$ .

Таким чином ми зможемо зробити оцінку впливу параметрів на кожен фактор, та знайти коефіцієнти кореляції.

За результатами обчислень значення коефіцієнта детермінації  $R$  для кожного алгоритму PID терморегуляції екструдера (рис. 5).

Показник  $R$  показує, наскільки добре корелюють фактичні значення залежної змінної з прогнозами моделі, відображаючи, наскільки точно лінія регресії відповідає експериментальним даним.

Коефіцієнт множинної детермінації  $R^2$  вказує на те, яку частку впливу мають параметри, що входять до моделі, на кінцевий результат.

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,924 <sup>a</sup>	,853	,818	,7593	,853	24,381	5	21	,000

a. Predictors: (Constant), Cooling, Flow, Algorithm, Extruder\_temperature\_C, Print\_speeds\_mm\_min

*a*

**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,945 <sup>a</sup>	,893	,868	1,7495	,893	35,108	5	21	,000

a. Predictors: (Constant), Cooling, Flow, Algorithm, Extruder\_temperature\_C, Print\_speeds\_mm\_min

*b*

**Рис. 5. Зведення для моделі (Model Summary)**

*a, b* – амплітуда температурних коливань  $\Delta T$  та час перерегулювання  $t_{OVER}$

Середнє скориговане значення коефіцієнта  $R^2$  для всіх досліджуваних алгоритмів дорівнює:  
 – для амплітудних температурних коливань  $\Delta T$ , коефіцієнт  $R^2$  дорівнює 85,3 %;  
 – для час перерегулювання  $t_{OVER}$ , коефіцієнт  $R^2$  дорівнює 89,3 %.

Середні стандартні похибки оцінки дорівнюють 0,5 для двох моделей, що перевищує порогове значення 0,5. Аналіз даних за всіма осями підтверджує, що  $R^2$  більше 0,5. У всіх випадках рівень значущості Sig. виявився меншим за 0,05, що підтверджує статистичну достовірність отриманих результатів.

Щоб визначити внесок кожної змінної, використовуються стандартизовані коефіцієнти «Beta», які показують, як змінюється значення параметра при збільшенні одного з факторів на одиницю, (рис. 6).

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error				Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	,093	5,761		,016	,000			
	Algorithm	-1,839	,179	-,860	-10,275	,000	-,860	-,913	-,860
	Extruder_temperature_C	,007	,023	,025	,292	,000	,056	,064	,024
	Print_speeds_mm_min	,034	,012	,258	2,828	,000	,310	,525	,237
	Flow	,022	,031	,058	,699	,000	,058	,151	,058
	Cooling	,008	,006	,128	1,406	,000	,231	,293	,118

a. Dependent Variable: Temperature\_fluctuations\_C

*a*

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error				Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	8,985	13,274		,677	,000			
	Algorithm	-5,289	,412	-,915	-12,826	,000	-,915	-,942	-,915
	Extruder_temperature_C	,001	,054	,002	,022	,000	,024	,005	,002
	Print_speeds_mm_min	,070	,028	,197	2,532	,000	,224	,484	,181
	Flow	,040	,071	,040	,560	,000	,040	,121	,040
	Cooling	,012	,013	,070	,904	,000	,147	,193	,064

a. Dependent Variable: Overtime\_s

*b*

**Рис. 6. Значення «Standardized Coefficients Beta»**

*a, b* – амплітуда температурних коливань  $\Delta T$  та час перерегулювання  $t_{OVER}$

Значення коефіцієнтів «Beta» можна інтерпретувати як кореляційні коефіцієнти. Оскільки, згідно з попередніми розрахунками, модель демонструє лінійну залежність, ці коефіцієнти можуть бути підставлені в рівняння лінійної регресії.

Зальний опис рівня лінійної регресії:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \tag{1}$$

де  $Y$  – фактор міцності виробу;

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – параметри впливу на фактор.

Для більшої зручності побудуємо два рівня регресії для кожного параметра. Результати кореляції Пірсона (рис. 7).

**Correlations**

	Temperature_fluctuations_C	Algorithm	Extruder_temperature_C	Print_speeds_mm_min	Flow	Cooling	
Pearson Correlation	Temperature_fluctuations_C	1,000	-,860	,056	,310	,058	,231
	Algorithm	-,860	1,000	,000	,000	,000	,000
	Extruder_temperature_C	,056	,000	1,000	,088	,000	,069
	Print_speeds_mm_min	,310	,000	,088	1,000	,000	,392
	Flow	,058	,000	,000	,000	1,000	,000
Sig. (1-tailed)	Temperature_fluctuations_C	.	,000	,390	,058	,386	,123
	Algorithm	,000	.	,500	,500	,500	,500
	Extruder_temperature_C	,390	,500	.	,331	,500	,366
	Print_speeds_mm_min	,058	,500	,331	.	,500	,022
	Flow	,386	,500	,500	,500	.	,500
N	Temperature_fluctuations_C	27	27	27	27	27	27
	Algorithm	27	27	27	27	27	27
	Extruder_temperature_C	27	27	27	27	27	27
	Print_speeds_mm_min	27	27	27	27	27	27
	Flow	27	27	27	27	27	27

*a*

**Correlations**

	Overtime_s	Algorithm	Extruder_temperature_C	Print_speeds_mm_min	Flow	Cooling	
Pearson Correlation	Overtime_s	1,000	-,915	,024	,224	,040	,147
	Algorithm	-,915	1,000	,000	,000	,000	,000
	Extruder_temperature_C	,024	,000	1,000	,088	,000	,069
	Print_speeds_mm_min	,224	,000	,088	1,000	,000	,392
	Flow	,040	,000	,000	,000	1,000	,000
Sig. (1-tailed)	Overtime_s	.	,000	,453	,130	,422	,232
	Algorithm	,000	.	,500	,500	,500	,500
	Extruder_temperature_C	,453	,500	.	,331	,500	,366
	Print_speeds_mm_min	,130	,500	,331	.	,500	,022
	Flow	,422	,500	,500	,500	.	,500
N	Overtime_s	27	27	27	27	27	27
	Algorithm	27	27	27	27	27	27
	Extruder_temperature_C	27	27	27	27	27	27
	Print_speeds_mm_min	27	27	27	27	27	27
	Flow	27	27	27	27	27	27

*b*

**Рис. 7. Кореляція Пірсона**

*a, b* – амплітуда температурних коливань  $\Delta T$  та час перерегулювання  $t_{OVER}$

Для оцінки кількісного впливу параметрів на стабільність амплітудних температурних коливань  $\Delta T$  була побудована багатофакторна регресія:

$$\Delta T = b_0 + b_1 T + b_2 v + b_3 F + b_4 C + b_5 A + \varepsilon, \quad (2)$$

де  $T$  – температура екструдера, °C;

$v$  – швидкість друку, мм/хвилину;

$F$  – подача філаменту, %;

$C$  – охолодження моделі, %;

$A$  – алгоритм для контролю температури;

$\varepsilon$  – випадкова похибка, для моделі температурних коливань  $\Delta T$ , це значення дорівнює 0,6.

Таким чином коефіцієнти лінійної регресії для амплітуди температурних коливань  $\Delta T$ , має наступний вигляд (2):

$$\Delta T = 0,093 + 0,056T + 0,31v + 0,58F + 0,231C + (-0,86)A + 0,6.$$

Для часу перерегулювання  $t_{OVER}$  побудована модель буде мати наступний вигляд:

$$t_{OVER} = b_0 + \Delta T + b_2 C + \varepsilon. \quad (3)$$

Тут,  $\Delta T$  є основним фактором, що визначає  $t_{OVER}$ , тоді як інтенсивність обдуву сильно впливає на PID, але майже не впливає на MPC. Таким чином отримуємо, що рівняння регресії для алгоритмів контроль температури екструзії для двох показників амплітуди температурних коливань  $\Delta T$  та час перерегулювання  $t_{OVER}$ .

### Висновки

Дану публікацію присвячено дослідженню методів автоматизованого керування температурою екструзії полімерних матеріалів у процесі FFF/FDM-друку. Об'єктом дослідження було вибрано процес стабілізації температурного режиму екструдера в умовах змінних технологічних параметрів, зокрема швидкості друку, подачі матеріалу та інтенсивності охолодження. Це зумовлено тим, що температурний режим безпосередньо впливає на в'язкість розплаву, адгезію між шарами та якість формування виробів.

У межах дослідження було отримано регресійні залежності для оцінювання ефективності алгоритмів керування за показниками амплітуди температурних коливань  $\Delta T$  та часу перерегулювання  $t_{OVER}$ . Порівняльний аналіз показав, що класичний PID-регулятор характеризується високою чутливістю до змін параметрів процесу. У цьому випадку амплітуда температурних коливань  $\Delta T$  досягала  $\pm 7,1$  °C, а час перерегулювання  $t_{over}$  становив до 19 с, що свідчить про недостатню стабільність роботи системи в динамічних умовах.

Застосування адаптивного алгоритму APID дозволило суттєво покращити показники стабільності. Зокрема, амплітуда температурних коливань  $\Delta T$  зменшувалася у 1,7–2,2 рази порівняно з PID-регулятором, а час перерегулювання скорочувався майже вдвічі. Це забезпечує більш швидку реакцію системи на зміну умов друку та зменшує вплив зовнішніх збурень. Найбільш ефективним виявився алгоритм прогноуючого керування MPC, який забезпечив мінімальні значення амплітуди температурних коливань  $\Delta T$  у межах 0,5–1,4 °C та час перерегулювання  $t_{OVER}$  від 2 до 4 с. Отримані результати свідчать про високу стійкість алгоритму до змін параметрів процесу та його здатність забезпечувати стабільну роботу нагрівального вузла незалежно від режимів друку.

Таким чином, основними результатами роботи є встановлення кількісних характеристик ефективності алгоритмів керування температурою та підтвердження доцільності використання адаптивних і прогноуючих методів, зокрема MPC, для підвищення стабільності процесу екструзії та якості друківаних виробів. Це створює основу для подальшого впровадження інтелектуальних систем керування в адитивному виробництві.

Список використаної літератури

1. Xie J., Liu X., Tang J., Li X., Li W. Study on friction behavior at the interface between prosthetic socket and liner. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. 2021. Vol. 23, No. 1. P. 83–93. DOI: <https://doi.org/10.37190/ABB-01751-2020-04>
2. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. *ChemCatChem*. 2018. Vol. 10, No. 7. P. 1512–1525. DOI: <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>
3. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Chala O. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing. CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023): proceedings of the XXXI International Conference (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26–28 October 2023. Suprasl, 2023. 12 p.
4. Nevlyudov Sh., Novoselov S. P., Resnichenko A. G. Experimental verification of theoretical foundations making the basis of the substrate roughness surface automated control technology. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2012. Vol. 71, No. 19. P. 1791–1799. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v71.i19.80>
5. Mamalis A. G., Nevliudov I., Romashov Yu. An approach for numerical simulating and processing of measured electrical signals from board sensors installed on wheeled electro-mechanical platforms. *Journal of Instrumentation*. 2021. Vol. 16, No. 10. P. 10006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/10/P10006>
6. Nikitin D. O., Nevlyudov I. Sh., Zharikova I. V., Bronnikov A. I., Strilets R. E. Devising of a method for controlling products during photopolymer 3D printing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, No. 1 (136). P. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
7. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем» / уклад. О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 98 с.
8. Han S., Bhattacharyya S. P. PID controller synthesis using a  $v$ -Hurwitz stability criterion. *IEEE Control Systems Letters*. 2018. Vol. 2, No. 3. P. 525–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2018.2842784>
9. Бондаренко Д. М. Розроблення автоматизованого управління температурою при екструзії полімерного матеріалу в процесі тривимірного друку: пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Д. М. Бондаренко; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. Харків, 2025. 67 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/33576>

References

1. Xie, J., Liu, X., Tang, J., Li, X., & Li, W. (2021). Study on friction behavior at the interface between prosthetic socket and liner. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 23(1), 83–93. DOI: <https://doi.org/10.37190/ABB-01751-2020-04> [in English].
2. Rossi, S., Puglisi, A., & Benaglia, M. (2018). Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. *ChemCatChem*, 10(7), 1512–1525. DOI: <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619> [in English].
3. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Chala, O. (2023). A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing. CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023): Proceedings of the XXXI International Conference (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26–28 October 2023. Suprasl [in English].
4. Nevlyudov, Sh., Novoselov, S. P., & Resnichenko, A. G. (2012). Experimental verification of theoretical foundations making the basis of the substrate roughness surface automated control

- technology. *Telecommunications and Radio Engineering*, 71(19), 1791–1799. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v71.i19.80> [in English].
5. Mamalis, A. G., Nevliudov, I., & Romashov, Yu. (2021). An approach for numerical simulating and processing of measured electrical signals from board sensors installed on wheeled electro-mechanical platforms. *Journal of Instrumentation*, 16(10), P10006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/10/P10006> [in English].
  6. Nikitin, D. O., Nevlyudov, I. Sh., Zharikova, I. V., Bronnikov, A. I., & Strilets, R. E. (2025). Devising of a method for controlling products during photopolymer 3D printing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1(136)), 42–54. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706> [in English].
  7. Shtifzon, O. Y., & Novikov, P. V. (2021). *Teoriia avtomatychnoho upravlinnia. Neliniini ta dyskretni systemy* [Theory of automatic control. Nonlinear and discrete systems]. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].
  8. Han, S., & Bhattacharyya, S. P. (2018). PID controller synthesis using a v-Hurwitz stability criterion. *IEEE Control Systems Letters*, 2(3), 525–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2018.2842784> [in English].
  9. Bondarenko, D. M. (2025). Development of automated temperature control during polymer material extrusion in the three-dimensional printing process [Master's thesis, Kharkiv National University of Radio Electronics]. Open Electronic Archive of KhNURE. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/33576> [in Ukrainian].

Невлюдов Ігор Шакірович – д.т.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії в галузі науки і техніки України, Лауреат Державної премії України в галузі освіти, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. E-mail: [igor.nevliudov@nure.ua](mailto:igor.nevliudov@nure.ua), ORCID: 0000-0002-9837-2309.

Стрілець Роман Євгенович – к.т.н., асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. E-mail: [roman.strilets@nure.ua](mailto:roman.strilets@nure.ua), ORCID: 0000-0001-5123-8703.

Нікітін Дмитро Олександрович – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. E-mail: [dmytro.nikitin@nure.ua](mailto:dmytro.nikitin@nure.ua), ORCID: 0000-0002-5591-4438.

Бондаренко Дмитро Миколайович – магістр кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. E-mail: [dmytro.bondarenko4@nure.ua](mailto:dmytro.bondarenko4@nure.ua), ORCID: 0009-0002-3042-2821.

Місан Богдан Сергійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. E-mail: [bohdan.misan@nure.ua](mailto:bohdan.misan@nure.ua), ORCID: 0009-0007-4905-9280.

Пащенко Олександр Сергійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки. E-mail: [oleksandr.pashchenko@nure.ua](mailto:oleksandr.pashchenko@nure.ua), ORCID: 0009-0003-5244-5925.

Nevlyudov Igor Shakirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist and Engineer of Ukraine, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology, Laureate of the State Prize of Ukraine in Education, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics, and Safety Engineering of the Kharkiv National University of Radio Electronics. E-mail: [igor.nevliudov@nure.ua](mailto:igor.nevliudov@nure.ua), ORCID: 0000-0002-9837-2309.

Strilets Roman Yevgenyevich – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics, and Safety Engineering

of the Kharkiv National University of Radio Electronics. E-mail: roman.strilets@nure.ua, ORCID: 0000-0001-5123-8703.

Nikitin Dmytro Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics, and Safety Engineering of the Kharkiv National University of Radio Electronics. E-mail: dmytro.nikitin@nure.ua, ORCID: 0000-0002-5591-4438.

Bondarenko Dmytro Mykolayovych – Master’s Student at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics, and Safety Engineering of the Kharkiv National University of Radio Electronics. E-mail: dmytro.bondarenko4@nure.ua, ORCID: 0009-0002-3042-2821.

Misan Bogdan Serhiyovych – Postgraduate Student at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics, and Safety Engineering of the Kharkiv National University of Radio Electronics. E-mail: bohdan.misan@nure.ua, ORCID: 0009-0007-4905-9280.

Paschenko Oleksandr Serhiyovych – Postgraduate Student at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics, and Safety Engineering of the Kharkiv National University of Radio Electronics. E-mail: oleksandr.pashchenko@nure.ua, ORCID: 0009-0003-5244-5925.

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії  
відкритого доступу (CC BY 4.0)