

УДК 655.3.06:621.316.7

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНИХ І ПРОГНОЗУЮЧИХ АЛГОРИТМІВ ТЕМПЕРАТУРНОГО КЕРУВАННЯ В FFF/FDM-ДРУЦІ

Нікітін Д.О., Пащенко О.С.

e-mail: dmytro.nikitin@nure.ua
oleksandr.pashchenko@nure.ua

Науковий керівник – д.т.н., проф. Невлюдов І.Ш.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. КІТАРБІ
м. Харків, Україна

The study investigates the effectiveness of temperature control algorithms for the extruder in the FFF/FDM printing process. An experimental comparison of a standard PID controller, an adaptive APID controller, and a predictive MPC controller was conducted under conditions of variable thermal load. The evaluation was performed based on overshoot, temperature settling time, and layer formation stability. The obtained results confirmed the superiority of adaptive and predictive control methods, which ensure reduced temperature fluctuations and improved print quality.

Система управління температурою екструдера в FFF/FDM-друці має вирішальне значення для підтримки стабільності друку філаментом, рівномірності екструзії матеріалу та якості формування шарів. Оскільки нагрівальний вузол має значну теплову інерцію, змінні теплові навантаження та залежить від режимів друку моделі, доцільно провести експериментальне порівняння різних алгоритмів регулювання температури. У рамках цього дослідження будуть розглядаються такі алгоритми регуляції:

- стандартний PID-регулятор;
- адаптивний APID;
- прогнозуючий регулятор на основі MPC.

Метою цього експерименту є визначення ефективності кожного алгоритму за реальних умов друку та встановлення його впливу на стабільність температури і кінцеву якість виробу.

Базові умови друку: PLA-філамент, температура стола 60°C, сопло 0,4 мм, товщина шару 0,2 мм, швидкість 60 мм/с. Використовувалась тестова модель складної геометрії розміром 20×25×38 мм.

У ході експерименту варіювались такі параметри: температура екструзії (від 190°C до 210°C); швидкість друку (40 мм/с, 60 мм/с, 90 мм/с); подача матеріалу (від 90% до 110%); інтенсивність обдуву (від 0% до 100%); динамічні збурення руху головки.

Температурні дані реєструвались із частотою від 10 Гц до 20 Гц. Для кожного режиму виготовлялися три зразки з метою зменшення випадкових похибок. Оцінювання ефективності здійснювалось за показниками:

- величина перерегулювання;
- амплітуда та частота температурних коливань;
- стабільність ширини екструзії;
- наявність дефектів (перегрів, пропуски, ниткоутворення);
- геометрична точність виробів.

Запропонована методика дозволяє об'єктивно порівняти алгоритми регулювання та визначити їх вплив на стабільність температури й якість формування шарів.

Експериментальне дослідження передбачало серію тестових друків із застосуванням трьох алгоритмів керування температурою: класичного PID, адаптивного APID та прогнозуючого MPC. Дослідження проводилося в контрольованих умовах із поступовою зміною параметрів друку, температури сопла, швидкості переміщення, подачі матеріалу (flow) та інтенсивності обдуву.

Створювались різні теплові навантаження на нагрівальний блок з метою оцінки реакції системи керування на динамічні збурення. Під час друку здійснювався безперервний запис температурних кривих, що дозволило проаналізувати перехідні процеси, величину перерегулювання та стабільність температури в режимах зміни навантаження, які наведені на рисунку 1.

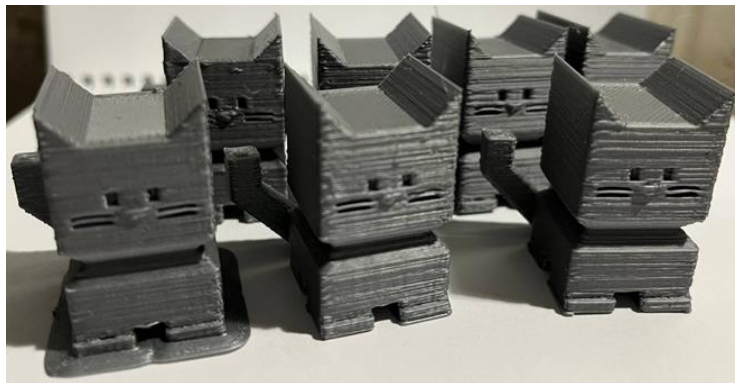
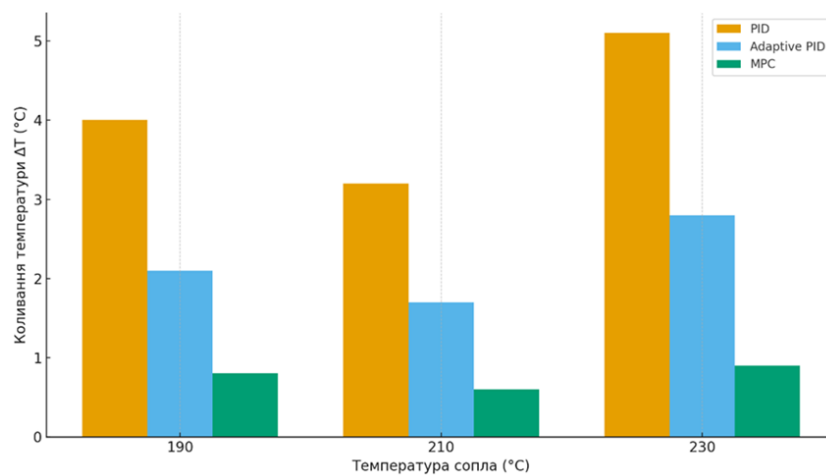


Рисунок 1 – Порівняння коливань температури для різних алгоритмів керування

Отримані результати показали, що:

- стандартний PID-регулятор демонструє більші амплітуди коливань і повільніший перехідний процес;
- APID забезпечує швидшу стабілізацію температури та зменшення перерегулювання;
- MPC демонструє найкращі показники компенсації теплових збурень завдяки прогнозуванню зміни температури.

Загальні результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – 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

Аналіз надрукованих зразків підтвердив кореляцію між стабільністю температурного профілю та якістю формування шарів, зменшенням дефектів і підвищенням геометричної точності виробів.

Список використаних джерел:

1. Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. ChemCatChem 2018, 10, 1512– 1525, <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>
2. Разумов-Фризюк Є.А., Гурін Д.В., Нікітін Д.О., та ін. (2022). Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку. Radiotekhnika, 2(209), С. 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>
3. Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (136), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
4. Нікітін Д.О (2024). Розробка моделі керуванням температурою фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 1(75), 31-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.031>