

ВПЛИВ СТРУКТУРИ ЗАПОВНЕННЯ НА ТЕРМОСТІЙКІСТЬ ВИРОБІВ FFF/FDM-ДРУКУ**І.В. Маслов**

Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: ivan.maslov@nure.ua

Анотація: У статті розглянуто параметри які можуть впливати на термічну стійкість виробів, виготовлених за технологією FFF/FDM. Були розглянуті основні типи структур заповнення та їх вплив на розподіл теплових навантажень у надрукованих деталях. Проведено аналіз, спрямований на визначення оптимальних параметрів заповнення, що забезпечують підвищену термічну стійкість матеріалу.

Ключові слова: 3D-друк, 3D-принтери, FFF/FDM технологія, термічна стійкість, заповнення моделі.

THE EFFECT OF FILL STRUCTURE ON THE HEAT RESISTANCE OF FFF/FDM-PRINTED PRODUCTS**Ivan Maslov**

Department of KITAP, Kharkiv National University of Radioelectronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauky Ave.,

E-mail: ivan.maslov@nure.ua

Annotation: The article discusses parameters that can affect the thermal stability of products manufactured using FFF/FDM technology. The main types of infill structures and their impact on the distribution of thermal loads in printed parts were considered. An analysis was carried out to determine the optimal infill parameters that ensure increased thermal stability of the material.

Keywords: 3D printing, 3D printers, FFF/FDM technology, thermal stability, model filling.

У сучасному світі технологія 3D-друку за методом FFF/FDM активно розвивається та займає важливе місце в таких галузях, як машинобудування, авіакосмічна, медична та будівельна промисловість. Одним із ключових чинників, що визначає якість та надійність надрукованих виробів, є їхня термічна стійкість, від якої залежить можливість експлуатації деталей у складних температурних умовах.

Одним із головних параметрів, що впливають на термічну поведінку надрукованих виробів, є структура внутрішнього заповнення. Вибір типу заповнення, його густини та орієнтації шарів безпосередньо впливає на рівномірність розподілу тепла, теплопровідність матеріалу та стійкість виробу до деформацій при нагріванні.

У даному дослідженні розглянуто вплив різних типів структур заповнення на термічну стійкість виробів, виготовлених за технологією FFF/FDM. Проведено експериментальний аналіз поведінки моделей із різними параметрами заповнення під дією теплового навантаження. Отримані результати дозволяють визначити оптимальні конфігурації внутрішньої структури, що забезпечують підвищену термостійкість і покращують експлуатаційні характеристики 3D-друкованих виробів.

Fused Deposition Modeling (FDM) – це адитивна технологія, що дозволяє виробляти тривимірні об'єкти за рахунок послідовного нашарування розплавленого пластикового матеріалу у вигляді стрічки. Завдяки їй, цифрову 3D-модель можна перетворити на фізичний об'єкт, рисунок 1 [1].

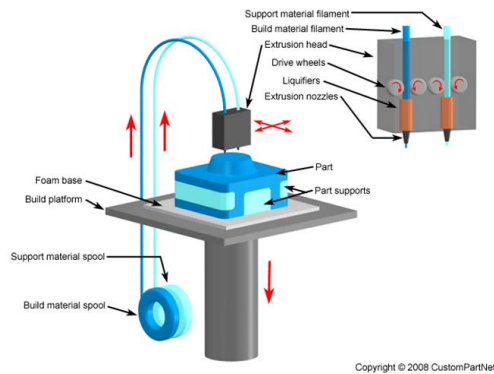


Рисунок 1 –Схема роботи 3D принтерів за технологією FDM

Технологія FDM функціонує на основі крокового створення об'ємного об'єкта, коли розплавлений полімерний матеріал нашаровується. Дуже важливо розуміти, що друк проходить декілька ключових етапів.

Отже, на етапі підготовки 3D моделі. Перший крок, створення або завантаження цифрової 3D моделі майбутнього виробу. Тут використовується 3D моделювання; на етапі друку. Після підготовки моделі програма перетворює її у набір інструкцій для 3D принтера, який принтер послідовно друкує деталь.

Принтер використовує пластичний ниткоподібний матеріал (філамент) для друку; на етапі нагрівання і з'єднання шарів. Плавлений матеріал, який нагрівся в екструдері, потім у розплавленому стані рухається і наноситься на платформу, в точності по геометрії моделі. Кожен шар, що охолоджується, після пояснення з'єднується, створюючи міцний зв'язок з попереднім; на етапі створення підтримувальних конструкцій.

Для друку ускладнених моделей, що мають елементи, які виступають, залежно від нароби, можуть використовуватись допоміжні конструкції підтримки. Як правило, конструкції виготовляються з матеріалу, який після друку легко видалити; на стадії остаточної обробки. Для покращення естетичних і механічних характеристик виріб після друкування, у більшості випадків, потребує обробки, і це включає: видалення підтримок, шліфування, фарбування, полірування.

Завдяки своїй легкості у використанні та широкій доступності, FDM 3D друк здобув популярність у багатьох галузях. Він активно застосовується для створення прототипів, виготовлення дрібних деталей, а також у навчальних і наукових проектах. Ця технологія знаходить широке застосування як у промисловості, так і в побуті, значно розширюючи горизонти інженерії та творчого проектування.

Переваги технології FDM:

- доступність. Принтери FDM досить вигідні за ціною, що робить їх привабливими для навчальних закладів, малих компаній і домашнього використання;
- простота використання. Ці принтери просто налаштовуються і не вимагають складного сервісу;
- великий асортимент матеріалів. Є можливість застосування різних видів полімерів, композитів, а також філаментів з добавками гуми або металу;
- висока швидкість друку. Ця технологія дозволяє оперативно виготовляти великі об'єкти;
- поєднання матеріалів. Декілька моделей принтерів мають можливість працювати з кількома матеріалами одночасно, що значно розширює їх функціональність в друці.
- надійність і легкість ремонту. Принтери FDM вирізняються своєю простотою в обслуговуванні та високим рівнем довговічності.

Недоліки технології FDM друку [2, 3]:

- обмежена роздільна здатність. Ця технологія не завжди гарантує необхідну точність для дуже маленьких або складних елементів;
- видимість шарів. Завдяки поетапній природі друку на поверхні об'єкта можуть виникати помітні лінії, які потребують подальшої обробки
- нерівна поверхня. Без подальшої обробки вироби можуть мати шорсткість;
- потреба у підтримках. Складні вироби вимагають використання додаткових конструкцій, які потрібно прибирати після завершення процесу друку;
- можливість зміни форми. Пластикові матеріали можуть деформуватися при нерівномірному нагріванні або охолодженні;
- чутливість матеріалів. Деякі філаменти потребують стабільних умов для зберігання, а також контролю температури і рівня вологості.

Параметри які впливають на якість друкованого виробу за технологією FFF/FDM, умовно можна поділити на [4]:

- температурні параметри (температура плавлення філаменту, температура платформи для друку «стіл», температура в середні камери);
- параметри які залежать від механіки 3D-принтера (діаметр сопла, швидкість друку, тип подачі матеріалу, кінематика 3D-принтера);
- параметри налаштування моделі до друку (товщина шару, швидкість подачі філаменту, щільність заповнення, кількість зовнішніх контурів, підтримувальні структури).

Давайте розглянемо температурні параметри, які залежать від матеріалу для друку. Один із основних аспектів FFF/FDM-друку – це температура екструдера. Це нагрівальний елемент, через який проходить філамент перед тим, як його видавлять. Вона визначає температуру плавлення полімеру і впливає на адгезію між шарами, рівномірність подавання матеріалу та якість поверхні виробу.

Для різних матеріалів цей параметр має власні оптимальні діапазони, таблиця 1.

Таблиця 1 – Властивості філаменту

Назва	Примітка
Полілактид (PLA)	біорозкладний, легко друкується, низька температура плавлення (від 180°C до 220°C).
Акрилонітрилбутадієнстирол (ABS)	міцний, термостійкий, потребує підігріву стола (від 230°C до 260°C).
Полікарбонат (PC)	висока міцність і прозорість, температура екструзії від 260°C до 300°C
PETG	поєднання міцності та простоти друку, стійкий до вологи.
Нейлон (PA)	зносостійкий, гнучкий, вбирає вологу.
TPU/TPE	еластомери, гнучкі, з високою ударостійкістю.
HIPS	легкий, використовується як підтримка, розчиняється в лимонній кислоті.
PVA/BVOH	водорозчинні матеріали для підтримок.

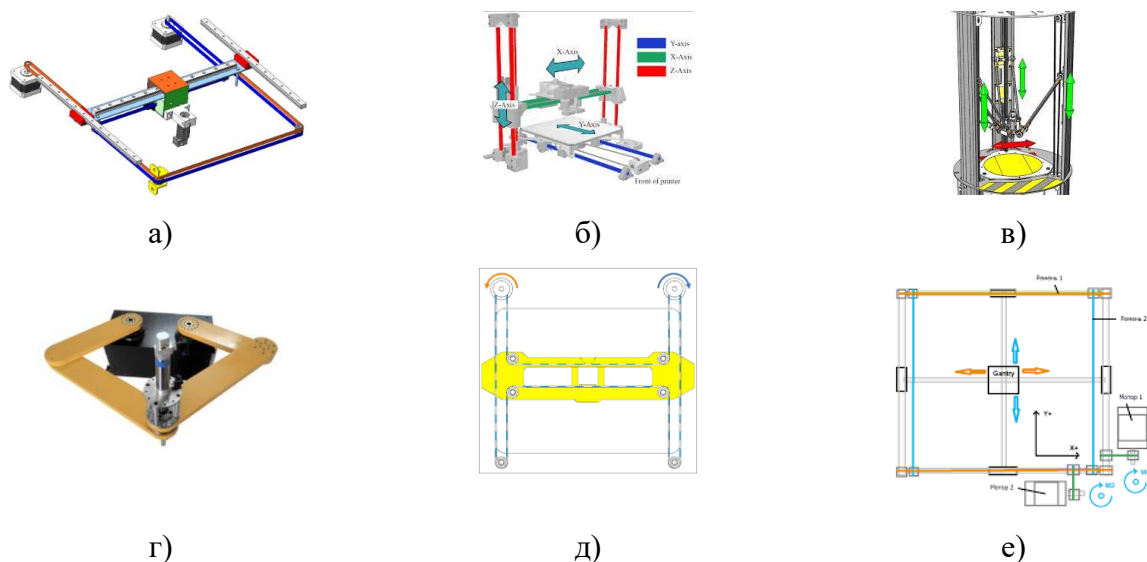
Якщо температура недостатня, філамент не може повністю розплавитися, що призводить до нерівномірного нанесення шару і погіршення зчеплення між ними. Занадто висока температура може викликати перегрів, надмірне витікання матеріалу з форсунки та утворення дефектів на поверхні. Температура робочої платформи є ключовим показником, що забезпечує прилипання першого шару моделі до поверхні.

Нагрівання запобігає відшаровуванню та викривленню моделі, що є особливо важливим для матеріалів з високим коефіцієнтом термічного розширення.

Для PLA пластику зазвичай рекомендується температура платформи в межах 50°C до 60°C. Для ABS пластику оптимальна температура складає від 90°C до 110°C, а для PETG від 70°C до 90°C. Недостатнє нагрівання може викликати відрив моделі під час друку, тоді як надмірне нагрівання призводить до деформації нижніх шарів або втрати геометричної точності. Для деяких типів матеріалів, таких як ABS, ASA, нейлон або полікарбонат, критично важливо стежити за температурою в робочій камері. Закрита камера з обігрівом, що підтримує температуру від 40°C до 60°C, забезпечує рівномірне охолодження шарів та зменшує внутрішні напруження. Це дозволяє уникнути розшарування або деформації виробу [5, 6].

Механічні параметри. Діаметр сопла (Nozzle diameter), визначає товщину матеріальної лінії, яка наноситься, та має безпосередній вплив на точність, швидкість та міцність виробу. Найбільш поширений діаметр становить 0,4 мм, але існують також варіанти від 0,2 мм для високоякісного друку до 0,8 мм для швидкого створення великих моделей. Зменшення діаметра сопла дозволяє створювати тонкі деталі, але це потребує більше шарів і часу. Збільшення діаметра пришвидшує процес, проте знижує деталізацію і може призвести до появи видимих меж між шарами [7].

Кінематична схема 3D-принтера – це основа, на якій будується механічна система, що відповідає за рух робочих вузлів, таких як екструдер і платформа [8]. Вона не лише визначає максимальну швидкість, але й впливає на динаміку руху, стабільність позиціонування та рівень вібрацій, які, в свою чергу, можуть позначитися на якості друку. Існує кілька основних типів кінематичних систем для FDM-принтерів: картезіанська, CoreXY, H-Bot, Delta, Polar та Scara, рисунок 3.



а – CoreXY кінематика; б – картезіанська кінематика; в – Delta кінематика;
г – Scara кінематика; д – H-bot кінематика; е – Ultimaker кінематика

Рисунок 3 – Види кінематик 3D-принтерів

Швидкість друку (Print speed) – це один з найважливіших параметрів у процесі 3D-друку за технологією FFF/FDM. Вона визначає, як швидко переміщується друкуюча головка або платформа під час видавлювання матеріалу. Цей показник безпосередньо впливає на час виготовлення виробу, точність позиціонування, якість поверхні та адгезію між шарами. Загалом,

- швидкість переміщення при екструзії (звичайно від 30 мм/с до 100 мм/с);
- швидкість переміщення без подачі матеріалу від 150 мм/с до 300 мм/с;
- прискорення (acceleration) та ривок (jerk), які визначають, як швидко принтер змінює напрям або швидкість руху.

Вплив маси рухомих вузлів на друк. Маса рухомих елементів, таких як каретки, екструдери, шланги та кабелі, має значний вплив на максимальну швидкість і прискорення. Коли маса збільшується, зростає інерція, що може призводити до вібрацій, риплінгу (хвилястості поверхні) і зниження точності [9]. Саме тому сучасні FDM-принтери часто використовують системи, як Remote direct drive або Bowden, де подача філаменту відбувається через трубку, а важкий мотор розташований поза рухомою кареткою. Це допомагає зменшити масу головки та підвищити швидкість друку без втрати точності рисунок 4.



Рисунок 4 – Типи подачі філаменту до екструдера

Динамічні параметри, такі як прискорення та ривок, мають велике значення. Окрім номінальної швидкості друку, ці параметри визначають, як швидко екструдер може змінювати напрямок руху. Якщо значення прискорення занадто великі, це може призвести до «тремтіння» або розмиття контурів, відомого як ефект «Ringing». А якщо значення занадто низькі, процес друку сповільнюється. Зазвичай оптимальні значення виглядають так [10]:

- прискорення від 1000 мм/с² до 5000 мм/с²;
- ривок від 5 мм/с до 20 мм/с.

Ці параметри також залежать від жорсткості рами, якості ременів і типу приводу.

Параметри налаштування моделі до друку. Товщина шару (Layer height) визначає вертикальну роздільну здатність друку. Вона безпосередньо впливає на деталізацію, шорсткість поверхні та тривалість виготовлення, рисунок 5.



Рисунок 5 – Приклади висоти шару для друку

Зазвичай використовують значення від 0,05 мм до 0,3 мм. Менша товщина шару дозволяє досягти високої точності та гладкої поверхні, але при цьому збільшує час друку. З іншого боку, товсті шари забезпечують швидше виготовлення, проте поверхня виробу стає грубішою, а дрібні деталі менш помітними [11, 12].

Швидкість подачі філаменту або коефіцієнт екструзії (flow rate) контролює, скільки матеріалу виходить з сопла. Зазвичай вона становить близько 100% від номінального значення, але може коригуватися в межах $\pm 5\%$. Неправильне налаштування потоку може призвести до дефектів друку: при недоподачі виникають щілини та слабке з'єднання шарів, а при надлишковій подачі – потовщення і напливи матеріалу.

Щільність заповнення (Infill density) визначає відсоток внутрішнього об'єму моделі, заповненого матеріалом. Цей параметр впливає на масу, міцність і час виготовлення рисунок 6.

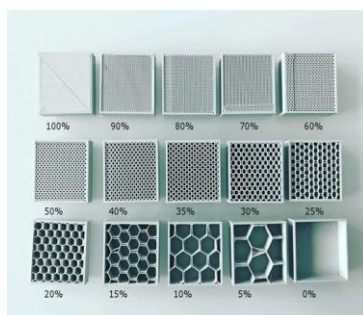


Рисунок 6 – Приклади заповнення 3D-моделі

Типові значення коливаються від 10 % (для декоративних виробів) до 100% (для функціональних або навантажених деталей). Окрім щільності, важливим є тип структури заповнення, наприклад, «grid», «gyroid» або «honeycomb», які поєднують міцність із мінімальними витратами матеріалу[13-19].

Кількість зовнішніх контурів (Shells або Walls) визначає товщину оболонки моделі. Зазвичай використовують від 2 до 4 периметрів. Збільшення їх кількості покращує міцність і жорсткість, особливо під час механічних навантажень, рисунок 7. Проте це також призводить до збільшення витрат матеріалу та часу друку. Для тонкостінних або декоративних моделей кількість периметрів може бути мінімальною.

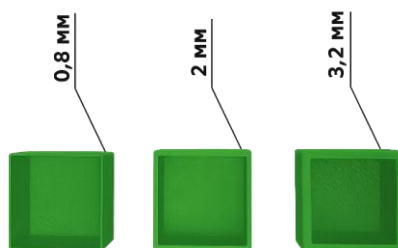
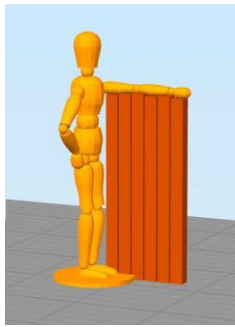
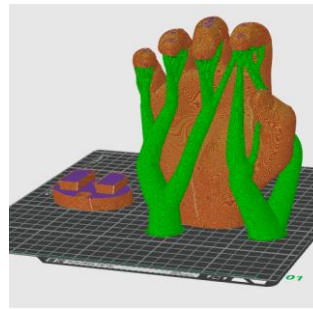


Рисунок 7 – Приклади товщини стінок моделі

Підтримувальні структури. Коли мова йде про друк складних моделей із нависаннями, важливо використовувати підтримки (supports), рисунок 8. Вони виготовляються з того ж матеріалу, що й основна модель, або з розчинного матеріалу, який можна легко видалити після завершення друку. Параметри підтримок, такі як тип, щільність і відстань до моделі, допомагають знайти оптимальний баланс між стабільністю друку та легкістю їх видалення.



а)



б)

а – нормальні підтримки моделі ; б – деревоподібні підтримки моделі
Рисунок 8 – Види підтримки моделі

ВИСНОВКИ. У даній науковій статті проведено дослідження впливу структури заповнення на термічну стійкість виробів, виготовлених за технологією FFF/FDM. Було виконано збір даних, проведено

Під час аналізу розглянуто вплив різних типів заповнення таких як лінійне, сотоподібне, трикутне та гірської решітки на поведінку надрукованих зразків під дією теплового навантаження. Основну увагу приділено особливостям теплопровідності, рівномірності розподілу температури та деформаційним змінам у матеріалі залежно від обраної структури внутрішнього заповнення.

Аналіз показав, що структура заповнення суттєво впливає на термічну стійкість виробів. Зокрема, більш щільні структури забезпечують вищу здатність до збереження форми при нагріванні, тоді як легкі пористі заповнення сприяють зменшенню маси, але водночас знижують термостійкість.

Таким чином, результати дозволяють зробити висновок, що правильний вибір структури заповнення є одним із ключових факторів у підвищенні термічної стабільності та експлуатаційної надійності виробів, виготовлених за технологією FFF/FDM. Отримані дані можуть бути використані для подальшої оптимізації параметрів 3D-друку з метою створення більш стійких і функціональних деталей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.
2. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. - М.: DMK-Press, 2020. - 220 p.
3. Чала, О., Сливка, А. (2023) Рівні засобів ІоТ в інформаційних технологіях. Виробництво & Мехатронні Системи: матеріали VII Міжнародної конференції, Харків, С. 51-60.
4. 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>
5. 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>.
6. Manapat J, Chen Q, Ye P, Advincula R (2017) 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. Macromol Mater Eng 302:1600553.

7. Yurii Kuznietsov, Oleksii Solntsev Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 // Journal of the Technical University of Gabrovo, vol.65, 2022.-p.p.1-6.
8. Johnson, G. A., French, J. J. (2018). Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials. *Advances in Technology Innovation*, 3 (4), 179–184
9. Igor Nevliudov, Iryna Botsman, Olena Chala, Kirill Khrustalev. Automated System Development for the Printed Circuit Boards Optical Inspection Using Machine Learning Methods // Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference «INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES (IST-2021)». –Odessa, September 13-19, 2021. – PP. 234-238.
10. Nevliudov, I., Chala, O., Botsman, I. (2021), "Determination of technological process modes for surface formation of substrates for functional components of microoptoelectromechanical systems", *Functional Materials*, No. 28(2), P. 381–385. DOI: <https://doi.org/10.15407/fm28.02.381>
11. Филипенко, О.І., Чала, О.О., Відешин, М.І. (2017). Технологічні дефекти виробництва кремнієвих підкладок для функціональних відбиваючих поверхонь МОЕМС-перемикачів. Системи управління, навігації та зв'язку, Полтава: ПНТУ, 2 (42), 61-63.
12. Филипенко, О.І., Чала, О.О., Відешин, М.І. (2017). Технологічні фактори виробництва, що впливають на якість покриттів дзеркальних поверхонь МОЕМС-перемикачів. Наукові нотатки, 57, 178-183.
13. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). Improvement of SUSAN Image Filtering Method for PCB Quality Inspection. *Journal of universal science research*, 2(7), 106-116.
14. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). Humanoid Robot Gripping Device 3D Model Development Siemens NX Unigraphics. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(7), 189-196.
15. Adaptive Regulation of the Manipulator's Movement Speed Depending on the Distance to the Person and the Level of Load on the Actuator / V. Yevsieiev, S. Maksymova, S. Starykova, Jafar Ababneh // *The Multidisciplinary Journal of Science and Technologe.* - Volume 5, Issue 9. - P. 9-29.
16. Yevsieiev V. Comparative Analysis of Modifications of RRT Algorithms for Route Planning of a Mobile Robot/ V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2024 : proceedings of the I st All-Ukrainian Conference, Kharkiv, May 16-17, 2024.* – Kharkiv, 2024. – P. 25-28.
17. Yevsieiev V. Route planning for a mobile robot in 3d space based on an algorithm probabilistic roadmap / V. Yevsieiev, S. Maksymova, Amer Abu-Jassar // *Journal of Universal Science Research.* – 2024. – Vol. 2(4). – P. 22-33.
18. Невлюдов І. Ш. ВЕАМ робототехніка : навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, С. С. Максимова ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки, кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР). – Кривий Ріг : Видавець Чернявський Д. О., 2024. – 276 с. – ISBN 978-617-8045-79-1
19. Yevsieiev V. Implementation of STEM education in distance learning conditions during martial law in Ukraine: challenges, tools and prospects for training future engineers / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGA (MC&FPGA-2025) : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025.* – Kharkiv : NURE. – P. 21-25.

Науковий керівник: Нікітін Дмитро Олександрович, Ph.D., доц. каф. КІТАР Харківського Національного Університету Радіоелектроніки