

Моголівський В. О.

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ ТА РОЗМІЩЕННЯ ДАТЧИКІВ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ЛАБОРАТОРІЇ 3D-ДРУКУ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

Розглянуто підходи до створення цифрових двійників в університетському середовищі. Досліджено рекомендований набір датчиків, необхідний для створення цілісного цифрового двійника університетської лабораторії. Розглянуто підхід до вибору та розміщення датчиків для цифрового двійника лабораторії 3D-друку на основі генетичного алгоритму. Сформульовано математичну постановку задачі. Запропоновано формат хромосоми, зважену фітнес-функцію та представлення тривимірного простору лабораторії.

Ключові слова: цифровий двійник, генетичний алгоритм, лабораторія 3D-друку, оптимізація розміщення датчиків, оптимізаційна задача.

Вступ

Концепція Digital Twin набула широкого поширення в багатьох галузях: дослідження космосу, промислове виробництво, архітектурний дизайн, розумні міста, міське планування, моделювання клімату та енергоефективність [4]. Цифрові двійники дають змогу отримувати цінну інформацію про фізичні системи та сприяють впровадженню інновацій.

Цифровий двійник здатен допомогти університетам керувати складною інфраструктурою та динамічною освітньою діяльністю. Впровадження цифрових двійників надає уніфіковану структуру для розуміння й оптимізації взаємопов'язаних систем шляхом постійного збору даних, моніторингу в реальному часі та моделюванню з метою прогнозування. Цифровий двійник надає можливість передбачати проблеми та будувати стратегії для їх недопущення, замість пасивного реагування на несподівані проблеми.

Перспективним видається впровадження концепції цифрового двійника у середовищі університету [7]. На основі створення віртуальних копій приміщень навчальних корпусів та їхніх систем опалення, вентиляції, кондиціонування і критично важливого обладнання навчальні заклади можуть запроваджувати протоколи прогнозованого обслуговування, які мінімізують збої в роботі та оптимізують розподіл ресурсів. Зокрема така концепція може бути корисною для університетських лабораторій, таких як лабораторії електроніки чи 3D-друку [3; 6; 10].

У цьому дослідженні обговорюються деякі підходи до вирішення проблеми вибору та розміщення датчиків у лабораторії 3D-друку, необхідних для функціонування цифрового двійника, на основі генетичного алгоритму [1]. Сформульовані деякі рекомендації щодо побудови цифрового двійника для університетської лабораторії 3D-друку.

Огляд літератури

Концепцію цифрового двійника вперше запропонував Майкл Грівс у 2002 р. [9]. Спершу вона стосувалася тільки промислового виробництва, та згодом активно поширилася на різноманітні матеріальні та нематеріальні об'єкти, як-от промислові процеси або складні фізичні системи [11]. Цифрові двійники — це точні цифрові копії об'єктів реального світу з багатьма рівнями деталізації [8]. Їх активно впроваджують у різні галузі промисловості, наприклад у молочне виробництво [15]. Цифрові двійники також активно починають застосовувати для інших галузей, безпосередньо не пов'язаних із промисловим виробництвом, наприклад для моделювання бізнес-процесів в установах та організаціях [12]; перспективним видається їх застосування у більш загальному контексті концептуального моделювання.

Концепція цифрового двійника демонструє високу перспективність для університетського середовища [7]. Сото й колеги дослідили створення цифрового двійника офісного приміщення відкритого плану в університетському містечку [7]. Створений ними цифровий двійник збирав та аналізував такі показники, як температура, вологість і зайнятість приміщення [7]. Отже, цифровий двійник сприяє підтримці ефективного та сталого будівництва на території університету [7].

Характеристика лабораторних датчиків

Побудова цифрового двійника для університетських лабораторій є досить складним завданням з урахуванням того, що самі датчики можуть бути різних типів із широким спектром характеристик. У статті ми розглядаємо лабораторію 3D-друку. Проте описаний підхід може бути застосований і до інших типів університетських лабораторій, таких як лабораторії електроніки, робототехніки тощо.

Датчики, характерні для цифрового двійника університетської лабораторії, можна розділити на п'ять категорій: датчики середовища, стану обладнання, людської діяльності, безпеки та інвентаризації. Датчики навколишнього середовища вимірюють температуру, вологість, присутність частинок VOC і шумове забруднення. Всі перелічені фактори, очевидно, є важливими для комфортного робочого середовища [5]. Крім того, температура і вологість мають вирішальне значення не лише для лаборантів, а й для належного функціонування такого обладнання, як 3D-принтери чи паяльні станції [13]. Датчики стану обладнання відстежують рівень вібрації, споживання енергії та розподіл тепла. Вони гарантують, що обладнання перебуває в хорошому стані й використовується належним чином. Датчики активності людини відстежують зайнятість лабораторії: використання простору та обладнання. Вони дають змогу адміністрації визначати моделі використання лабораторії та планувати розширення або зміни робочого графіка. Крім того, вони допомагають оцінити фізичний вплив організму людини на температуру і вологість, які є ключовими для деяких процесів. Датчики безпеки відстежують небезпеку пожежі, як-от дим, надмірне тепло або полум'я. Датчики запасів — це датчики ваги та тиску для витратних матеріалів.

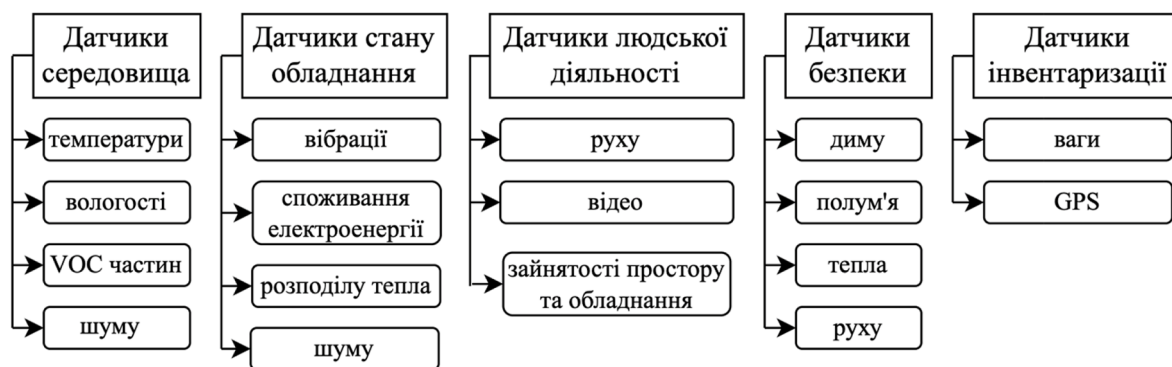


Рис. 1. Класифікація датчиків, необхідних для створення цифрового двійника університетської лабораторії

Формалізація задачі

Для оптимізації вибору та розміщення датчиків лабораторії 3D-друку пропонується використовувати генетичні алгоритми. Середовище лабораторії будемо моделювати як набір точок у тривимірному просторі. Простір, який займає певний об'єкт, задається двома точками:

- $P_{\min}$ — лівий дальній нижній край об'єкта;
- $P_{\max}$ — правий ближній верхній край об'єкта.

Простір лабораторії визначається шістьма наборами пар точок: S_{room} , $S_{\text{obstacles}}$, $S_{\text{fdmPrinters}}$, $S_{\text{slaPrinters}}$, $S_{\text{washStations}}$, $S_{\text{cadWorkstations}}$. Для експериментів було використане середовище, задане наборами точок (рис. 2).

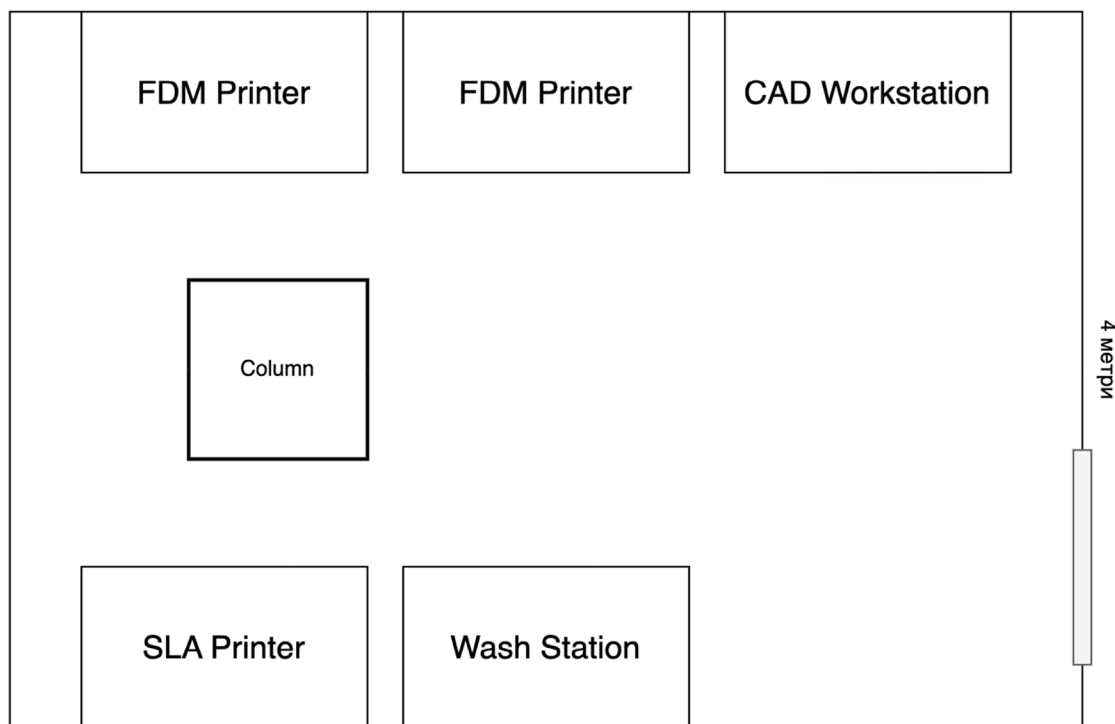


Рис. 2. Представлення лабораторії 3D-друку (вигляд згори)

Рішення задачі були представлені як хромосоми з таким виглядом:

$$(0001_{type_s} \ 010...101_{pos_x} \ 010...101_{pos_y} \ 010...101_{pos_z})_{s_1} \dots (\dots)_{s_n}, \quad (1)$$

де 0001_{type_s} — це 4 біти, які ідентифікують певний вид датчика, наступні 48 бітів зберігають розміщення датчика у тривимірному просторі (по 16 бітів на кожну з осей x , y , z). Одержуємо фрагмент хромосоми s_1 , що представляє датчик певного виду та його розміщення у просторі, таких фрагментів може бути n . Цей формат хромосоми може представляти до 15 датчиків, розміщених у тривимірному просторі розміром 65 535 одиниць по кожній з осей. За необхідності довжину окремих частин хромосоми можна збільшити, тоді її довжина буде розраховуватися за формулою:

$$L_c = (l_{type_s} + l_x + l_y + l_z) \cdot n, \quad (2)$$

де l_{type_s} — це кількість бітів для представлення типу датчика, а l_x , l_y , l_z — кількості бітів для представлення позиції датчика по осям x , y , z .

Початкова популяція з 1000 особин генерується випадковим чином.

Фітнес-функція може набувати значень від 0 до 1 та визначається як

$$F_k = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3, \quad (3)$$

де f_1, f_2, f_3 — дочірні фітнес-функції, що оцінюють хромосому за різними параметрами, w_1, w_2, w_3 — ваги кожної з дочірніх фітнес-функцій у результуючій F_k , встановлені як 0.4, 0.3, 0.3 відповідно. Дочірні фітнес-функції можуть набувати значень від 0 до 1 та оцінюють такі параметри:

- f_1 — оцінює можливість монтажу датчика у приміщенні. Дозволяється розміщення на стінах і стелі. Не дозволяється поза приміщенням, на підлозі чи всередині перешкоди. Віддає перевагу розміщенням датчиків на стінах, також враховує висоту розміщення: що вище розміщений датчик, то вище значення f_1 .
- f_2 — оцінює покриття датчиком необхідних об'єктів (3D принтерів тощо). Функція враховує мінімальну та максимальну дальність дії датчика, щоб визначити, чи покриває він об'єкт. Також враховує наявність перешкод (колон тощо) на шляху.
- f_3 — оцінює вартість обраних датчиків.

Таким чином виникає оптимізаційна задача, яка полягає у мінімізації вартості використаних датчиків:

$$\sum_x \sum_y \sum_z u_{xyz} \cdot c_i \rightarrow \min(4),$$

за обмежень на функції f_1, f_2, f_3 , де u_{xyz} — 1, якщо в місце (x, y, z) встановлено пристрій i -го типу, інакше 0; c_i — ціна пристрою i -го типу.

Розглянемо розміщення тепловійних датчиків чотирьох видів із діапазоном ефективної дії 150, 200, 300, 500 одиниць і вартістю 10, 25, 40, 100 одиниць відповідно.

Застосувавши запропонований підхід, отримаємо таке розміщення датчиків у приміщенні лабораторії:

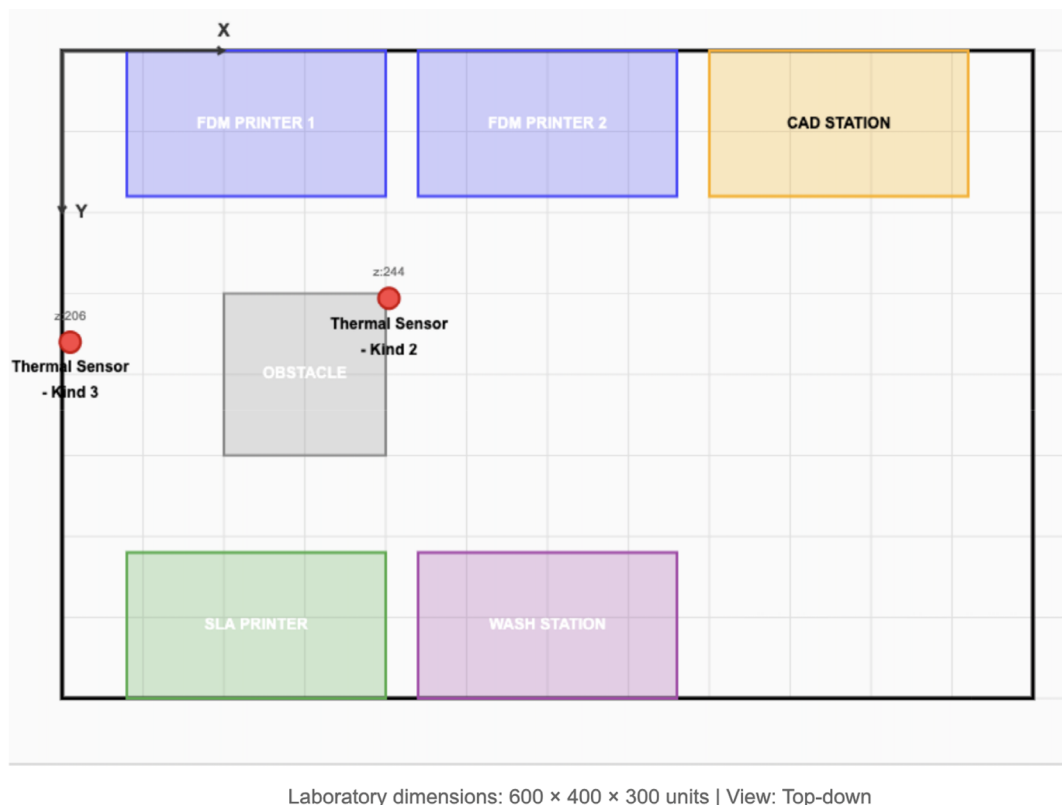


Рис. 3. Розміщення тепловійних датчиків у лабораторії 3D-друку (вид згори)

Висновки та обговорення

Концепція цифрового двійника є перспективною для університетського середовища, зокрема лабораторій електроніки чи 3D-друку. Для її застосування описано математичну модель цифрового двійника університетської лабораторії 3D-друку. Сформульовано математичну задачу вибору параметрів моделі, а саме типів датчиків і їх розміщення. Для вирішення задачі застосовано генетичний алгоритм зі зваженою фітнес-функцією, яка оцінює можливість встановлення датчика в певній позиції, охоплення ним об'єктів інтересу та вартість датчика. Охарактеризовано п'ять категорій датчиків, необхідних для цілісного цифрового двійника лабораторії: датчики середовища, стану обладнання, людської діяльності, безпеки та інвентаризації. Ретельний підбір датчиків важливий як для забезпечення комфортного робочого середовища для лаборантів, так і для належного функціонування такого обладнання лабораторії, як 3D-принтери чи паяльні станції.

Перспективним видається створення системи керування цифровим двійником на основі мікросервісної архітектури з використанням машин станів для координації операційних процесів, таких як аналіз даних, отриманих з датчиків, прийняття рішень щодо зміни режимів роботи датчиків і самих пристроїв. Основні підходи до подібного моніторингу та координації в загальних рисах сформульовано в [2; 14], водночас для подальшого розвитку цих підходів необхідне максимальне врахування специфіки предметної галузі.

Список літератури

1. Глибовець М. М. Еволюційні алгоритми / Микола Миколайович Глибовець, Наталія Михайлівна Гуласва. — Київ : НаУКМА, 2013. — 828 с.
2. Олецкий О. В. Координація мікросервісів із використанням машин станів [Електронний ресурс] / Олексій Віталійович Олецкий, Віталій Олегович Моголівський // Наукові записки НаУКМА. Комп'ютерні науки. — 2025. — Т. 7. — С. 4–10. — Режим доступу: <https://doi.org/10.18523/2617-3808.2024.7.4-10> (дата звернення: 18.06.2025). — Назва з екрана.
3. 3D printing and implementation of digital twins: current trends and limitations [Electronic resource] / Antreas Kantaros [et al.] // *Applied system innovation*. — 2021. — Vol. 5, no. 1. — P. 7. — Mode of access: <https://doi.org/10.3390/asi5010007> (date of access: 12.06.2025). — Title from screen.
4. Attaran M. Digital Twin: benefits, use cases, challenges, and opportunities [Electronic resource] / Mohsen Attaran, Bilge Gokhan Celik // *Decision analytics journal*. — 2023. — Vol. 6. — P. 100165. — Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165> (date of access: 15.06.2025). — Title from screen.
5. Albelda-Estellés Ness M. C. Indoor relative humidity: relevance for health, comfort, and choice of ventilation system [Electronic resource] / Maria Coral Albelda-Estellés Ness // 3rd Valencia International Biennial of Research in Architecture, VIBRArch, 9–11 November 2022. — València, 2022. — Mode of access: <https://doi.org/10.4995/vibrarch2022.2022.15237> (date of access: 18.06.2025). — Title from screen.
6. Building digital twins of 3D printing machines [Electronic resource] / T. DebRoy [et al.] // *Scripta materialia*. — 2017. — Vol. 135. — Pp. 119–124. — Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.005> (date of access: 12.06.2025). — Title from screen.
7. Developing a Digital Twin on a university campus to support efficient and sustainable buildings [Electronic resource] / Borja Garcia de Soto [et al.] // *Creative construction e-conference 2023*, Keszthely, Hungary, 20–23 June 2023. — Online, 2023. — Mode of access: <https://doi.org/10.3311/ccc2023-007> (date of access: 15.06.2025). — Title from screen.
8. Digital Twin: architectures, networks, and applications. — [S. l.] : Springer, 2024.
9. Digital Twin evolution: a 30-year journey that changed industry | simio [Electronic resource] // Simio. — Mode of access: <https://www.simio.com/digital-twin-evolution-a-30-year-journey-that-changed-industry/> (date of access: 15.06.2025). — Title from screen.
10. Digital Twins for defect detection in FDM 3D printing process [Electronic resource] / Chao Xu [et al.] // *Machines*. — 2025. — Vol. 13, no. 6. — P. 448. — Mode of access: <https://doi.org/10.3390/machines13060448> (date of access: 12.06.2025). — Title from screen.
11. Digital Twins: recent advances and future directions in engineering fields [Electronic resource] / Kamran Iranshahi [et al.] // *Intelligent systems with applications*. — 2025. — P. 200516. — Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516> (date of access: 12.06.2025). — Title from screen.
12. Grieves M. W. Digital Twins: past, present, and future [Electronic resource] / Michael W. Grieves // *The digital twin*. — Cham, 2023. — Pp. 97–121. — Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4 (date of access: 15.06.2025). — Title from screen.
13. Hamid R. A. Influence of Humidity on the Tensile Strength of 3D Printed PLA Filament [Electronic resource] / Rahimah Abdul Hamid, Fatima Hanem Hamezah, Jeefferie Abd Razak // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. — Singapore, 2022. — Pp. 497–502. — Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8954-3_47 (date of access: 18.06.2025). — Title from screen.
14. Oletsky O. On supervising and coordinating microservices within web applications on the basis of state machines / Oleksiy Oletsy, Vitalii Moholivskiy // *CEUR workshop proceedings*. — 2025. — Vol. 3909.
15. Risk analysis and cybersecurity enhancement of Digital Twins in dairy production [Electronic resource] / Tetiana Savchenko [et al.] // *Technology audit and production reserves*. — 2025. — Vol. 2, no. 2 (82). — Pp. 37–49. — Mode of access: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.325422> (date of access: 15.06.2025). — Title from screen.

References

- Albelda-Estellés Ness, M. C. (2022). Indoor relative humidity: Relevance for health, comfort, and choice of ventilation system. In *3rd valencia international biennial of research in architecture, vibrarch*. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/vibrarch2022.2022.15237>.
- Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>.
- DebRoy, T., Zhang, W., Turner, J., & Babu, S. S. (2017). Building digital twins of 3D printing machines. *Scripta Materialia*, 135, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.005>.
- Digital Twin evolution: A 30-year journey that changed industry | simio*. (n. d.). Simio. <https://www.simio.com/digital-twin-evolution-a-30-year-journey-that-changed-industry/>.
- Digital Twin: Architectures, networks, and applications*. (2024). Springer.
- Garcia de Soto, B., Sanchis, Z., Ezzeddine, A., Mengiste, E., Padilla, M., & Karmacharya, S. (2023). Developing a Digital Twin on a university campus to support efficient and sustainable buildings. In *Creative construction e-conference 2023*. Budapest University of Technology and Economics. <https://doi.org/10.3311/ccc2023-007>.
- Grieves, M. W. (2023). Digital Twins: Past, present, and future. In *The digital twin* (pp. 97–121). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4.
- Hamid, R. A., Hamezah, F. H., & Abd Razak, J. (2022). Influence of humidity on the tensile strength of 3D printed PLA filament. U *Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 497–502). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8954-3_47.
- Hlybovets, M. M., & Hulaieva, N. M. (2013). *Evolutsiini alhorytmy*. NaUKMA [in Ukrainian].
- Iranshahi, K., Brun, J., Arnold, T., Sergi, T., & Müller, U. C. (2025). Digital Twins: Recent advances and future directions in engineering fields. *Intelligent Systems With Applications*, 200516. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516>.
- Kantaros, A., Piromalis, D., Tsaramirsis, G., Papageorgas, P., & Tamimi, H. (2021). 3D printing and implementation of digital twins: Current trends and limitations. *Applied System Innovation*, 5 (1), 7. <https://doi.org/10.3390/asi5010007>.
- Oletsky, O., & Moholivskiy, V. (2025). On supervising and coordinating microservices within web applications on the basis of state machines. *CEUR Workshop Proceedings*, 3909.
- Oletskyi, O. V., & Moholivskiy, V. O. (2025). Koordynatsiia mikroservisiv iz vykorystanniam mashyn staniv. *NaUKMA Research Papers. Computer Science*, 7, 4–10. <https://doi.org/10.18523/2617-3808.2024.7.4-10> [in Ukrainian].

- Savchenko, T., Lutska, N., Vlasenko, L., Sashnova, M., Zahorulko, A., Minenko, S., Ibaiev, E., & Tytarenko, N. (2025). Risk analysis and cybersecurity enhancement of Digital Twins in dairy production. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (2(82)), 37–49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.325422>.
- Xu, C., Lu, S., Zhang, Y., Zhang, L., Song, Z., Liu, H., Liu, Q., & Ren, L. (2025). Digital Twins for defect detection in FDM 3D printing process. *Machines*, 13 (6), 448. <https://doi.org/10.3390/machines13060448>.

V. Moholivskyi

OPTIMIZATION OF 3D PRINTING LABORATORY DIGITAL TWIN SENSORS SELECTION AND PLACEMENT BASED ON GENETIC ALGORITHMS

The concept of the Digital Twin shows great prospects for the university environment. It can assist universities in managing complex infrastructure and dynamic educational activities. The Digital Twin provides a unified framework for understanding and optimizing interconnected systems through continuous data collection, real-time monitoring, and predictive modeling. It empowers institutions to predict issues and create strategies to prevent them, instead of passively reacting to unexpected difficulties. In particular, the concept of the Digital Twin could be helpful for university laboratories such as electronics or 3D printing laboratories.

Approaches for creating digital twins in a university environment are studied. The set of sensors necessary to create a comprehensive digital twin of a university laboratory is discussed. Five categories of sensors are described: environmental, equipment condition, human activity, safety, and inventory. Careful selection of sensors is crucial both for ensuring a comfortable working environment for lab technicians and proper functioning of equipment such as 3D printers or soldering stations.

An approach to selecting and placing sensors for a digital twin of a 3D printing laboratory based on a genetic algorithm is considered. A mathematical model of the problem is formulated. The chromosome format, the weighted fitness function, and the representation of the three-dimensional space of the laboratory are proposed. The weighted fitness function evaluates the possibility to install a sensor in a particular location, the coverage of objects of interest, and the cost of a sensor. It seems promising to create a digital twin control system based on microservice architecture using state machines to coordinate operational processes such as analyzing data received from sensors, making decisions on changing the operating modes of sensors and the devices themselves.

Keywords: digital twin, genetic algorithm, 3D printing laboratory, sensor placement optimization, optimization problem.

Матеріал надійшов 18.06.2025



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)