

Володимир Васильович Давиденко¹, Вадим Вячеславович Медведєв²¹аспірант кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)

E-mail: y.davydenko-mm24@iit.kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8325-603X>. ResearcherID: [PNI-7134-2026](https://orcid.org/PNI-7134-2026)²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)

E-mail: vadim.medvedev@ua.fm. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0439-6909>. ResearcherID: [RID145844](https://orcid.org/RID145844)**АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА**

Об'єктом дослідження є процес технологічної підготовки виробництва деталей у машинобудуванні, зокрема верифікація маршрутно-операційного технологічного процесу (МОТП). Запропоновано алгоритм, що реалізує замкнений цикл: від розпізнавання поверхонь 3D-моделі та синтаксичного аналізу МОТП до автоматичної конвертації в операційний технологічний процес (ОТП), поопераційної симуляції у вигляді цифрового двійника та генерації звіту. Алгоритм виявляє невідповідності між задокументованими операціями та геометрією 3D-моделі деталі, перевіряє технологічну послідовність і формує структурований звіт із підсумковим вердиктом щодо правильності МОТП. Застосування алгоритму дозволяє автоматично виявляти неузгодженості в технологічній документації, скорочувати час підготовки виробництва та гарантувати, що кожна поверхня деталі охоплена відповідними технологічними переходами з дотриманням вимог точності та шорсткості.

Ключові слова: цифровий двійник; маршрутно-операційний технологічний процес; верифікація технологічного процесу; розпізнавання поверхонь; технологічна підготовка виробництва; 3D-модель деталі.

Рис.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. У сучасному машинобудуванні значна частина помилок у технологічній документації виникає саме на етапі розробки технологічних процесів. Традиційний підхід до розробки технологічних процесів передбачає ручну перевірку маршрутно-операційного технологічного процесу (МОТП), що призводить до значних витрат часу та високої ймовірності помилок. Існуючі CAD/CAM-системи добре вирішують задачі генерації траєкторій інструменту, проте комплексна автоматична верифікація МОТП з урахуванням усіх поверхонь, технологічної послідовності та візуальної симуляції стану деталі після кожної операції залишається невирішеною задачею.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до якості та швидкості технологічної підготовки виробництва в умовах цифрової трансформації машинобудівної галузі. Застосування концепції цифрового двійника для верифікації технологічних процесів відкриває нові можливості для автоматичного виявлення помилок ще до початку виробництва, що має пряме практичне значення для підприємств машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основи комп'ютеризованого планування технологічних процесів і інтеграції CAD/CAM системно викладені в монографії Aqeel та ін. [1]. Автори розкривають методологію переходу від конструкторської моделі до виробничих специфікацій, проте питання автоматизованої верифікації вже розробленого МОТП з використанням 3D-моделі деталі як еталону залишається поза увагою. Критичний огляд розвитку CAPP-систем (Computer-Aided Process Planning - системи автоматизованого планування технологічних процесів) за останні десятиліття представлено у роботі Xu та ін. [2]. Дослідники систематизували підходи на основі знань, нейронних мереж, генетичних алгоритмів і STEP-сумісних рішень, однак зазначили, що проблема наскрізної верифікації технологічного маршруту щодо геометрії деталі досі залишається невирішеною. Аналогічну прогалину фіксують Fountas та ін. [3] у огляді автоматизованих CAPP-систем: методи розпізнавання елементів форми успішно застосовуються для окремих типів поверхонь, але комплексне зіставлення повного набору поверхонь 3D-моделі з операціями МОТП не реалізовано жодною з розглянутих систем.

Розпізнавання форми, розмірів та розташування технологічних елементів (оброблюваних поверхонь) з CAD-моделей є ключовою ланкою між проектуванням і виробництвом. У роботі Visit та ін. [4] показано, що методи на основі машинного навчання суттєво перевершують класичні підходи за точністю класифікації поверхонь. Chu та ін. [5] запропонували багатозадачну нейронну мережу ASIN для одночасної сегментації і розпізнавання оброблюваних елементів форми з хмари точок, досягнувши високої точності навіть для складних перетинних елементів. Водночас Khan та ін. [6] розширили задачу AFR на гібридне адитивно-субтрактивне виробництво, інтегруючи геометричний аналіз з плануванням маршруту. У всіх зазначених роботах розпізнавання виконується для генерації нового плану, а не для верифікації вже існуючого МОТП.

Концепція цифрового двійника у виробництві отримала фундаментальне обґрунтування в роботі Lu та ін. [7]: автори запропонували референтну модель цифрового двійника для інтелектуального виробництва в контексті Industry 4.0, визначивши ключові технологічні компоненти та відкриті дослідницькі задачі. Zhang та ін. [8] розвинули цей напрям, зосередившись на симуляції та моделюванні в інтелектуальному виробництві. Liu та ін. [9] виконали систематичний огляд цифрового двійника в контексті верстатної обробки, проаналізувавши застосування від моніторингу вібрацій до оптимізації режимів різання. Однак у всіх цих роботах цифровий двійник функціонує як система моніторингу реального процесу, тоді як його застосування для превентивної верифікації технологічної документації на основі симуляції поопераційного зняття припуску в доступних літературних джерелах авторами не виявлено.

Питанням верифікації технологічних послідовностей і допускового аналізу в CAPP присвячені роботи Leng та ін. [10], які дослідили проектування систем цифрових двійників для розумного виробництва. Окремі аспекти автоматизованого планування розглядають Dilberoglu та ін. [11]: система FAN-PS генерує до чотирьох варіантів плану для гібридного виробництва на основі геометричних і допускових даних карманів, плоских поверхонь і отворів. Незважаючи на детальне охоплення окремих типів елементів, система не виконує верифікацію існуючого маршруту, не створює цифрового двійника після кожної операції і не генерує структурованого звіту розбіжностей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Таким чином, аналіз літератури виявляє незаповнену нішу: відсутність інтегрованої системи, яка б поєднувала розпізнавання поверхонь 3D-моделі деталі та заготовки, синтаксичний аналіз МОТП, автоматичну конвертацію МОТП в ОТП, поопераційну візуальну симуляцію стану деталі як цифрового двійника та генерацію структурованого звіту. Саме цей замкнений цикл верифікації є предметом цієї роботи.

Постановка завдання. Розробити алгоритм, який на основі 3D-моделі деталі, 3D-моделі заготовки та текстового документа МОТП автоматично виконує: розпізнавання та класифікацію поверхонь деталі і заготовки; синтаксичний аналіз МОТП; конвертацію МОТП в ОТП з поопераційною прив'язкою до поверхонь; симуляцію стану деталі у вигляді цифрового двійника після кожної операції; зіставлення поверхонь з операціями та генерацію структурованого звіту з підсумковим вердиктом щодо прийнятності МОТП для реалізації в конкретних виробничих умовах.

Метою статті є розроблення алгоритму автоматизованої верифікації маршрутно-операційного технологічного процесу на основі 3D-моделі деталі та заготовки з використанням концепції цифрового двійника. Це дасть можливість суттєво підвищити точність і швидкість технологічної підготовки виробництва, зменшити кількість помилок у технологічній документації та забезпечити повну відповідність технологічного процесу геометрії та вимогам до деталі.

Виклад основного матеріалу. Вхідними даними для алгоритму є: 3D-модель готової деталі, 3D-модель заготовки, текстовий документ МОТП у вигляді таблиці або структурованого тексту. Слід зазначити, що 3D-моделі деталі та заготовки використовуються як номінальні геометричні еталони. Реальні відхилення форми та розташування поверхонь заготовки враховуються через задання полів допусків на номінальні розміри: система оперує не ідеалізованими поверхнями, а діапазонами геометричних параметрів, що дозволяє оцінювати вплив коливань припуску на виконання технологічного процесу.

Запропонований алгоритм спрямований на створення єдиної автоматизованої системи, яка на основі 3D-моделі деталі, заготовки та текстового варіанту МОТП виконує повну перевірку та верифікацію технологічного процесу. На даному етапі створено блок-схему алгоритму (рис. 1), яка охоплює всі етапи від завантаження даних до висновку щодо вірності завантаженого МОТП та генерації звіту.

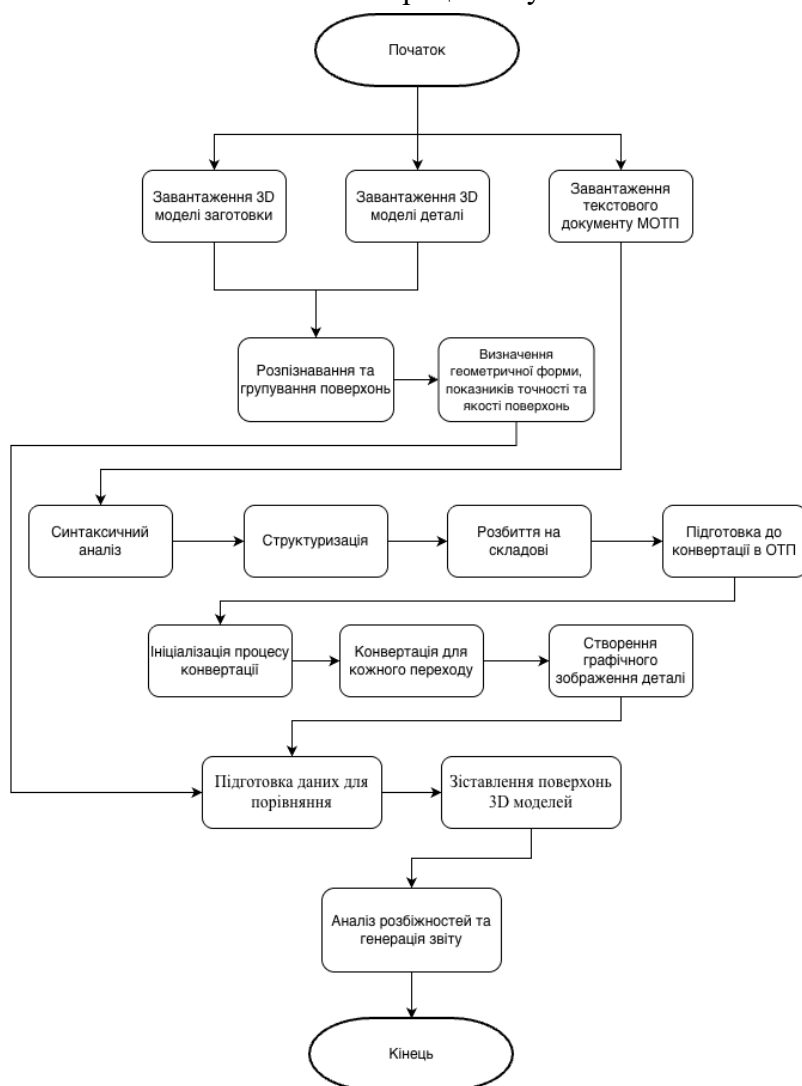


Рис. 1. Загальна блок-схема алгоритму верифікації МОТП

Блок-схема, що зображена на рисунку 1 починається з одночасного завантаження трьох вхідних даних: 3D-моделі заготовки, 3D-моделі готової деталі та текстового документа МОТП. Цей етап забезпечує синхронізацію всіх вхідних даних, що є ключовим для подальшої коректної роботи системи. Документ МОТП завантажується як таблиця або структурований текст, що дозволяє відразу перейти до його аналізу. Такий підхід виключає помилки несумісності даних і створює основу для подальшої автоматизації.

Наступним кроком є аналіз геометрії деталі та заготовки, де виконується розпізнавання типів поверхонь та їх групування. Алгоритм розпізнавання поверхонь реалізовано ітеративно: спочатку виконується топологічне розділення моделі на грані, ребра та вершини, після чого класифікуються типи поверхонь за кривизною та нормальми – плоскі, циліндричні, конічні, сферичні чи вільні поверхні. Групування поверхонь здійснюється за конструктивно-технологічними ознаками. Цей етап визначає для кожної поверхні повний набір характеристик: геометричну форму (тип поверхні та її параметри – діаметр, довжина, кут, радіус тощо); точність розмірів (номінальний розмір і квалітет); точність форми (допуск площинності, циліндричності, круглості тощо); точність розташування відносно технологічних баз (допуск паралельності, перпендикулярності, співвісності тощо); шорсткість поверхні (R_a , R_z); вимоги до термічної та хімічної обробки поверхонь (загартування, азотування, покриття тощо). Геометричні характеристики та точнісні вимоги до поверхні - основа для цифрового двійника. Чим точніше їх описувати, тим точнішим буде цифровий двійник.

Далі проводиться синтаксичний аналіз МОТП, що включає перевірку обов'язкових полів (номер операції, тип), структурування та сортування операцій, визначення маршруту обробки, розбиття на складові – тип операцій, об'єкти обробки, інструменти та параметри. Підготовка до конвертації передбачає перевірку достатності даних та виявлення неузгодженостей назв поверхонь, що виключає помилки на ранніх етапах. Цей блок забезпечує нормалізацію даних для подальшої конвертації, роблячи акцент на виявленні внутрішніх неузгодженостей, які могли б призвести до помилок у роботі алгоритму. Слід зазначити, що система не класифікує технологічні рішення як однозначно "помилкові" - вона виявляє формальні невідповідності: відсутність операції для конкретної поверхні, порушення задокументованої послідовності (чорнова після чистової обробки), неможливість обробки інструментом поверхні. Остаточне рішення щодо прийнятності технологічного маршруту залишається за технологом.

Конвертація МОТП в ОТП є одним з ключових елементів системи. Вона починається з ініціалізації процесу конвертації, де встановлюються правила точності та необхідні операції. Далі проводиться конвертація для кожної операції з визначенням типу, зберігаючи множинність чорнових і чистових операцій. Формування структури операції включає прив'язку до конкретних поверхонь деталі, нормалізацію параметрів (приведення режимів різання, позначень інструменту та найменувань поверхонь до єдиного формату) і перевірку відповідності правилам (контроль наявності чорнової операції перед чистовою для поверхонь з підвищеними вимогами до точності; перевірка відповідності типів операцій та поверхонь; контроль призначення технологічних баз). Особливу увагу необхідно приділити створенню графічного зображення 3D-моделей міжопераційних заготовок, що реалізує концепцію цифрового двійника.

Після конвертації операцій система генерує візуальний стан деталі, виділяючи оброблені поверхні, залишковий припуск та інструмент. Це дозволяє візуально контролювати процес, виявляючи колізії або недоступність поверхонь. Цифровий двійник створюється на основі булевих операцій видалення матеріалу, забезпечуючи симуляцію зняття припуску. Цифровий двійник використовується у значенні превентивної цифрової моделі, що будується на основі номінальних параметрів 3D-моделі деталі та заготовки без зворотного зв'язку з реальним об'єктом у реальному часі. Зв'язок із фізичною деталлю реалізується на етапі вхідних даних: 3D-модель заготовки відображає реальний початковий стан матеріалу, а система булевих операцій поопераційно симулює зняття припуску відповідно до операцій МОТП. Варіативність припуску в межах партії деталей може бути врахована шляхом задання полів допусків на розміри заготовки як параметрів моделі.

Після конвертації проводиться зіставлення поверхонь 3D-моделі зі створеним графічним зображенням кінцевої 3D-деталі на кожній операції. Зіставлення виконується ітеративно: нормалізація даних, уточнення за типами та групами, перевірка покриття. Класифікація поверхонь на оброблювані та необроблювані виконується алгоритмом автоматично на основі карти поверхонь: поверхня вважається оброблюваною, якщо в МОП для неї визначено хоча б один технологічний перехід; інакше вона класифікується як необроблювана. Технолог може скоригувати цю класифікацію вручну через інтерфейс системи до початку верифікації. Виявлені поверхні, не охоплені жодною операцією МОП, фіксуються у звіті як невідповідності з можливістю позначення як навмисно необроблюваних (допоміжні, базові або кріпильні поверхні). Цей етап забезпечує повне відстежування обробки – кожна оброблювана поверхня пов'язана з конкретними операціями.

Далі проводиться перевірка технологічної послідовності проводиться на основі побудованого графіка залежностей. Алгоритм складається з циклів, підтримує принцип технологічної спадковості (чорнова обробка перед чистовою), перевіряє доступність інструменту до поверхонь та логіку послідовності обробки поверхонь. Фінальна валідація визначає статус послідовності.

На останньому етапі проводиться аналіз та генерація звіту. Формується звіт з загальними даними та підсумковим вердиктом. Звіт зберігається у файлі. У звіті зберігаються такі дані: сформований ОТП з базового МОП, графічні зображення деталей до операцій та фактичний результат, чи може бути виконаний даний технологічний процес.

Висновки. У роботі розроблено алгоритм автоматизованої верифікації маршрутно-операційного технологічного процесу на основі 3D-моделі деталі та заготовки з використанням концепції цифрового двійника. Алгоритм реалізує замкнений цикл обробки даних – від одночасного завантаження трьох вхідних джерел (3D-модель деталі, 3D-модель заготовки, текстовий документ МОП) до формування підсумкового вердикту та генерації структурованого звіту. Реалізація запропонованого алгоритму є цілком можливою в сучасних умовах розвитку ІТ: наявні геометричні ядра (Open CASCADE, ACIS), бібліотеки машинного навчання (PyTorch, TensorFlow) та засоби автоматичної генерації документів забезпечують усі необхідні технологічні складові. Хмарні обчислення та потужності сучасних GPU дозволяють виконувати булеву симуляцію і розпізнавання поверхонь у прийнятний для виробництва час, що підтверджує практичну реалізованість системи.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ у процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори не використовували інструменти генеративного штучного інтелекту. Автори несуть повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Aqeel, A., Zaman, U. K. U., Aziz, S., & Baqai, A. (2023). Computer-aided design, computer-aided process planning, and computer-aided manufacturing. In *Handbook of manufacturing systems and design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003327523-3>.
2. Xu, X., Wang, L., & Newman, S. T. (2011). Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(1), 1–31. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2010.518632>.
3. Al-wswasi, M., Ivanov, A., & Makatsoris, H. (2018). A survey on smart automated computer-aided process planning (ACAPP) techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1-4), 809–832. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1966-1>.
4. Yun, H., Kim, E., Kim, D. M., Park, H. W., & Jun, M. B.-G. (2023). Machine learning for object recognition in manufacturing applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00764-6>.
5. Yang, C., Wang, Y., Lan, S., Wang, L., Shen, W., & Huang, G. Q. (2022). Cloud-edge-device collaboration mechanisms of deep learning models for smart robots in mass personalization. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 77, 102351. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102351>.

6. Khan, M. T., Chen, L., & Laili, Y. (2024). Automatic feature recognition and dimensional attributes extraction from CAD models for hybrid additive-subtractive manufacturing. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2408.06891>.
7. Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>.
8. Zhang, L., Zhou, L., Ren, L., & Laili, Y. (2019). Modeling and simulation in intelligent manufacturing. *Computers in Industry*, 112, 103123. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.08.004>.
9. Liu, S., Bao, J., & Zheng, P. (2023). A review of digital twin-driven machining: From digitization to intellectualization. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 361–378. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.010>.
10. Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>.
11. Basinger, K. L., Keough, C. B., Webster, C. E., Wysk, R. A., Martin, T. M., & Harrysson, O. L. (2018). Development of a modular computer-aided process planning (CAPP) system for additive-subtractive hybrid manufacturing of pockets, holes, and flat surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5-8), 2407–2420. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1674-x>.

References

1. Aqeel, A., Zaman, U. K. U., Aziz, S., & Baqai, A. (2023). Computer-aided design, computer-aided process planning, and computer-aided manufacturing. In *Handbook of manufacturing systems and design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003327523-3>.
2. Xu, X., Wang, L., & Newman, S. T. (2011). Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(1), 1–31. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2010.518632>.
3. Al-wswasi, M., Ivanov, A., & Makatsoris, H. (2018). A survey on smart automated computer-aided process planning (ACAPP) techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1-4), 809–832. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1966-1>.
4. Yun, H., Kim, E., Kim, D. M., Park, H. W., & Jun, M. B.-G. (2023). Machine learning for object recognition in manufacturing applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00764-6>.
5. Yang, C., Wang, Y., Lan, S., Wang, L., Shen, W., & Huang, G. Q. (2022). Cloud-edge-device collaboration mechanisms of deep learning models for smart robots in mass personalization. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 77, 102351. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102351>.
6. Khan, M. T., Chen, L., & Laili, Y. (2024). Automatic feature recognition and dimensional attributes extraction from CAD models for hybrid additive-subtractive manufacturing. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2408.06891>.
7. Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>.
8. Zhang, L., Zhou, L., Ren, L., & Laili, Y. (2019). Modeling and simulation in intelligent manufacturing. *Computers in Industry*, 112, 103123. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.08.004>.
9. Liu, S., Bao, J., & Zheng, P. (2023). A review of digital twin-driven machining: From digitization to intellectualization. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 361–378. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.010>.
10. Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>.
11. Basinger, K. L., Keough, C. B., Webster, C. E., Wysk, R. A., Martin, T. M., & Harrysson, O. L. (2018). Development of a modular computer-aided process planning (CAPP) system for additive-subtractive hybrid manufacturing of pockets, holes, and flat surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5-8), 2407–2420. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1674-x>.

Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Volodymyr Davydenko¹, Vadym Medvedev²¹postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.davydenko-mm24@iit.kpi.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-8325-603X> **ResearcherID:** [PNI-7134-2026](https://pubs.rsos.royalsocietypublishing.org/author/PNI-7134-2026)²Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vadim.medvedev@ua.fm **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0439-6909> **ResearcherID:** [RID145844](https://pubs.rsos.royalsocietypublishing.org/author/RID145844)**ALGORITHM FOR AUTOMATED VERIFICATION
OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS BASED ON A DIGITAL TWIN**

The object of the study is the process of technological preparation of production of parts in mechanical engineering, specifically the stages of development, analysis and verification of manufacturing process plans. A significant share of errors in technological documentation arises at the stage of designing route-operational process plans (ROPP), where traditional manual verification leads to substantial time expenditure and a high probability of mistakes. Existing CAD/CAM systems effectively address tool path generation tasks; however, comprehensive automated verification of the ROPP – taking into account all surfaces, the technological sequence and visual simulation of the part state after each operation – remains an unsolved problem.

The problem addressed in this study is the absence of a comprehensive automated solution for ROPP verification based on a 3D model of the part, the workpiece and a textual process plan file. An algorithm for automated ROPP verification is proposed, implementing a closed processing cycle: from simultaneous loading of three input sources (3D model of the finished part, 3D model of the workpiece, and textual ROPP document) to generation of a structured discrepancy report and a final verdict. The algorithm performs surface recognition of the 3D part and workpiece models with topological decomposition into faces, edges and vertices, followed by classification by curvature and normals; syntactic analysis and normalisation of the ROPP; automatic conversion of the ROPP into an operational process plan (OPP) with per-operation binding to specific surfaces; step-by-step visual simulation of the part state as a digital twin using Boolean material removal operations; and surface-to-operation matching with coverage verification.

The results demonstrate that the system is capable of automatically detecting inconsistencies in technological documentation and generating a report with a verdict on the correctness of the submitted ROPP. The practical application of the developed algorithm makes it possible to substantially reduce the time required for technological production preparation, decrease the number of errors in process documentation, and ensure full conformity of the manufacturing process with the geometry and requirements of the part. The feasibility of implementation is confirmed by the availability of mature geometric kernels (Open CASCADE, ACIS), machine learning libraries (PyTorch, TensorFlow), and modern GPU and cloud computing capabilities.

Keywords: digital twin; route-operational process plan; manufacturing process verification; surface recognition; technological preparation of production; 3D part model.

Fig.: 1. References: 11.