

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЙОГО РОЛЬ У СУЧАСНОМУ РОБОТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Кривчун Ростислав Валерійович

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

Mail: rostyslav.kryvchun@nure.ua

Анотація: Стаття присвячена ролі та значенню комп'ютерного моделювання у процесі розробки сучасних роботизованих систем. Проаналізовано ключові переваги цього підходу, такі як зниження витрат і термінів розробки, та його основні недоліки, зокрема проблема "розриву між симуляцією та реальністю" (Sim-to-Real Gap). Надано класифікацію та огляд популярних програмних інструментів для 3D-моделювання та симуляції, включаючи CAD-системи, спеціалізовані симулятори (Gazebo, CoppeliaSim) та інтегровані фреймворки (ROS).

Ключові слова: керування, робототехніка, комп'ютерне моделювання, симуляція, гнучкість.

COMPUTER MODELING AND ITS ROLE IN MODERN ROBOTIZED MANUFACTURING

Kryvchun Rostislav

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauky Ave.

Mail: rostyslav.kryvchun@nure.ua

Abstract: The article is devoted to the role and significance of computer modeling in the development of modern robotic systems. The key advantages of this approach, such as reduced costs and development time, and its main disadvantages, in particular the problem of the "Sim-to-Real Gap," are analyzed. A classification and overview of popular software tools for 3D modeling and simulation is provided, including CAD systems, specialized simulators (Gazebo, CoppeliaSim), and integrated frameworks (ROS).

Keywords: control, robotics, computer modeling, simulation, flexibility.

Ефективність та швидкість розробки нових роботизованих систем напряму залежить від якості їхнього попереднього моделювання. В умовах жорсткої конкуренції та постійного ускладнення технологій, компанії та дослідницькі інститути, які ігнорують можливості комп'ютерного моделювання, ризикують залишитися позаду. Віртуальне прототипування дозволяє значно скоротити витрати, мінімізувати ризики та прискорити виведення продукту на ринок.

Робототехніка є однією з найбільш динамічних і швидкозростаючих галузей сучасної науки і техніки. Від промислових маніпуляторів на заводах до автономних дронів і медичних нанороботів – роботи все глибше проникають у наше життя, виконуючи завдання, які раніше були неможливі або надто небезпечні для людини. Однак процес створення робота – від ідеї до фізичного прототипу – є надзвичайно складним, тривалим і дорогим. Він вимагає залучення фахівців з різних галузей: інженерів-механіків, програмістів, електронників та дизайнерів [1].

Саме тут на допомогу приходить комп'ютерне моделювання – потужний інструмент, який дозволяє створювати, тестувати та вдосконалювати роботів у віртуальному середовищі ще до того, як буде виготовлена перша фізична деталь. Це не просто створення тривимірної "картинки" майбутнього пристрою. Це повноцінна імітація його поведінки, що включає фізику

руху, роботу програмного забезпечення, взаємодію з навколишнім середовищем та аналіз навантажень.

Комп'ютерне моделювання в робототехніці (рис. 1) – це процес створення цифрового двійника (digital twin) роботизованої системи та її операційного середовища з метою аналізу, тестування та оптимізації. Цей процес є багатограним і охоплює кілька взаємопов'язаних рівнів. В основі лежить геометричне 3D-моделювання, під час якого створюється точна тривимірна модель усіх механічних компонентів робота, від корпусу до кріплень, з визначенням їхньої форми, розмірів та маси. Наступним кроком є кінематичне моделювання, що описує рух робота без урахування сил, вирішуючи прямі та обернені задачі для визначення положення виконавчого органу. Найбільш складним рівнем є динамічне моделювання, яке враховує всі сили, що діють на робота, – гравітацію, тертя, потужність двигунів, – дозволяючи аналізувати стабільність, енергоспоживання та навантаження. Щоб модель була повноцінною, створюється віртуальне середовище та імітується робота сенсорів, таких як камери та лідари. Завершальним етапом є моделювання системи керування, коли програмний код та алгоритми інтегруються у віртуальну модель для тестування логіки її поведінки. [2-6]

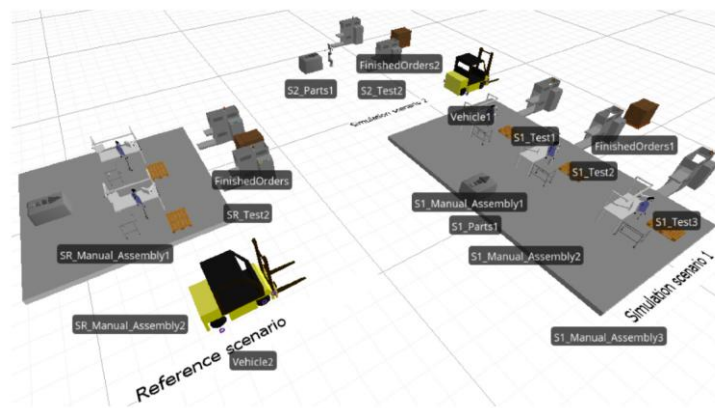


Рис.1. Приклад комп'ютерного моделювання

Сам процес моделювання є послідовним і складається з кількох ключових етапів. Все починається з постановки задачі та визначення цілей, наприклад, перевірки досяжності робочої зони чи оптимізації траєкторії. Після цього в САД-системах розробляється 3D-модель компонентів. Окремі деталі об'єднуються у віртуальну збірку, де визначаються типи з'єднань та їхні обмеження. Далі модель наділяється фізичними властивостями, такими як матеріали та моменти інерції. Коли віртуальний механізм готовий, до нього інтегрується система керування, що дозволяє запуснути симуляцію. Під час цього процесу ведеться спостереження за поведінкою моделі та збір даних. На основі отриманих результатів проводиться аналіз та ітеративна оптимізація, під час якої в конструкцію чи програмний код вносяться зміни для досягнення бажаних показників.

Використання комп'ютерного моделювання в розробці роботів надає низку фундаментальних переваг, які кардинально змінюють традиційний інженерний підхід. [7-11]

Однією з найвагоміших переваг є економічна ефективність. Вартість створення фізичного прототипу, що включає дорогі матеріали, компоненти та виробничі роботи, може сягати сотень тисяч доларів. Моделювання дозволяє значно знизити ці витрати, створюючи десятки віртуальних прототипів для тестування без жодних матеріальних затрат. Помилки, виявлені на етапі симуляції, як-от неправильно розрахований важіль, коштують лише часу інженера, тоді як їх виявлення на фізичному прототипі призводить до дорогої переробки. Як наслідок, це

скорочує кількість фізичних ітерацій, дозволяючи компанії обмежитися створенням одного фінального прототипу, оскільки більшість проблем вже вирішені у віртуальному просторі.

Критичним фактором конкурентоспроможності є скорочення часу виведення продукту на ринок (Time-to-Market). Комп'ютерне моделювання сприяє цьому, уможливлуючи паралельну розробку: програмісти можуть писати й тестувати код на віртуальній моделі, не чекаючи на виготовлення фізичного "заліза". Це значно прискорює загальний процес. Крім того, інженер може за лічені години швидко тестувати різні гіпотези щодо конструкції чи алгоритмів, тоді як на фізичному прототипі такий процес зайняв би тижні.

Моделювання суттєво підвищує безпеку та надійність майбутнього робота. Віртуальне середовище дозволяє проводити тестування в екстремальних умовах, імітуючи небезпечні ситуації, як-от відмову двигуна чи зіткнення з перешкодою, без ризику пошкодження дорогого обладнання. За допомогою аналізу міцності методом скінченних елементів (FEA) можна детально дослідити розподіл навантажень по конструкції, виявити слабкі місця та оптимізувати дизайн, зробивши його легшим і водночас міцнішим.

Віртуальне середовище надає унікальні можливості для оптимізації продуктивності та алгоритмів. Інженери можуть легко точно налаштувати параметри регуляторів, двигунів та мас для досягнення максимальної швидкості й точності. Симуляція є незамінною для розробки та тестування складних алгоритмів, таких як навігація (SLAM) або машинне навчання, дозволяючи генерувати тисячі різноманітних сценаріїв для їх навчання та валідації. Це також спрощує планування оптимальних траєкторій руху для уникнення зіткнень. Моделювання забезпечує надзвичайну гнучкість, оскільки змінити параметри 3D-моделі можна за лічені хвилини, що стимулює інженерну творчість. Більше того, цей підхід дозволяє моделювати цілі роботизовані комплекси, наприклад, виробничі лінії, для аналізу їхньої взаємодії.

Нарешті, високоякісна 3D-модель та анімація роботи робота слугують чудовим інструментом для візуалізації та маркетингу. Вони дозволяють наочно продемонструвати проєкт замовникам чи інвесторам ще до створення фізичного продукту, що допомагає краще зрозуміти концепцію та узгодити всі вимоги на ранніх етапах.

Ринок програмного забезпечення для моделювання роботів є дуже різноманітним. Програми можна умовно поділити на кілька категорій залежно від їх основного призначення.

Основою будь-якого проєктування є CAD-системи (Computer-Aided Design), головне завдання яких – створення точних тривимірних геометричних моделей деталей та збірок. Вони є першим кроком у процесі моделювання. Серед найпопулярніших у світі пакетів виділяється SolidWorks, відомий своїм інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, потужними інструментами моделювання та вбудованими модулями для базового аналізу. Його прямими конкурентами є продукти Autodesk, зокрема хмарна платформа Fusion 360, яка об'єднує CAD, CAM та CAE в одному пакеті, що робить її зручною для командної роботи. Для вирішення завдань вищого рівня у великих корпораціях, особливо в авіакосмічній та автомобільній галузях, використовуються системи "важкого" класу, такі як Siemens NX та CATIA. Для студентів, аматорів та невеликих проєктів чудовим варіантом є FreeCAD – безкоштовна система з відкритим вихідним кодом.[12-16]

Наступною категорією є спеціалізовані симулятори робототехніки, призначені не стільки для створення геометрії, скільки для повноцінної імітації динаміки, сенсорів та алгоритмів керування (рис. 2). Вони часто інтегруються з CAD-системами, дозволяючи імпортувати готові 3D-моделі. Популярним в академічному середовищі є гнучкий симулятор CoppeliaSim (раніше V-REP), що має велику бібліотеку готових моделей і підтримує програмування різними мовами. Ще один професійний інструмент з відкритим вихідним кодом – Webots, який широко використовується для моделювання мобільних роботів завдяки якісній графіці та реалістичній фізиці. Стандартом для ROS (Robot Operating System) є симулятор Gazebo,

потужний інструмент для симуляції у складних середовищах, який завдяки глибокій інтеграції з ROS значно спрощує перехід від віртуальної моделі до реального обладнання (Sim-to-Real). Сучасною платформою, орієнтованою на тестування алгоритмів комп'ютерного зору та навчання моделей ШІ, є NVIDIA Isaac Sim. Вона використовує технології трасування променів для створення фотореалістичної графіки та оптимізована для паралельних обчислень на GPU.



Рис. 2. Порівняння CAD та симуляції

Окрему групу складають інтегровані середовища та фреймворки, які об'єднують можливості моделювання, програмування та симуляції. Широко в наукових дослідженнях та промисловості використовується MATLAB & Simulink. Цей пакет дозволяє створювати блок-схеми систем керування та тестувати алгоритми для роботів, часто інтегруючись з іншими симуляторами. Ключовим інструментом є ROS (Robot Operating System) – гнучкий фреймворк для написання програмного забезпечення для роботів. Його перевагою є набір бібліотек та тісна інтеграція з симулятором Gazebo та візуалізатором RViz, що дозволяє розробляти й тестувати весь програмний стек у симуляції перед розгортанням на реальному обладнанні (рис. 3).

Порівняння програм моделювання та симуляції наведено у таблиці 1.

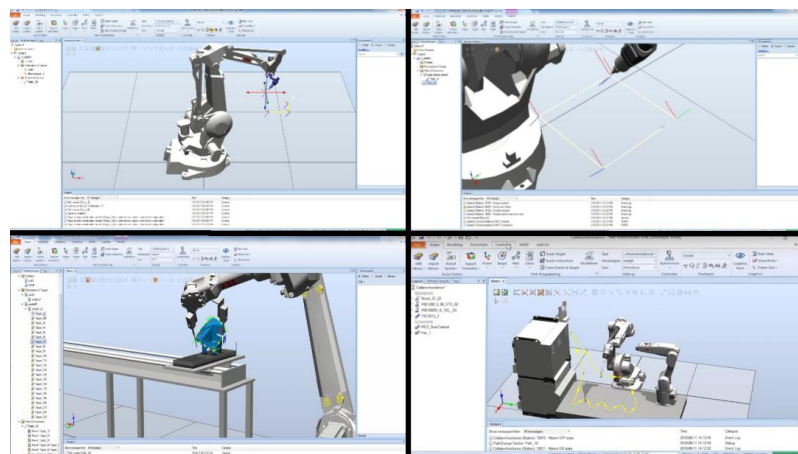


Рис. 3. Симуляція маніпуляційного робота

ВИСНОВКИ. Комп'ютерне моделювання стало ключовим етапом у розробці сучасних роботів, створюючи цифрове середовище для швидкого та безпечного тестування ідей. Цей підхід кардинально знижує вартість і терміни розробки, підвищує надійність систем та дозволяє оптимізувати складні алгоритми керування.

Водночас головним викликом залишається «розрив між симуляцією та реальністю» (Sim-to-Real Gap), що вимагає обов'язкової перевірки на фізичному обладнанні. Незважаючи на високі вимоги до ресурсів та вартість ПЗ, ринок пропонує широкий спектр інструментів, а розвиток

III та машинного навчання лише посилить роль моделювання у створенні наступного покоління інтелектуальних роботів.[17]

Таким чином, моделювання – це фундаментальна методологія, яка дозволяє розробляти все більш складні та надійні роботизовані системи.

Таблиця 1. Порівняння комп'ютерних програм для моделювання

Програма/Пакет	Тип	Основне призначення	Переваги	Недоліки
SolidWorks	CAD	Створення 3D-моделей та збірок, базовий аналіз	Інтуїтивний інтерфейс, велика спільнота, інтеграція з CAE/CAM	Висока вартість ліцензії, обмежені можливості динамічної симуляції
Fusion 360	CAD/CAM/CAE (хмарний)	Інтегроване проектування та виробництво	Доступна ціна, зручність для командної роботи, постійні оновлення	Залежність від інтернет-з'єднання, менший функціонал, ніж у "важких" CAD
Gazebo	Симулятор	Симуляція для ROS	Глибока інтеграція з ROS, реалістична фізика, велика бібліотека моделей	Високі вимоги до ресурсів, може бути складним у налаштуванні
CoppeliaSim	Симулятор	Гнучка симуляція, дослідження, освіта	Підтримка багатьох мов, велика бібліотека, кросплатформеність	Менш фотореалістична графіка порівняно з новими симуляторами
NVIDIA Isaac Sim	Симулятор (AI/ML)	Фотореалістична симуляція для навчання III	Найкраща графіка, оптимізація під GPU, масштабованість	Дуже високі вимоги до "заліза" (потрібна потужна відеокарта NVIDIA)
MATLAB/Simulink	Інтегроване середовище	Моделювання систем керування, розробка алгоритмів	Потужні математичні інструменти, візуальне програмування в Simulink	Висока вартість, не є повноцінним 3D-симулятором (потребує інтеграції)

ЛІТЕРАТУРА

1. Spong Mark W. Robot Modeling and Control, 2nd Edition / Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar // JOHN WILEY & SONS, INC, 2020, 419 p.
2. Collins, Jack. A Review of Physics Simulators for Robotic Applications / Jack Collins, Shelvin Chand, Anthony Vanderkop, Gerard Howard // IEEE Access. 2021, PP. 1-16.
3. Belda, Květoslav Path Modelling and 3D Robot Visualization for Model-Based Control of Articulated Robots / Květoslav Belda, Karel Dvorak // 15th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, 2022,. 10.1007/978-3-030-85318-1_52.
4. Wang, Zhiqiang. A study on modeling and trajectory planning of a Delta robot based on V-REP and MATLAB co-simulation / Zhiqiang Wang, Rui Wang, Manhui Zhang, Fei Yuan, Yuan Feng, // Journal of Physics: Conference Series. 023(1):012007, 2025, 10 p.

5. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
6. Невлюдов, І., Клименко, О., Євсєєв, В., & Максимова, С. (2025). IMPROVEMENT OF THE ENCODING INFORMATION METHOD FOR PHARMACEUTICAL PRODUCTS QR-CODES DURING SORTING ON A ROBOTIC CONVEYOR LINE. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Технології в машинобудуванні, (1 (11)), 128-134.
7. Невлюдов, І., Євсєєв, В., Максимова, С., & Артюх, Р. (2025). Математична модель адаптивного ієрархічного високорівневого керування триланкового колаборативного робота-маніпулятора. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (2 (32)), 58-68.
8. Demska, N., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND CNN APPROACH TO RULE FORMATION. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(6), 846-859.
9. Yevsieiev, V., Ababneh, J., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATING A DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM FOR COLLABORATIVE ROBOT NETWORKS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(5), 1187-1202.
10. Yevsieiev, V., Hamdan, M., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). A human-centric approach to control collaborative robots within Industry 5.0. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(5), 351-361.
11. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
12. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 9140156.
13. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Yevsieiev, V., Amer, A., Demska, N., Luhach, A. K., & Lyashenko, V. (2022). Electronic user authentication key for access to HMI/SCADA via unsecured internet networks. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 5866922.
14. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
15. Automated Monitoring and Visualization System in Production / V. Lyashenko, Abu-Jassar Amer Tahseen, V. Yevsieiev, S. Maksymova // *Int. Res. J. Multidiscip. Technovation*, 5(6), 09-18.
16. GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, V. Lyashenko, M. Ayaz. Ahmad // *Advances in Dynamical Systems and Applications*. – 2021. – Vol. 16(2). – pp. 441-455.
17. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // *Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.*

Науковий керівник: Бронніков Артем Ігорович, доц. кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки