

О.М. Пилипенко, д.т.н., проф.
О.А. Громовий, к.т.н., доц.
Г.М. Виговський, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Програмні продукти для автоматизованого розв'язання задач промислової робототехніки в механоскладальних виробництвах машино- та приладобудування

У статті висвітлено тенденцію зростання попиту на промислову робототехніку в механоскладальних виробництвах за останні роки. Виконано аналітичний огляд програмних продуктів (ПП) для автоматизованого розв'язання задач промислової робототехніки в механоскладальних виробництвах машино- та приладобудування. Проведено аналіз найпоширеніших ПП щодо їх функціональних можливостей при технологічній підготовці роботизованих систем, підтримуваних операційних систем, допоміжного програмного забезпечення та цінової складової. Узагальнено представлено вказану вище інформацію у вигляді таблиці, де вказано про наявність основних аналізованих можливостей ПП. Результати проведеного аналізу найбільш відомих ПП на основі доступних інформаційних джерел щодо функціональних можливостей та варіантів застосування на етапах планування, проєктування, програмування роботизованих систем показали, що на даний момент не існує універсального ПП або програмного рішення, яке може задовольнити сучасні вимоги на виробництві. Позитивні тенденції щодо застосування показують open source ПП, що дають гнучкість у застосуванні, проте вимагають від користувача високої кваліфікації в роботехніці та програмуванні, але не гарантують повного розв'язування завдань науково-дослідницького та інженерного змісту.

Ключові слова: робототехніка; колаборативність промислової робот; програмні продукти; траєкторія руху; мехатроніка; кінематика; 3D-модель; автоматизація; гнучке виробництво.

Актуальність теми. Промислові роботи (ПР) все більше використовуються для автоматизації виробничих процесів у сучасних механоскладальних виробництвах. Автоматизація забезпечує більшу ефективність, точність та продуктивність виробництва, зменшення витрат на робочу силу та мінімізацію ризику виникнення непередбачуваних ситуацій. Згідно з даними International Federation of Robotics (IFR), щорічний приріст інсталяцій промислових роботів сягає близько 11 %, хоча є спади у період з 2019 по 2020 рік через COVID-19 (рис. 1–2) [1].

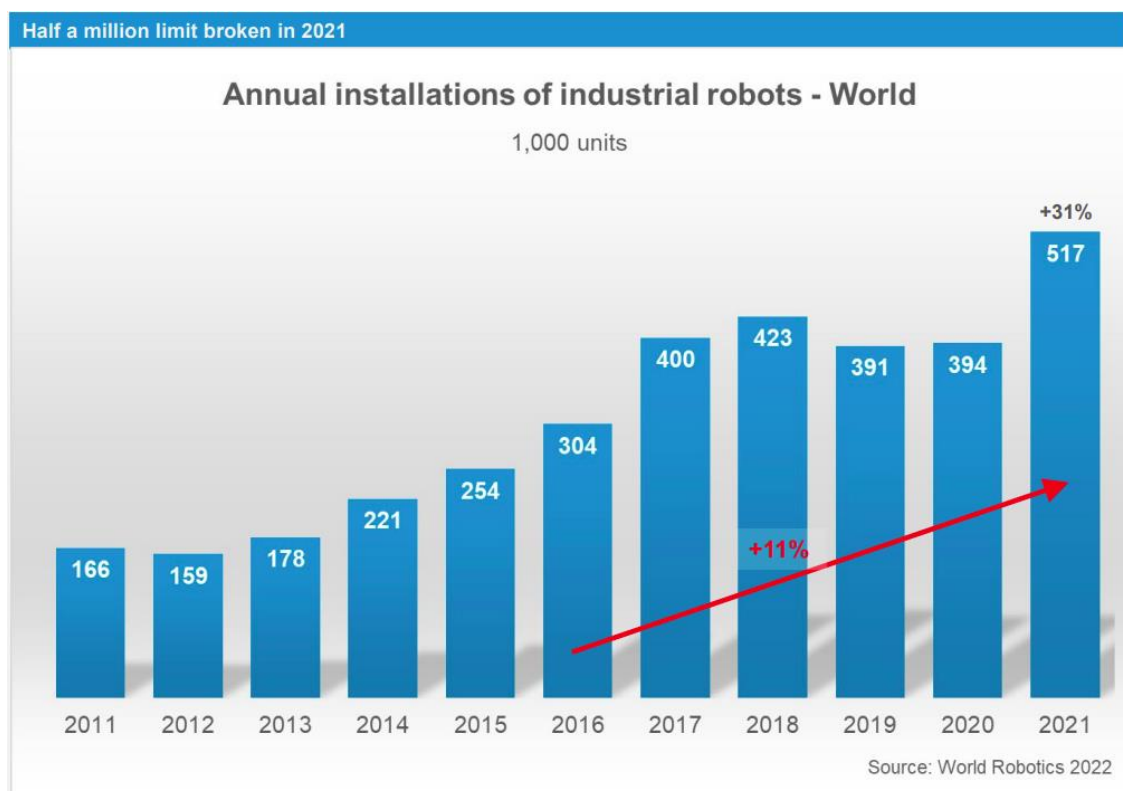


Рис. 1. Діаграма зростання кількості інсталяцій промислових роботів у виробництво [1]

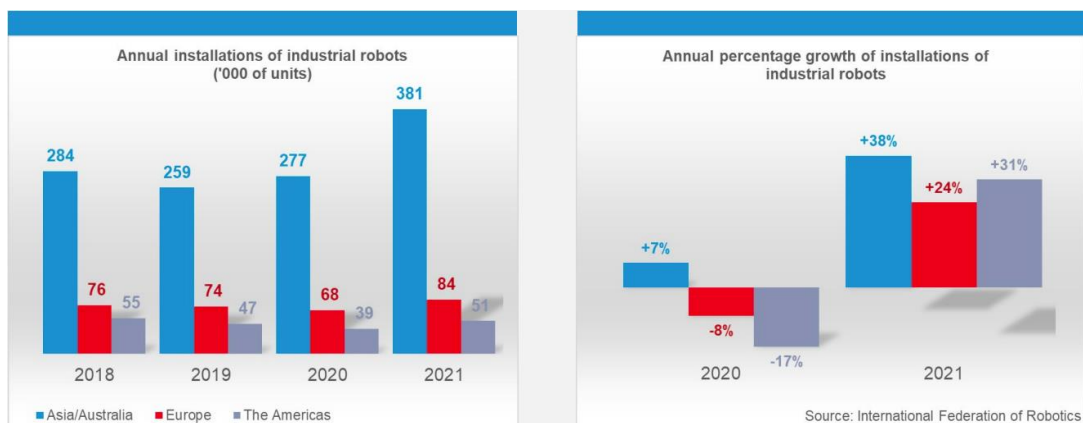


Рис. 2. Діаграма зростання кількості інсталяцій промислових роботів у виробництво по регіонах [1]

Для досягнення максимальної ефективності промислової робототехніки у виробництві необхідно мати ефективні ПП, що дозволяють автоматизувати задачі промислової робототехніки. Загальні ПП дозволяють керувати роботами, розраховувати траєкторії руху, визначати точність та швидкість руху, забезпечують безпеку робототехніки тощо.

У зв'язку зі зростанням попиту на робототехніку в механоскладальних виробництвах [1], існує велика кількість ПП, що призначені для автоматизованого розв'язання задач промислової робототехніки. У таких умовах необхідним є аналіз існуючих ПП для визначення їх переваг та недоліків, а також для потенційного вибору ПП для певних потреб виробництва.

Аналіз обраних авторами ПП на ринку може допомогти у визначенні найкращих варіантів для розв'язування конкретних задач у механоскладальних та інших виробництвах на різних етапах технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв. Вказане вище допоможе підприємствам зекономити часові та фінансові ресурси при виборі та впровадженні обладнання та програмного забезпечення, а також може бути корисним дослідникам та інженерам-практикам.

Метою статті є виклад та узагальнення результатів проведеного аналізу найбільш відомих ПП на основі доступних інформаційних джерел щодо функціональних можливостей та потенційного застосування на етапах планування, проектування, програмування роботизованих систем у механоскладальних виробництвах в машино- та приладобудуванні.

Викладення основного матеріалу. Нижче наведено аналіз найбільш розповсюджених та відомих ПП.

RobotWorks – це ПП для автономного програмування ПР. Графічний інтерфейс користувача (рис. 3) виконано в стилі ПП для верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ). RobotWorks [2] є додатком для ПП SOLIDWORKS, що впливає на об'єкти системи автоматизованого проектування (САПР) (грані, ребра, площини 3D-моделі тощо) у складанні (assembly).

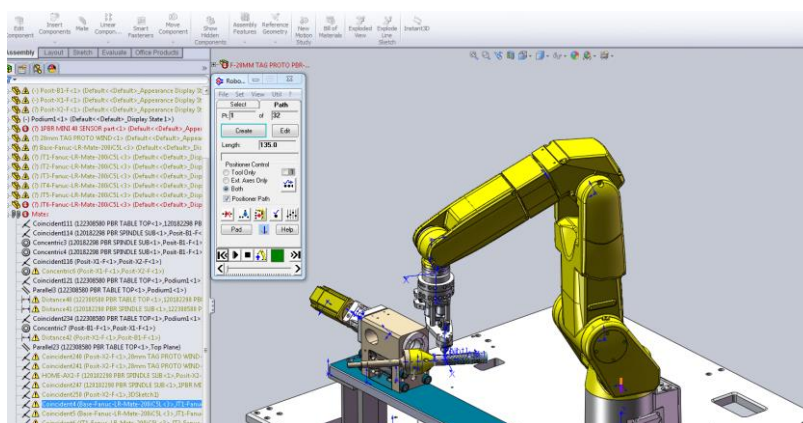


Рис. 3. Графічний інтерфейс користувача ПП RobotWorks

RobotWorks має функціональну можливість створювати деталі, інструменти, пристосування і траєкторію руху затискного пристрою ПР в одному інтерактивному середовищі. Також є функції моделювання руху робота і виявлення колізій. RobotWorks може імпортувати точки з програм ЧПУ та інших форматів і перетворювати їх на програми для ПР.

У RobotWorks є можливість згенерувати шлях для «перенесення деталі», під час якого деталь переміщується відносно нерухомого інструменту. Вартість такого ПП не фіксована, бо впроваджена підписка на ліцензію, яка становить 300 доларів США в місяць [3]. Окрім вказаного вище функціонала, ПП має ряд особливостей в експлуатації, наприклад, високі системні вимоги до ПК, підключення до інтернету для перевірки ліцензії тощо. Також цей ПП не підтримує функцію імпорту своєї моделі ПР у форматі stl.

До CAD/CAM системи належить ПП RobotMaster. Його призначення – моделювання та програмування роботів. Графічний інтерфейс програми представлено на рисунку 4. Функціональні можливості такого ПП: побудова траєкторій руху маніпуляційної системи промислового робота на основі його CAD-моделей, визначення колізій при переміщенні ланок маніпуляційної системи ПР, визначення та аналіз робочої зони, оптимізація траєкторії руху та програми при виявленні проблем, формування безколізійних переходів між операціями інструменту або затискного пристрою. Ціна на цей ПП не фіксована і залежить від сфери застосування, проте вона варіюється від 10 000 до 40 000 доларів США в рік [4]. Головними недоліками такого ПП є вимогливість до ресурсів ПК та висока ціна, наявні особливості роботи з графічним інтерфейсом користувача та обмежені операції з траєкторією руху маніпуляційної системи ПР.

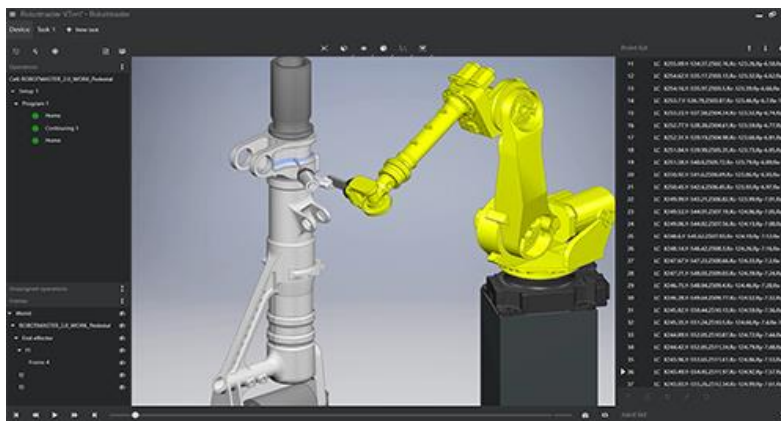


Рис. 4. Графічний інтерфейс користувача ПП RobotMaster

ПП Siemens NX CAM Robotics дає змогу проектувати, моделювати, перевіряти, оптимізувати та програмувати онлайн ПР для завдань механічної обробки. Графічний інтерфейс програми представлено на рисунку 5. Цей ПП також має функціональні можливості з визначення колізій, генерування руху кінцевого ефектора (end effector), а також програмування офлайн та постобробки [5].

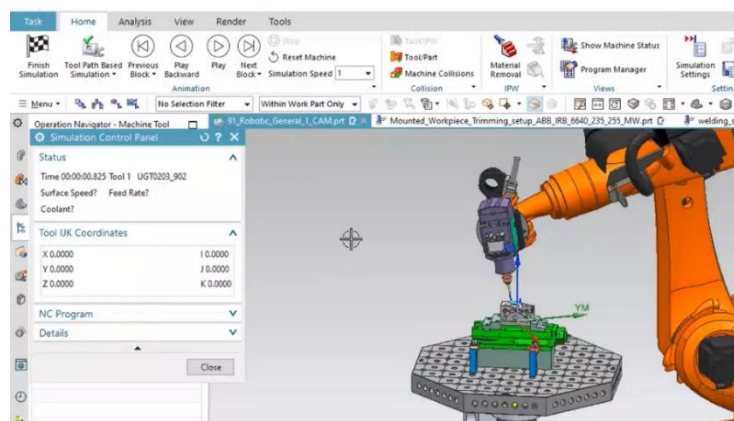


Рис. 5. Графічний інтерфейс користувача ПП Siemens NX CAM Robotics

Характерною особливістю ПП Siemens NX CAM Robotics є те, що він працює в програмній екосистемі Siemens NX. Це дає змогу повністю розробити технологію виготовлення виробу. Вартість цього ПП близько 280 доларів США в місяць [6]. Недоліками такого потужного ПП є: тривале навчання користувача, вимоги до характеристик ПК, висока вартість ПП та обладнання, необхідного для його використання; необхідність вміння правильно інтерпретувати та аналізувати результати, що отримуються в програмі; періодичні проблеми зі сумісністю при оновленнях та нових версіях ПП.

KUKA WorkVisual – це ПП, що призначений для програмування та конфігурації роботів KUKA. На рисунку 6 представлено графічний інтерфейс користувача. Програма KUKA WorkVisual має фонову перевірку під час програмування, тому будь-які помилки виправляються у фоновому режимі [7]. Основні функціональні можливості цього ПП: побудова траєкторій руху маніпуляційної системи ПР, автономне програмування роботів; офлайн конфігурація комплексу роботів; функція діагностики; а також конфігурація трасування та його аналіз. Ціна да такий ПП не фіксована і залежить від наповнення пакета, і тому ціна варіюється від 3 000 до 10 000 доларів США в рік. Головним недоліком цього ПП є обмежена кількість моделей підтримуваних ПР, особливо ПР інших виробників.

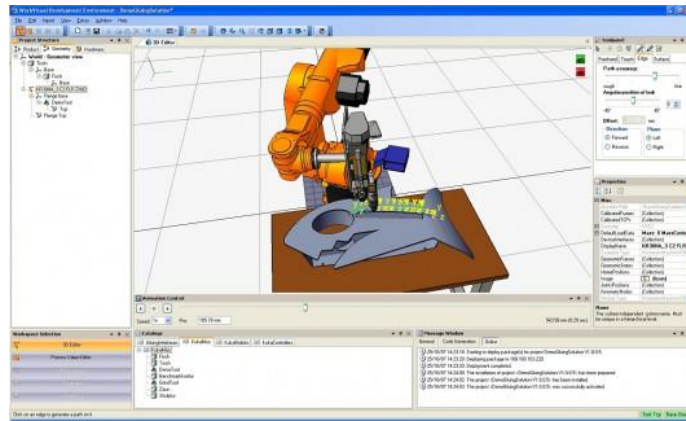


Рис. 6. Графічний інтерфейс користувача ПП KUKA WorkVisual

ROS (Robot Operating System) – це багатофункціональна операційна система (ОС), яка була розроблена у лабораторії штучного інтелекту Стенфордського Університету США (рис. 7).

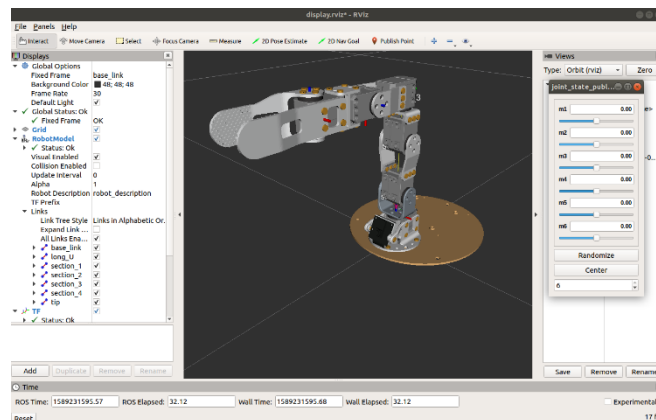


Рис. 7. Графічний інтерфейс користувача ПП ROS (Robot Operating System)

Операційна система для роботів (ROS) являє собою набір інструментів, бібліотек та програмного забезпечення. ROS забезпечує апаратну абстракцію, драйвери пристроїв, бібліотеки, візуалізатори, передачу повідомлень, керування пакетами й багато іншого [8]. До популярних додатків використання ROS належать: розуміння рухів, тестування, захоплення предметів, координація, планування та багато іншого. Цей ПП є безкоштовним з відкритим кодом, також є можливість придбання додаткових пакетів. Основними недоліками такого ПП є відсутність стандартизації в деяких аспектах системи, необхідність високого рівня знань програмування та робототехніки для роботи з системою, недостатня документація та підтримка розробників. Інтегроване середовище програмування Famic Technologies Automation Studio містить інструменти, які є корисними на всіх етапах проектування технічної системи (рис. 8). Воно використовується для САПР, технічного обслуговування та навчання. Automation Studio пропонує унікальне поєднання зручних для користувача функцій системного проектування, розширених інженерних можливостей, динамічного та реалістичного моделювання, комплексних функцій анімації та гнучких функцій документування в одному середовищі. Цей ПП має такі функціональні можливості: системний дизайн та інжиніринг; перевірка систем та моделювання; тестування та введення в експлуатацію; централізування документації у проєктах, технічне та машинне навчання, технічне обслуговування та

діагностика [9]. Ціна на ПП Famic Technologies Automation Studio не фіксована і залежить від наповнення пакета, проте ціновий інтервал варіюється від 1 000 до 10 000 доларів США в рік. Окрім високої вартості, Famic Technologies Automation Studio, як і вказані вище ПП, є ресурсозатратним, а саме вимагає велика кількість оперативної пам'яті та має складний інтерфейс.

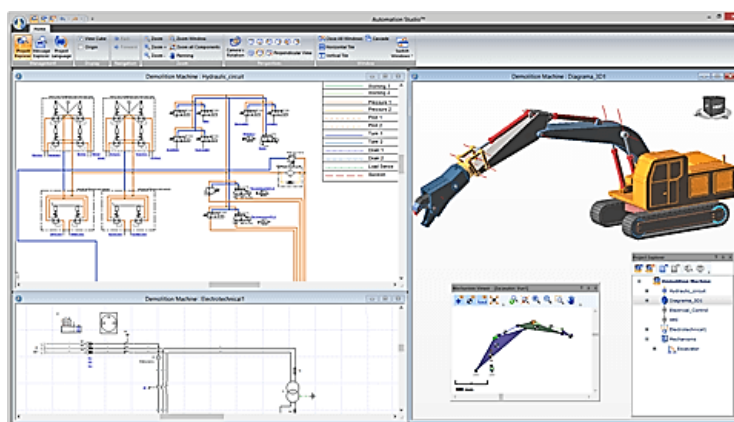


Рис. 8. Графічний інтерфейс користувача ПП Famic Technologies Automation Studio

Tecnomatix Plant Simulation – ПП призначений для моделювання, імітації, дослідження та оптимізації логістичних систем та їхніх процесів (рис. 9). Інструменти моделювання можуть використовуватися для аналізу глобальних об'єктів, усього заводу або просто декількох машин у виробничій лінії для подальшої автоматизації [10]. Функціональні можливості такого ПП: об'єктно-орієнтоване ієрархічне моделювання на основі спеціалізованих бібліотек об'єктів для швидкого та ефективного моделювання дискретних і безперервних процесів; графічні результати для аналізу пропускної спроможності та автоматичного виявлення вузьких місць; інструменти енергетичного аналізу для розрахунку та оптимізації енергоспоживання; 3D візуалізація онлайн та анімація на основі формату JT стандарту ISO; інтегровані нейронні мережі для опрацювання експериментів і автоматичної оптимізації системи за допомогою генетичних алгоритмів. Ціна на такий ПП з базовим пакетом становить 142 долари США в місяць. Особливістю роботи цього ПП є неможливість роботи в режимі «офлайн» та деякі обмеження на кількість моделей в робочому просторі програми.

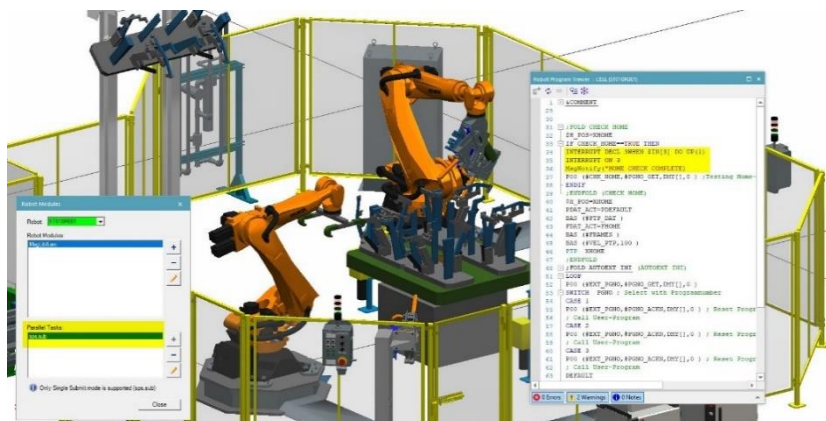


Рис. 9. Графічний інтерфейс користувача ПП Tecnomatix Plant Simulation

ПП RoboDK може функціонувати як симулятор та програматор для ПР (рис. 10). RoboDK має велику бібліотеку з більш ніж 500 роботів від 50 різних виробників [11]. Функціональні можливості цього ПП: можливість автоматичного перетворення програм САМ у програми роботів (підтримка файлів G-Code і ART); можливість програмування понад 500 роботів, механізмів і зовнішніх осей, використання одного середовища моделювання; функції CAD з підтримкою декількох програм САПР, таких як SolidWorks, Inventor, Fusion 360, Rhino та MecSoft; розрахунок часу циклу; калібрування робота [12].

Залежно від потреб користувача ціна ПП може досягати до 4 000 доларів США в рік. Перевагою такого ПП є надання компанією-розробником безкоштовних пробних ліцензій.

Особливість роботи цього ПП – це підтримка 3D-моделей у форматі stl та obj, деякі проблеми конвертації та переносу даних з одного ПП в інший та неможливість завантажити 3D-модель одним цілісним файлом.

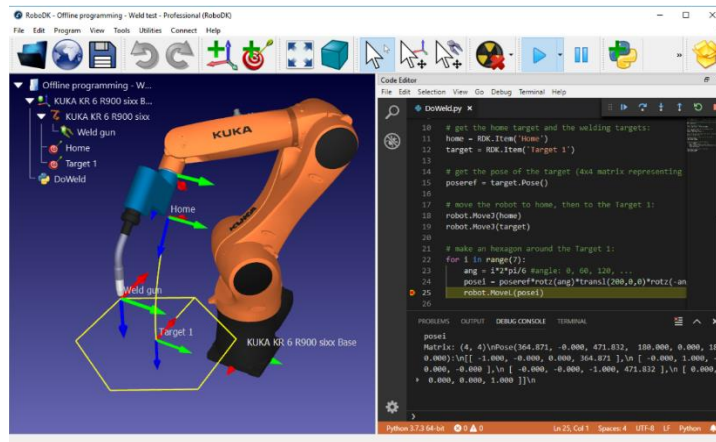


Рис. 10. Графічний інтерфейс користувача ПП RoboDK

Gazebo – це 3D універсальний симулятор у сфері робототехніки. Gazebo можна використовувати для симуляції роботи наземних роботизованих систем, БПЛА, промислових маніпуляторів, мобільних роботів та інших рухомих об'єктів (рис. 11). Такий програмний продукт має відкритий код та є безкоштовним. Gazebo містить в собі різноманітні інструменти для налаштування та розробки сценаріїв симуляції, API для мов програмування, а також інтерфейс користувача, що дозволяє налаштувати параметри симуляції та візуалізації. За допомогою Gazebo можна моделювати та тестувати різноманітні рухомі системи, а також проводити дослідження у різних галузях [13]. Крім того, він підтримує імітацію сенсорів та іншого обладнання, такого як лазерні сканери, камери та мікрофони. Основним недоліком Gazebo є свій власний формат файлів та спосіб збереження інформації, що в свою чергу ускладнює експорт даних в інші системи та ПП.

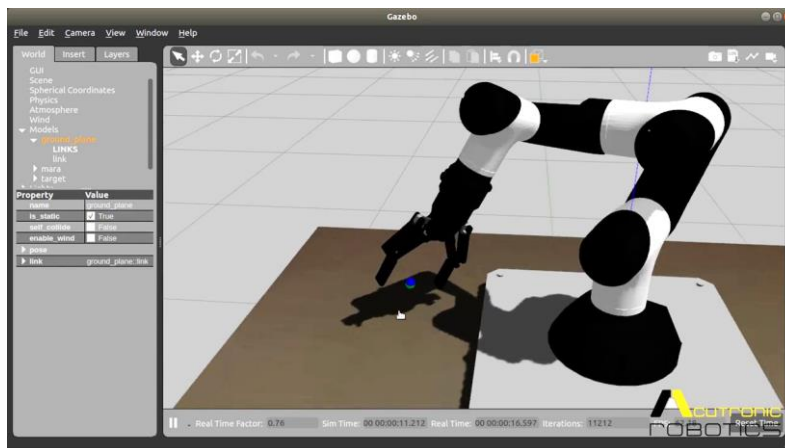


Рис. 11. Графічний інтерфейс користувача ПП Gazebo

До симуляторів роботів з відкритим вихідним кодом належить і ПП Webots, який надає повноцінне середовище розробки для моделювання, програмування та симуляції роботів. Графічний інтерфейс користувача представлено на рисунку 12. В віртуальному середовищі можуть бути розміщені різні роботи, а саме більш ніж 100 різноманітних моделей [14]. До функціонала Webots належать такі можливості: розробка власних роботів або робота з готовими варіантами, розробка тривимірного кастомізованого середовища (поверхня, перешкода, ціль, небо, фізична модель поведінки); розробка логіки робота; симуляція та тестування та відеозапис або скріншот симуляції [15]. Цей ПП є безкоштовним та має можливість придбання додаткових пакетів за необхідністю. Недоліками є обмежена підтримка моделювання деяких типів роботів та обмежена підтримка графічного інтерфейсу на певних операційних системах.

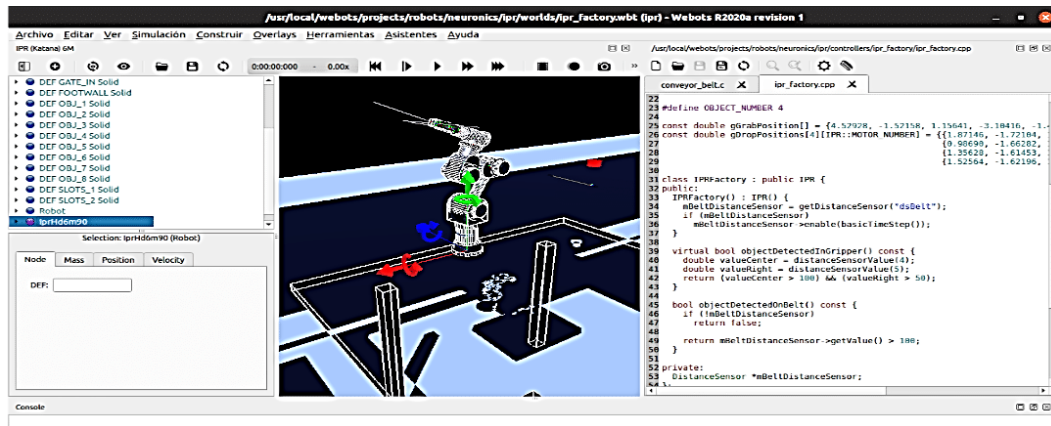


Рис. 12. Графічний інтерфейс користувача ПП Webots

Robotics Toolbox (MATLAB) – цей ПП є складовою MATLAB, що надає інструменти та алгоритми для проектування, моделювання, тестування ПР і мобільних роботів (рис. 13). Для маніпуляторів набір інструментів містить алгоритми для перевірки зіткнень, планування траєкторії, формування траєкторії, прямої та зворотної кінематики й динаміки й використанням представлення дерева твердих тіл. Для мобільних роботів він включає алгоритми картографування, локалізації, планування шляху, слідування шляху та керування рухом [16]. Набір інструментів дозволяє створювати тестові сценарії та використовувати надані довідкові приклади для перевірки звичайних промислових робототехнічних програм. Він також містить бібліотеку доступних моделей ПР, які можна імпортувати, візуалізувати, симулювати та використовувати з еталонними програмами. ПП Robotics Toolbox (MATLAB) має безкоштовну пробну версію, а підписка на рік коштує 800 доларів США. Особливості роботи з Robotics Toolbox (MATLAB) – це відсутність графічного інтерфейсу користувача та обмежена кількість ПР і сенсорів.

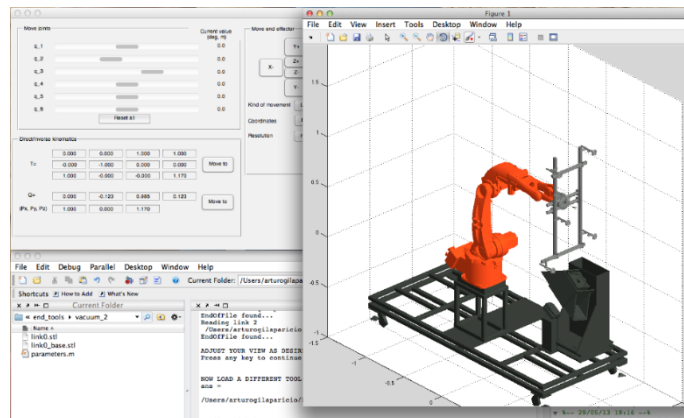


Рис. 13. Графічний інтерфейс користувача ПП Robotics Toolbox (MATLAB)

Вказану вище інформацію про спеціалізовані ПП узагальнено в таблиці 1, де умовними позначеннями «+» та «-» вказано наявність або відсутність вказаного функціонала. Також зазначено таку інформацію:

- проаналізовані функціональні можливості в частині технологічної підготовки на етапі проектування (пункти 1-19 в таблиці 1);
- операційні системи (ОС), які підтримують роботу ПП (пункт 20 в таблиці 1);
- додаткові вимоги або програмні модулі, які потрібні для функціонування того чи іншого ПП (пункт 21 в таблиці 1);
- ціни (пункт 22 в таблиці 1).

«Проаналізовані функціональні можливості» висвітлюють здатність ПП виконувати найпоширеніші та найважливіші операції (табл. 1) з 3D-моделями або іншими цифровими моделями, промислових роботів, об'єктів маніпулювання, допоміжного обладнання тощо. Також функціональні можливості визначають особливості роботи та програмування ПР або підготовку інформації для створення управляючої програми для ПР. В «Проаналізовані функціональні можливості» прийняті скорочення наступних термінів: гнучкі виробничі комірки (ГВК), об'єкт маніпулювання (ОМ), технологічне обладнання (ТО), затискний пристрій промислового робота (ЗППР).

Порівняння ПП за аналізованими можливостями

№ з/п	Проаналізовані можливості	Програмний продукт									
		RobotWorks	KUKA Work Visual	RobotMaster	Famic Technologies Automation Studio	Tecnomatix Plant Simulation	Gazebo	ROS	Webots	RoboDK	Siemens NX CAM Robotics
1	Можливість створення 3D-моделі ПР та інших структурних складових ГВК	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	Побудова 3D сцени ГВК на основі готових моделей ПР, ОМ, ТО	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Формування траєкторій переміщення затискного пристрою за опорними точками	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	Офлайн корегування колізійних траєкторій	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+
5	Можливість перевірки на колізію між елементами ГВК	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
6	Підготовка інформації для управляючих програм ПР	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
7	Розробка управляючих програм ПР	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	Програмування ПР	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9	Можливість розрахунку часу циклу (швидкодія) траєкторій	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
10	Розв'язування прямої задачі кінематики (ПЗК)	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
11	Розв'язування зворотної задачі кінематики (ЗЗК)	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
12	Розв'язування прямої задачі динаміки (ПЗД)	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
13	Розв'язування зворотної задачі динаміки (ЗЗД)	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+
14	Визначення координат точки затиску ОМ в ЗППР	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Визначення орієнтації ЗППР при затиску ОМ в ЗППР	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
16	Визначення енергоємності траєкторій	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-
17	Апроксимація траєкторій кінцевою множиною сплайнів	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
18	Вибір оптимальної траєкторії	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+
19	Open source	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
20	Підтримувані операційні системи	Windows	Windows	Windows	Windows	Windows	Linux, macOS	Linux	Windows, Linux	Linux, Mac OS, Windows	Windows
21	Додаткове програмне забезпечення	Solid Works	-	-	MATLAB, SolidWork, AutoCAD, EPLAN	-	ROS	-	ROS MATLAB	-	-
22	Вартісна складова	300 \$ на місяць	3 000 \$ – 10 000 \$ на рік	1000 \$ – 4000 \$ на рік	1000 \$ – 10000 \$ на рік	142 \$ на місяць	-	-	-	-	279 \$ на місяць

Параметр «Підтримувані операційні системи» вказує на можливість запустити ПП та його стабільну роботу у вказаній ОС. Деякі ПП підтримують різні ОС, але зазвичай мають різні дистрибутиви для різних ОС.

«Додаткове програмне забезпечення» вказує на необхідність наявності додаткового програмного забезпечення, програмних модулів або бібліотек для роботи програми, в деяких випадках відсутність таких додаткових програмних компонентів може бути причиною «крашів» програми або взагалі призвести до неможливості її запуску. «Вартісна складова» вказує або фіксовану разову виплату у валюті для отримання ліцензії, або на ціну ліцензійної підписки на деякий період (місяць, рік). У разі відсутності ціни ПП може бути «open source», тобто безкоштовним.

Узагальнюючи інформацію, наведену в таблиці 1, можна стверджувати: майже всі ПП працюють на ОС Windows; більшість з ПП підтримують найпотрібніші функції (планування траєкторій, перевірка колізій, пряма і зворотна кінематика тощо); вибір оптимальних траєкторій переміщення ланок маніпуляційної системи ПР підтримує декілька програм; цінова складова деяких ПП доволі висока за пропонований функціонал. Вказане вище формує твердження, що універсального ПП для розв'язання задач промислової робототехніки в механоскладальних виробництвах машино- та приладобудування не існує. Кожний ПП пропонує свої програмні рішення та функціональні можливості, які в свою чергу оптимізовані під конкретні задачі чи технології.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Виконано узагальнення результатів проведеного аналізу найбільш відомих ПП на основі доступних інформаційних джерел щодо функціональних можливостей та сфер застосування на етапах планування, проектування, програмування роботизованих систем у механоскладальних виробництвах машино- та приладобудування.

Результати аналізу показали, що на сьогоднішній день не існує універсального ПП, який має всі потрібні функціональні можливості та який працює на всіх ОС. Open source рішення дають широкі можливості для потенційного розв'язання задач промислової робототехніки в механоскладальних виробництвах машино- та приладобудування, але мають дуже високий поріг входження через необхідність розуміння ряду мов програмування.

У подальшому планується провести розширений аналітичний огляд інших предметно- та об'єктно-орієнтованих ПП, яких на сьогодні за доступними інформаційними джерелами нараховується біля 30. Саме комплексний аналіз їх функціональності дозволить у подальшому обґрунтовано та аргументовано обрати їх для використання та впровадження у нових умовах колаборативної та когнітивної робототехніки.

References:

1. «Order World Robotics Reports» (2022), *The International Federation of Robotics*, [Online], available at: <https://ifr.org/free-downloads/>
2. «Official software product website» (2022), *SolidWorks Ltd*, [Online], available at: <https://www.solidworks.com/>
3. «Official software product website» (2002), *RobotWorks Compucraft Ltd*, [Online], available at: <https://www.solidworks.com/partner-product/robotworks>
4. *Robotmaster offline programming software for robots* (2022), Official software product website, [Online], available at: <https://www.robotmaster.com/en/products>
5. *NX CAM Robotics Programming*, (2015), [Online], available at: <https://www.geoplms.com/knowledge-base-resources/GEOLM-Siemens-PLM-NX-CAM-Robotics-Programming.pdf>
6. *Siemens NX software* (2023), Official ATA engineering, INC website, [Online], available at: <https://ata-e.com/software/siemens-plm-software/siemens-nx-software/>
7. *KUKA.WorkVisual* (2015), Official software product website, [Online], available at: https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/software/system-software/kuka_systemsoftware/kuka-work-visual
8. *Robot Operating System (ROS)* (2023), Official ROS Documentation, [Online], available at: <https://www.mathworks.com/help/ros/gs/robot-operating-system-ros.html>
9. *Automation Studio* (2023), Official software product website, [Online], available at: <https://www.famictech.com/en/Products/Automation-Studio/Professional-Edition>
10. *Siemens Tecnomatix Plant Simulation* (2023), Official software product website, [Online], available at: <https://www.indx.com/en/product/siemens-tecnomatix-plant-simulation>
11. *RoboDK* (2023), Official software product website, [Online], available at: <https://www.automate.org/companies/robodk>
12. *Robodk simulation software* (2023), Official software product website, [Online], available at: <https://www.universal-robots.com/plus/products/robodk/robodk-simulation-software/>
13. *ROS Gazebo: Everything You Need To Know* (2021), [Online], available at: <https://roboticsimulationservices.com/ros-gazebo-everything-you-need-to-know/>
14. *Webots official developer website* (2023), Official software product website, [Online], available at: <https://cyberbotics.com/>
15. *Webots, an open source software to simulate mobile robots* (2020), [Online], available at: <https://ubunlog.com/en/webots-software-simulation-mobile-robots/>
16. *Robotics System Toolbox* (2023), Official software product website, [Online], available at: <https://www.mathworks.com/products/robotics.html>

Пилипенко Олександр Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-1200-0385>.

Наукові інтереси:

- механічна обробка важкооброблюваних матеріалів;
- застосування різальних інструментів з надтвердих матеріалів;
- підвищення ефективності механічної обробки шляхом використання вібраційних процесів;
- технологічна підготовка роботизованих механоскладальних виробництв.

Громовий Олексій Андрійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерноінтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-2761-0736>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- системи автоматизованого проектування в машинобудуванні;
- адитивні технології виробництва.

Виговський Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-2199-5129>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів;
- різальний інструмент для гнучких виробничих систем.

Pylypenko O.M., Gromovyy O.A., Vyhovskyi H.M.

**Software products for the automated solution of industrial robotics problems
in mechanical assembly plants of machine and instrument engineering**

The article highlights the trend of increasing demand for industrial robotics in mechanical assembly industries in recent years. A brief analytical review of PP for the automated solution of problems of industrial robotics in mechanical assembly productions of machine and instrument engineering was performed. A critical analysis of the most common PPs was carried out regarding their functional capabilities in the technological preparation of robotic systems, supported operating systems, auxiliary software, and the price component. The above information is summarized in the form of a table, which indicates the presence of the main analyzed possibilities of PP. The results of a critical analysis of the most well-known PP based on available information sources regarding functionality and application options at the stages of planning, design, programming of robotic systems showed that at the moment there is no universal PP or software solution that can meet modern production requirements. Positive trends in the application show open source PPs, which provide flexibility in application, but require the user to be highly qualified in robotics and programming, but even they do not guarantee the complete solution of tasks of scientific research and engineering content.

Keywords: robotics; industrial robot collaboration; PP; motion trajectory; mechatronics; kinematics; 3D model; automation; flexible production.

Стаття надійшла до редакції 16.03.2023.