

література



Навчально-методична

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя

*Кафедра автоматизації
технологічних процесів і
виробництв*

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторної роботи № 1
«Ознайомлення з основними функціями
програмного середовища RobotStudio»
з курсу “Гнучкі комп'ютеризовані системи та
робототехніка”
для студентів спеціальності
151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

Тернопіль
2019

«Ознайомлення з основними функціями програмного середовища RobotStudio» методичні вказівки до лабораторної роботи № 1 з курсу “Гнучкі комп'ютеризовані системи та робототехніка” для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Укл. Р.І. Михайлишин, В.Б. Савків. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – 45 с.

Рецензент: д.т.н., професор Стухляк П.Д.

Методичні вказівки розглянуто і схвалено на засіданні кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв

Схвалено і рекомендовано до друку Науково-методичною радою факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії.

Зміст

Правила техніки безпеки	4
Лабораторна робота № 1. Ознайомлення з основними функціями програмного середовища RobotStudio.....	5
Вступ.....	5
1. Короткі теоретичні відомості	8
1.1 Область застосування.....	9
1.2 Недоліки.....	9
2. Початок роботи.....	9
3. RobotStudio® - терміни та поняття.....	11
4. Поняття в RAPID.....	13
5. Поняття програмування	15
6. Шлях (траєкторія) та базові точки	16
7. Системи координат	18
7.1 Система координат точки (TCP) центру інструментів.....	18
7.2 Система RobotStudio® World Coordinate	19
7.3 Станції з кількома робототехнічними системами	21
7.4 Незалежні системи MultiMove	22
7.5 Система координат об'єкта	23
8. Конфігурації осей роботів.....	24
9. Створення робочої станції в RobotStudio®.....	31
10. Імпортування інструменту в RobotStudio®	40
11. Хід роботи.....	42
12. Порядок оформлення звіту	42
13. Контрольні запитання	42
Рекомендована література	43

Правила техніки безпеки

До лабораторних робіт студенти допускаються тільки з дозволу викладача в його присутності або інженера.

При виконанні роботи студенти повинні виконувати наступні вимоги з техніки безпеки.

1. Перед початком роботи:

1.1. Привести в порядок одяг: застібнути рукави, заправити одяг так, щоб не було звисаючих кінців.

1.2. Оглянути робоче місце, впевнитися у відсутності можливих перешкод на шляху рухомих вузлів.

1.3. Переконатись у правильності і надійності під'єднання з'єднуючих кабелів.

1.4. Перевірити надійність заземлення.

2. Під час роботи:

2.1. Виконувати роботу у суворій відповідності з отриманим завданням.

2.2. Забороняється:

- залишати включене обладнання без нагляду;
- проводити самотійно ремонт обладнання;
- безконтрольно маніпулювати клавіатурою.

2.3. Не брати і не передавати через установку будь-які предмети.

2.4. Після вводу тексту керуючої програми перевірити правильність її роботи в покроковому режимі.

2.5. При виникненні в процесі роботи збоїв роботу потрібно негайно припинити.

3. Після закінчення роботи:

3.1. Виключити електрообладнання.

3.2. Привести в порядок робоче місце.

3.3. Повідомити викладачу про всі виявлені недоліки у роботі обладнання.

Лабораторна робота № 1. Ознайомлення з основними функціями програмного середовища RobotStudio

Мета роботи: отримання студентами початкових знань про можливості програмного середовища ABB RobotStudio® та додаткові програми, необхідні для його функціонування.

Вступ

Промисловий робот (рис. 1), відповідно до ISO 8373 [1]: автоматично керований, перепрограмовуваний, багатофункціональний маніпулятор, програмований з трьома або більше ступенями свободи (осями), який може бути або закріпленим на місці, або мобільним для використання в промислових комірках.

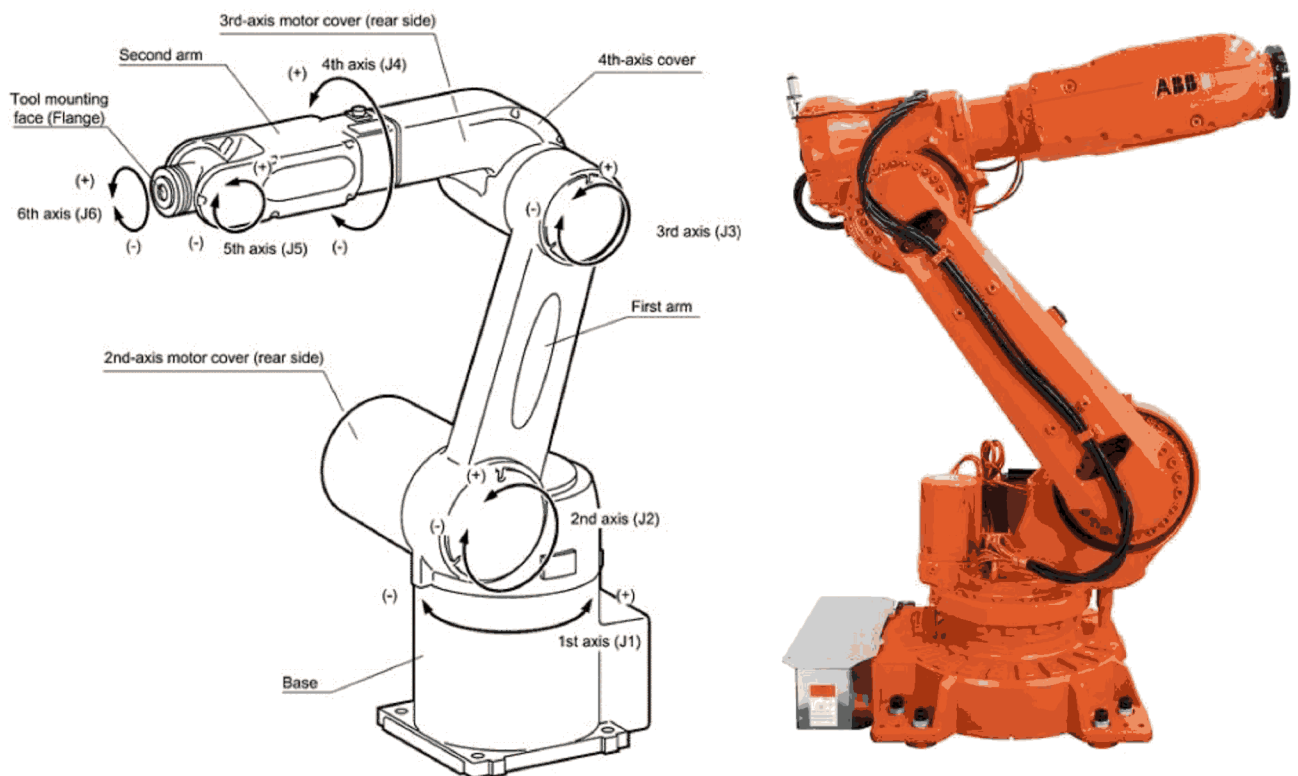


Рис. 1 – Типове компонування промислового робота

Промислові роботи (ПР) характеризуються:

- **За характером виконуваних операцій:**
 - основні (технологічні), які безпосередньо виконують технологічні операції і беруть участь в технологічному процесі в якості обробних машин (фарбувальні, зварювальні, складальні і т.п.);
 - допоміжні (підйомно-транспортні), які застосовуються для обслуговування основного технологічного обладнання, для виконання допоміжних операцій, на транспортно-складських операціях;
 - універсальні – виконують різні основні і допоміжні операції.

- **За призначенням:**

У машинобудуванні, залежно від виду обслуговуваних технологічних процесів, ПР поділяють на наступні групи:

- ливарні;
- зварювальні;
- ковальсько-пресові;
- для механічної обробки;
- складальні;
- фарбувальні;
- завантажувально-розвантажувальні;
- транспортні (мобільні);
- складські.
- **За ступенем спеціалізації:**
 - універсальні (багатоцільові) (роботи, призначені для виконання різних операцій і, зокрема, для роботи спільно з різними видами технологічного обладнання);
 - спеціалізовані (цільові) (такі ПР мають вужче призначення і виконують певну операцію, наприклад, зварювання, фарбування, обслуговування обладнання певного типу);
 - спеціальні роботи (виконують тільки одну конкретну операцію, наприклад, обслуговують конкретну модель технологічного обладнання).
- **За видом системи координат руки маніпулятора:**
 - прямокутна;
 - циліндрична;
 - сферична;
 - кутова (ангулярна);
 - інші.
- **За кількістю маніпуляторів:**
 - одноманіпуляторні (однорукі);
 - дворуки;
 - трьохрукі;
 - чотирьохрукі.

Як правило, робот має не більше одного маніпулятора. Зазвичай багаторукі роботи мають однакові маніпулятори, але існують конструкції роботів з різними маніпуляторами. Наприклад, для обслуговування пресів холодного штампування ПР може мати два різних маніпулятори: один основний – для взяття заготовки і завантаження її в прес, а другий, спрощеної конструкції, – для виконання більш простої операції зіштовхування готової деталі в бункер.

- **За рухомістю основи:**

- мобільні (роботи, що мають шасі для переміщення його основи);
- стаціонарні (поділяються на: підлогові; підвісні, що переміщуються по піднятому рейковому шляху; вбудовані в обладнання, наприклад, в обслуговуваний верстат).

- **За кількістю ступенів рухомості маніпулятора:**

- 3 і менше;
- від 4 до 6;
- більше 6.

Трьох ступенів рухомості достатньо для переміщення робочого органу маніпулятора в будь-яку точку обслуговуваного роботом простору. Ще три ступені рухомості необхідні, щоб в цій точці здійснювати будь-яку кутову орієнтацію захоплюючого пристрою або інструменту. Більше шести ступенів рухомості необхідні роботу для оминання перешкод.

- **За типом силового приводу:**

- електромеханічні;
- пневматичні;
- гідравлічні;
- комбіновані.

- **За вантажопідйомністю** (вантажопідйомність робота визначається вантажопідйомністю його маніпулятора, а за наявності декількох маніпуляторів – вантажопідйомністю найбільш потужного з них):

- надлегкі (до 1 кг);
- легкі (до 10 кг);
- середні (до 200 кг);
- важкі (до 1000 кг);
- надважкі (понад 1000 кг).

- **За швидкістю і точністю рухів:**

Швидкодія маніпулятора визначається швидкістю його переміщення по окремих ступенях рухомості. Швидкодію роботів промислового призначення розбивають на три наступні групи:

- малої швидкодії – при лінійних швидкостях по окремих ступенях рухомості до 0,5 м/с;
- середньої швидкодії – при лінійних швидкостях від 0,5 до 1 м/с;
- високої швидкодії – при лінійних швидкостях більших 1 м/с.

Більшість сучасних роботів мають середню швидкодію і лише 20% з них – високу. Основна проблема, що обмежує швидкодію ПР, пов'язана з забезпеченням необхідної точності.

Точність маніпулятора характеризується результируючою похибкою позиціонування (при дискретному русі) або відпрацювання заданої траєкторії (при безперервному русі). Найчастіше точність роботів характеризують абсолютною похибкою.

Точність роботів промислового призначення поділяють на три групи:

- малої точності – при лінійній похибці, більшій 1 мм;
- середньої точності – при лінійній похибці від 0,1 до 1 мм;
- високої точності – при лінійній похибці, меншій 0,1 мм.

- **За видом системи керування (характеру програмування):**

- циклові (кількість точок позиціонування по кожному ступеню рухомості мінімальна і найчастіше обмежена двома – початковою і кінцевою координатами);

- позиційні (управління рухом здійснюють, задаючи кінцеву послідовність точок і подальше переміщення по них кроками від точки до точки);
- контурні (управління рухом по окремих ступенях рухомості – безперервне);
- комбіновані.
- **За видами програми керування:**
 - з жорсткою програмою (працюють за наперед заданою програмою);
 - перепрограмовувані (програму керування можна змінювати автоматично або за допомогою пульта оператора);
 - адаптивні (мають засоби сприйняття зовнішнього середовища і тому можуть працювати в наперед нерегламентованих і змінних умовах, наприклад, брати довільно розташовані предмети, обходити перешкоди і т.д.);
 - з елементами штучного інтелекту (разом із сенсорними системами мають систему обробки зовнішньої інформації, яка забезпечує їм можливість інтелектуальної поведінки, подібної до поведінки людини в аналогічних ситуаціях).

Один з найбільших виробників промислових роботів, компанія ABB, реалізувала спеціалізоване програмне забезпечення RobotStudio®, доступне тільки для своїх роботів.

1. Короткі теоретичні відомості

RobotStudio® – це програмне середовище для моделювання, автономного програмування та моделювання робототехнічних комплексів (РТК). RobotStudio® дозволяє працювати з автономним контролером, що є віртуальним контролером IRC5 та працює локально на персональному комп'ютері. Цей автономний контролер також називається віртуальним контролером (ВК).

RobotStudio® також дозволяє працювати з реальним фізичним контролером IRC5, який просто називається реальним контролером [1-24].

Коли RobotStudio® використовується з реальними контролерами, його називають онлайн-режимом. При роботі без підключення до реального контролера, або під час підключення до віртуального контролера, RobotStudio® вважається в автономному режимі.

Основа кожної програми – це мова програмування, що спеціалізується на механізмі, який використовується, та яку неможливо використовувати для інших цілей. Для програмування роботів ABB була створена мова програмування RAPID. Ця мова програмування використовується для створення різних завдань для промислових роботів ABB, використовуючи всі їхні технічні можливості.

В даний час кожна мова програмування використовує англійські слова для

легкості розуміння. RAPID – це мова програмування високого рівня [2], що має в той же час попередньо визначені дані, інструкції, тощо. Таким чином, це дає можливість дуже легко навчитися програмувати в RAPID, навіть якщо це онлайн чи офлайн програмування.

1.1 Область застосування

Розглянемо ситуації, коли може знадобитися використання RobotStudio®:

- необхідно підібрати модель робота, виходячи із зони досяжності промислового робота (ПР);
- при пошуку виконавця замовник, як правило, звертається в кілька фірм – системних інтеграторів. Моделювання необхідного замовником процесу може скласти конкурентну перевагу компанії;
- процес покупки та доставки ПР чи обладнання може затягнутися на кілька місяців. У цей час інженери можуть промодельовати роботу РТК в офлайн режимі;
- потрібно перевірити конструкційну досяжність інструменту, оснащення, тощо. Найчастіше геометрія спроектованого інструменту не підходить для роботи через виникаючі колізії. Зміна конструкції достатньо затратна і може зайняти багато часу;
- необхідно впровадити ПР на працюючій конвеєрній лінії. Монтаж і пусконаладження комплексу повинно бути проведене в найкоротші терміни, наприклад, за 8 годин. В цьому випадку всі програми повинні бути написані і налагоджені;
- часто алгоритм роботи РТК складний і вимагає налагодження. Налагодження складної програми в режимі on-line може привести до колізій і виходу з ладу вартісного устаткування;
- програмування в RobotStudio® здійснюється в офісі, а не в робочому цеху, який до того ж часто знаходиться в іншому місті.

1.2 Недоліки

- висока вартість ліцензії;
- необхідно мати точну CAD модель робочої сцени;
- потрібний великий досвід роботи з обладнанням для розуміння всіх відмінностей між моделюванням у віртуальному середовищі та реальною роботою РТК.

2. Початок роботи

Інструкції для виконання даної лабораторної роботи написані для RobotStudio® 6.04.01, при використанні іншої версії програми можливі відмінності в інтерфейсі програми. Слід зазначити, що RobotWare має бути інстальований перед RobotStudio®.

1. Скачайте останню версію RobotStudio® з сайту:
<http://new.abb.com/products/robotics/robotstudio> (рис. 2).

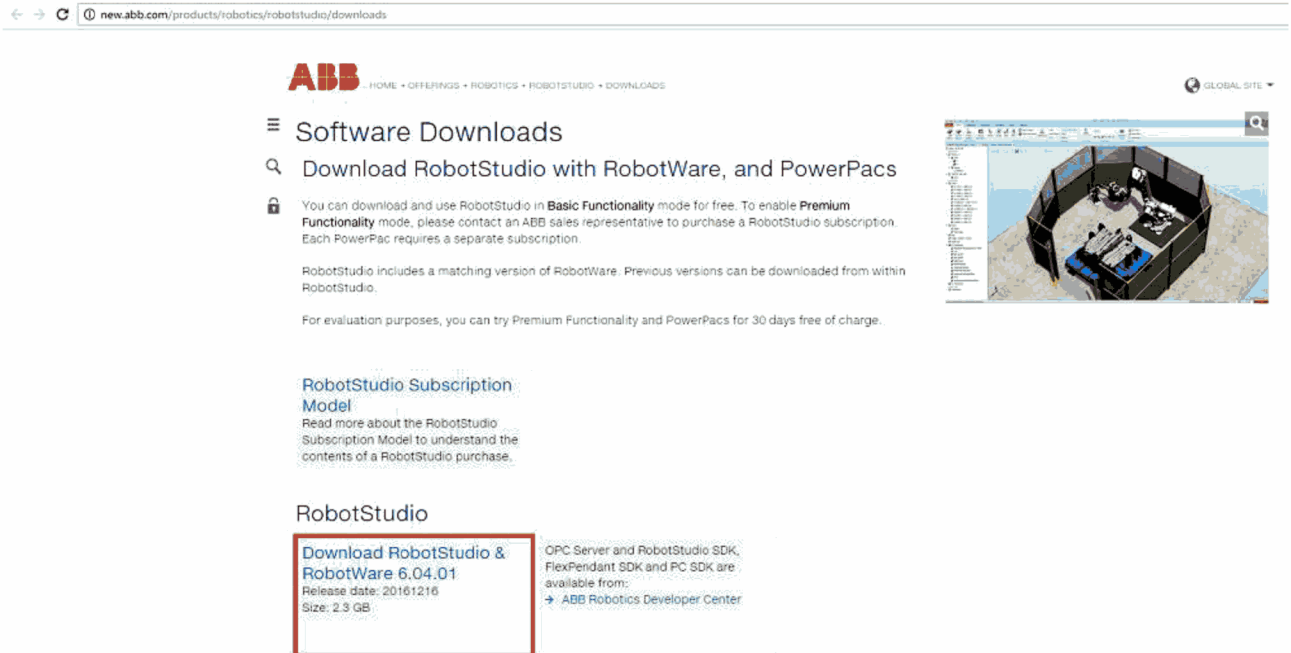


Рис. 2 – Офіційний сайт ABB

2. Запустіть setup.exe (рис. 3).

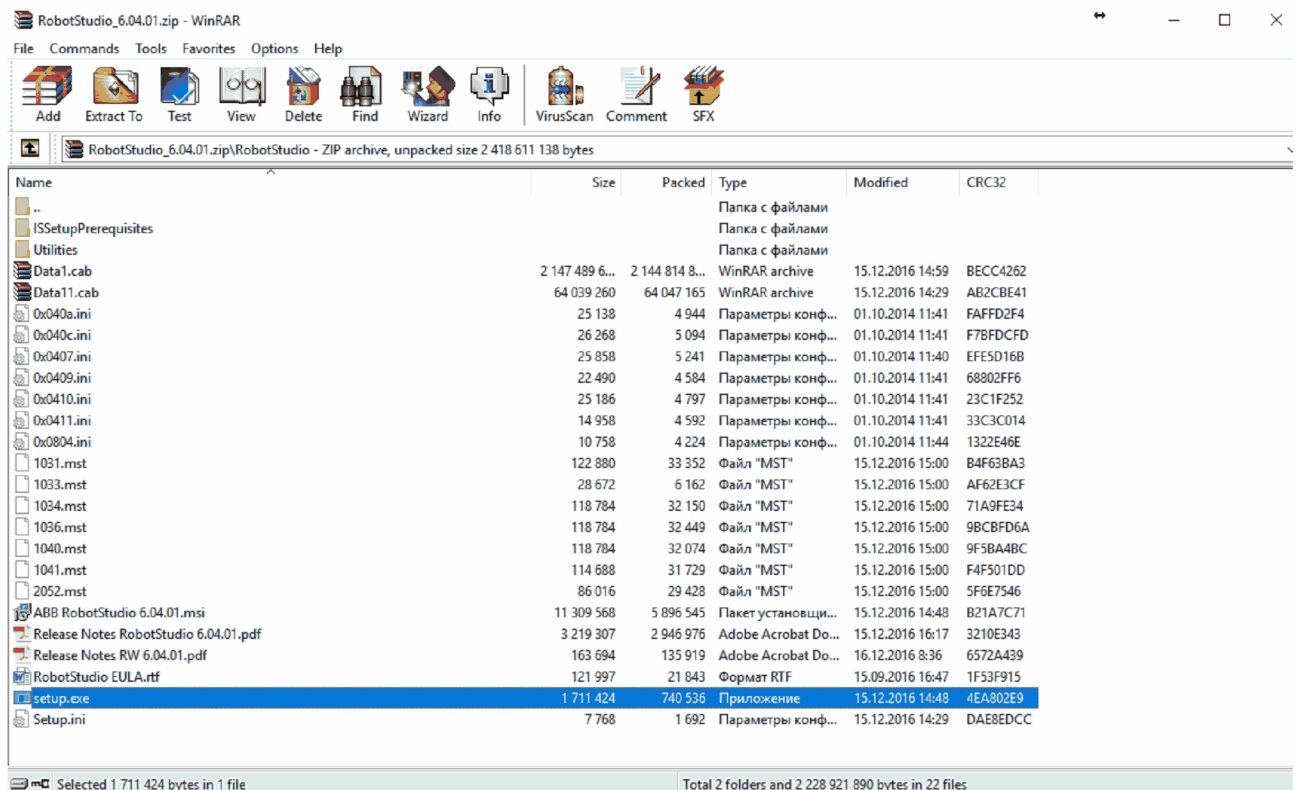


Рис. 3 – Папка з інсталятором програми

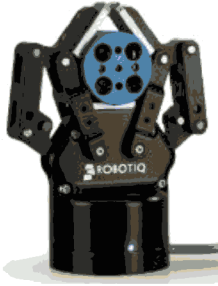
3. Дотримуйтесь вказівок з установки програми.
4. Запустіть RobotStudio®.

3. RobotStudio®: терміни та поняття

У РТК, крім ПР, є й інші апаратні компоненти, які використовуються для одночасної роботи для виконання різних завдань з промисловим роботом ABB. У таблиці 1 подано інформацію про кожен компонент, що входить до складу РТК, в даному випадку це IRC5.

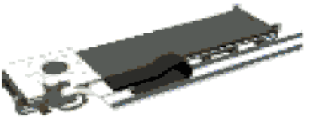
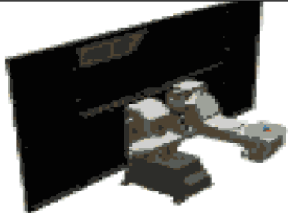
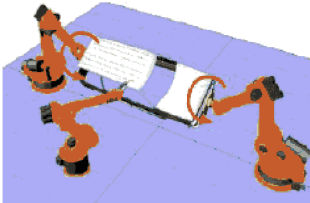
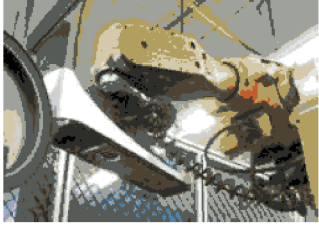
Таблиця 1. Стандартне обладнання в РТК IRC5

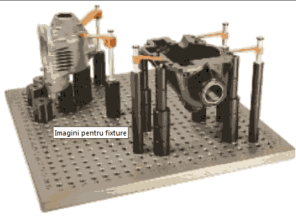
Устаткування	Пояснення	Приклад
Робот-маніпулятор	Промисловий робот ABB.	
Модуль управління	Містить головний комп'ютер, який керує рухом маніпулятора. Це включає в себе виконання RAPID і обробку сигналів. Один модуль управління може бути підключений до 1-4 модулів приводу.	
Модуль приводу	Модуль, що містить електроніку для живлення двигунів маніпулятора. Модуль приводів може містити до дев'яти приводних вузлів, кожен з яких управляє одним маніпулятором. Оскільки стандартні робототехнічні маніпулятори мають шість двигунів, зазвичай для одного маніпулятора використовується один модуль приводів.	
Контролер	Шафа контролера для роботів IRC5. Вона складається з одного модуля управління і одного модуля приводу для кожного робота-маніпулятора в системі.	
(Пульт) FlexPendant	Пульт програмування, підключений до модуля керування. Програмування на FlexPendant називається "онлайн-програмування".	

Інструмент	Пристрій, зазвичай встановлений на роботі-маніпуляторі, дозволяє йому виконувати конкретні завдання, такі як захоплення, різання або зварювання. Інструмент також може бути стаціонарним (не змонтованим на роботі) і називається «зовнішнім інструментом».	
------------	---	---

Щоб мати повний робототехнічний комплекс, який буде запрограмований на реалізацію певного завдання, потрібні додаткові компоненти. Цими компонентами, у випадку роботизованої комірки IRC5, є додаткове обладнання (див. таблиця 2).

Таблиця 2. Додаткове обладнання в робототехнічній комірці IRC5

Устаткування	Пояснення	Приклад
Доріжка маніпулятора	Пересувний стенд, що утримує робота-маніпулятора, надає йому більше робочого простору. Коли керуючий модуль керує рухом доріжки, він називається «Зовнішньою віссю доріжки».	 IRBT 4004
Позиціонер - маніпулятор	Пересувний тримач, який зазвичай тримає пристрій. Коли керуючий модуль керує рухом позиціонованого маніпулятора, його називають «Зовнішньою віссю».	 IRBP B
Гнучкий позиціонер	Два робота-маніпулятора, що діють як маніпулятор позиціонер. Він управляється тим же модулем керування, що і маніпулятор позиціонера.	
Стаціонарний інструмент	Пристрій, що стоїть у фіксованому місці, робот-маніпулятор забирає заготовку і транспортує її до пристрою для виконання конкретних завдань, таких як приклеювання, шліфування або зварювання.	
Об'єкт виробництва	Напівфабрикати та продукція, над якою здійснюються технологічні операції.	

Кріплення	Конструкція, що утримує оброблювану деталь у певному положенні, так що повторюваність виробництва може бути збережена.	
-----------	--	---

RobotWare – це сімейство програмного забезпечення контролера, що використовується тільки разом з RobotStudio®. У зв'язку з цим існують додаткові версії системи, оскільки вони повинні бути сумісні з версією RobotStudio®. Слід зазначити, що RobotWare має бути інстальований перед RobotStudio®.

4. Поняття в RAPID

Для використання робота ABB і його програмування, аналогічно як і у випадку іншого автоматизованого обладнання, необхідно знати мову програмування. Компанія ABB для програмування своїх роботів використовує мову програмування RAPID. Структура цієї мови є загальною та використовує поняття, представлені в таблиці 3.

Таблиця 3. Поняття в RAPID

Поняття	Пояснення
Оголошення даних	Використовується для створення екземплярів змінних або типів даних, наприклад «num» або «tooldata».
Інструкція	Фактичні кодові команди, що виконують конкретні завдання, наприклад, встановлюють дані певного значення або руху робота. Інструкції можна створювати тільки в процедурах «routine».
Інструкція «Move» (переміщення)	Створює рух робота. Вона складаються з посилання на точку, зазначену в оголошенні даних, разом з параметрами, що задають рух і поведінку процесу. Якщо використовуються вбудовані точки, позиція оголошується в інструкціях переміщення.
Інструкція дій	Інструкції, які виконують інші дії, крім переміщення робота, наприклад, встановлення даних або властивостей синхронізації.
«Routine» (Процедури)	Зазвичай набір декларацій даних супроводжується набором інструкцій, що виконують завдання. Процедури можна розділити на три категорії: процедури, функції і процедури захоплення.
Процедура	Набір інструкцій, які не повертають значення.
Функція	Набір інструкцій, які повертають значення.
Захоплення	Набір інструкцій, що ініціюється перериванням.

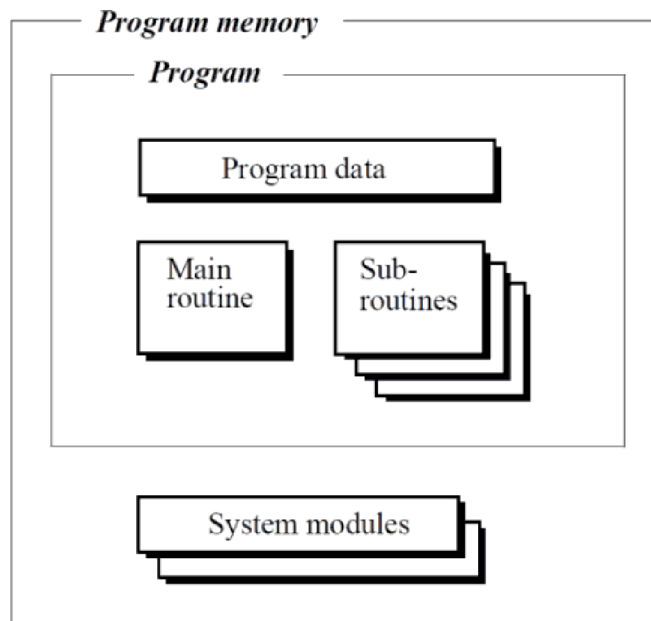


Рис. 4 – Концепції та структура RAPID

Програма складається з інструкцій і даних, запрограмованих на мові програмування RAPID (рис. 4), що керують роботом і периферійним обладнанням у вказаний спосіб. Програма, зазвичай, складається з трьох різних частин:

- головна процедура;
- кілька підпроцедур;
- дані програми.

Також пам'ять програми містить системні модулі.

Основна підпрограма – це процедура, з якої починається виконання програми.

Підпрограми використовуються для поділу програми на менші частини, для отримання модульної програми, яку легко читати. Їх називають основні процедури або інші підпрограми. Коли підпрограма повністю виконана, виконання основної програми продовжується при наступній інструкції в процедурі виклику.

Дані використовуються для визначення позицій, числових значень (реєстри, лічильники), систем координат і т.д. Дані можуть бути змінені вручну, але також можуть бути змінені програмою (наприклад, для зміни позиції або оновлення лічильника).

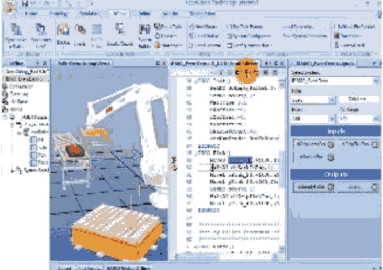
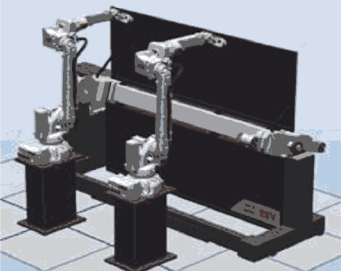
Інструкція визначає певну дію, яка має відбуватися під час виконання команди, наприклад, переміщення робота, встановлення виходу, зміна даних або перехід у програмі. Під час виконання програми інструкції виконуються по черзі, в тому порядку, в якому вони були запрограмовані.

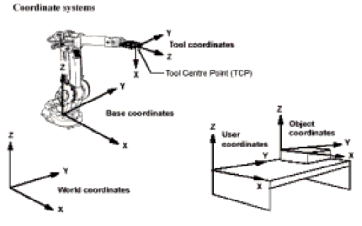
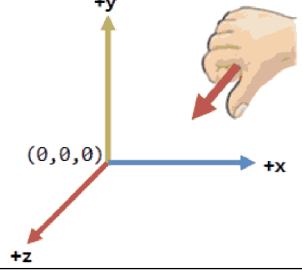
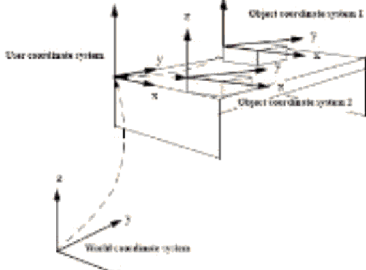
Системні модулі – це програми, які завжди є в пам'яті. Процеси і дані, пов'язані з інсталяцією, а не з програмою (наприклад інструменти та служби, зберігаються в системних модулях).

5. Поняття програмування

У випадку промислових роботів від ABB програмування роботів може бути реалізовано різними способами. Типи програмування та подальші концепції програмування представлені в таблиці 4.

Таблиця 4. Поняття програмування

Поняття	Пояснення	Приклад
Онлайн-програмування	Програмування при підключенні до реального контролера. Це поняття також передбачає використання робота для створення позицій і подальшого виконання руху.	
Офлайн-програмування	Програмування без підключення до робота або до реального контролера.	
Справжнє офлайн-програмування	Посилається на концепцію ABB Robotics про підключення середовища моделювання до віртуального контролера. Це дозволяє не тільки створювати програми, але й тестувати програми та оптимізувати їх в автономному режимі.	
Віртуальний контролер	Програмне забезпечення, яке емулює FlexController та дозволяє системі RobotWare симулювати роботу контролера на ПК. Цей офлайн режим дозволяє перевірити правильність програмування контролера перед запуском програми в онлайн режимі.	
«MultiMove»	Запуск декількох роботів-маніпуляторів з одним і тим же модулем управління.	

Системи координат	Використовуються для визначення позицій і орієнтацій. При програмуванні робота можна скористатися різними системами координат, щоб легше розміщувати об'єкти один відносно одного.	
Фрейм	Синонім «системи координат».	
Калібрування робочого об'єкта	Якщо всі точки відповідають робочим об'єктам, потрібно лише калібрувати робочі об'єкти під час розгортання автономних програм.	

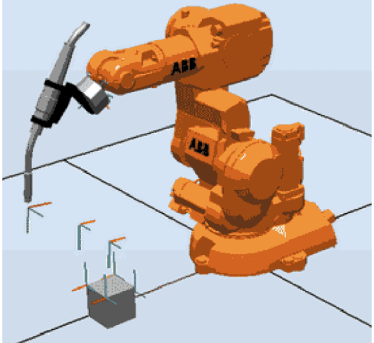
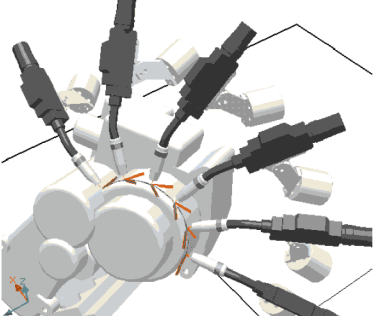
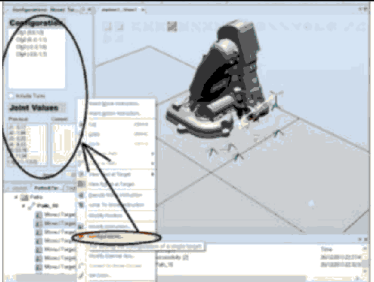
6. Траєкторія та базові точки

Для програмування промислового робота в середовищі RobotStudio® необхідно знати, які технічні завдання повинен виконувати робот. Для цього повинні бути відомі базові точки (позиції) і траєкторія (послідовність інструкцій переміщення від точки до точки) руху кінцевої ланки маніпулятора.

У RobotStudio® є можливість синхронізувати станцію RobotStudio® з віртуальним контролером. Для генерування програми в RAPID необхідно спочатку задати базові точки та параметри руху по траєкторії.

У програмі RAPID базові точки є точками, яких повинен досягнути робочий орган промислового робота. У цьому контексті вони повинні бути збережені в такому форматі даних, щоб розпізнаватися роботом для забезпечення його синхронізації з віртуальним контролером. Такий формат даних називається robtarget [1]. У таблиці 5 представлені характеристики точок.

Таблиця 5. Характеристики точок

Інформація	Пояснення	Приклад
Позиція	Положення точок, що задаються в робочій системі координат об'єкта.	
Орієнтація	Орієнтація точок відносно орієнтації робочого об'єкта. При досягненні роботом заданої точки, він буде вирівнювати орієнтацію TCP з необхідною орієнтацією в базовій точці.	
Конфігурація	Значення конфігурації ланок робота, які вказуються для досягнення базових точок.	

Траєкторія руху кінцевої ланки ПР представляє собою послідовність відпрацювання всіх базових точок з визначенням як параметрів руху, так і геометрії самої траєкторії. В середовищі RobotStudio® візуальне представлення РТК називають станцією робота (Robot Station). Як тільки станція робота синхронізується з віртуальним контролером, контури перетворюються в процедури [1].

Після задання базових точок необхідно задати параметри руху по траєкторії та простежити її на можливість виникнення колізій. Параметри руху задаються відповідними інструкціями переміщення і формуються за допомогою:

- посилання на точку;
- даних руху (тип руху, швидкість і зона);
- посилання на tooldata (інструмент);
- посилання на робочий об'єкт.

Інструкція дій – це рядок RAPID, який можна використовувати для встановлення та зміни параметрів. Інструкції дій можуть бути вставлені до, після або між цілями інструкцій за шляхом.

7. Системи координат

Система координат – це система, утворена однією або декількома координатами (числами), для визначення положення точки, геометричного елемента або його відносного положення в просторі.

Як правило, промислові роботи використовують «праву» декартову систему координат (Рис. 5), яка також широко використовується при механічній обробці на верстатах з ЧПК, а також у більшості CAD/CAM програмних пакетах.



Рис. 5 – Конфігурація декартової системи координат

7.1 Система координат точки (ТСР) центру інструмента

Система координат точки центру інструмента ТСР (tool centre point) є центральною точкою інструменту. Для багатофункціональних інструментів ТСР задають у вигляді протоколу, що може характеризувати ряд центральних точок, а також положень у просторі даного інструмента. Необхідно зауважити, що якщо ці дані для інструмента не визначені користувачем, то система керування роботом сприйматиме протокол ТСР інструмента ідентичним декартовій системі координат фланця робота. Коли робот запрограмований, він переміщує ТСР з однієї точки в іншу щоб досягти всіх базових точок траєкторії. Тому перед початком програмування робота його ТСР повинен бути визначений (Рис. 6) [1].

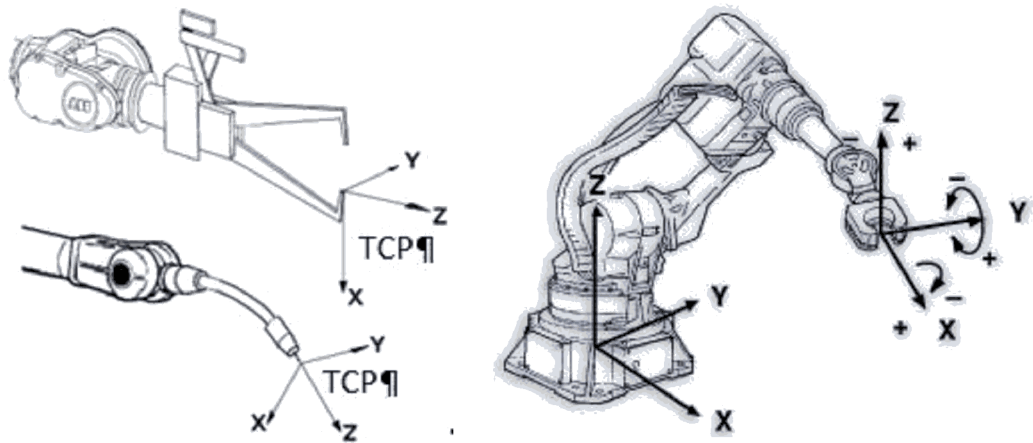


Рис. 6 – Приклади TCP для різних інструментів

7.2 Система RobotStudio® World Coordinate

Для станції робота (робототехнічного комплексу) в RobotStudio® використовують світову систему координат. Ця система координат є пов'язаною з іншими системами координат і знаходиться на верхньому рівні ієрархії [1].

Базовий фрейм «Base Frame» (BF)

Базовий фрейм (BF) є базовою системою координат, що має початок відліку на основі робота (незалежно, чи це онлайн, чи офлайн програмування).

Фрейм завдань «Task Frame» (TF)

Фрейм завдань пов'язаний зі світовою системою координат робота. Різниця між базовим фреймом та фреймом завдань представлена на рисунку 7. На першій схемі (ліворуч) фрейм завдання і базовий знаходяться в одному положенні. На іншій схемі фрейм завдання переміщено в іншу позицію.

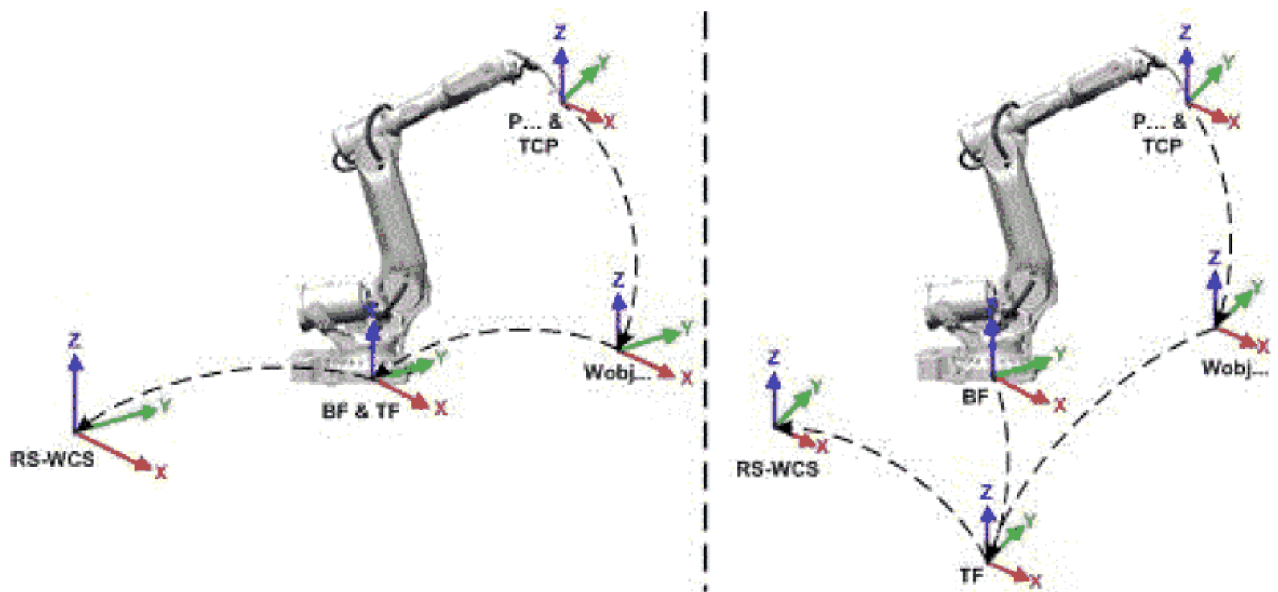


Рис. 7 – Представлення фрейму завдань

Рисунок 8 ілюструє зіставлення фрейму завдань в RobotStudio® по відношенню до системи координат робота в реальному оточенні (наприклад, у цеху) [1].

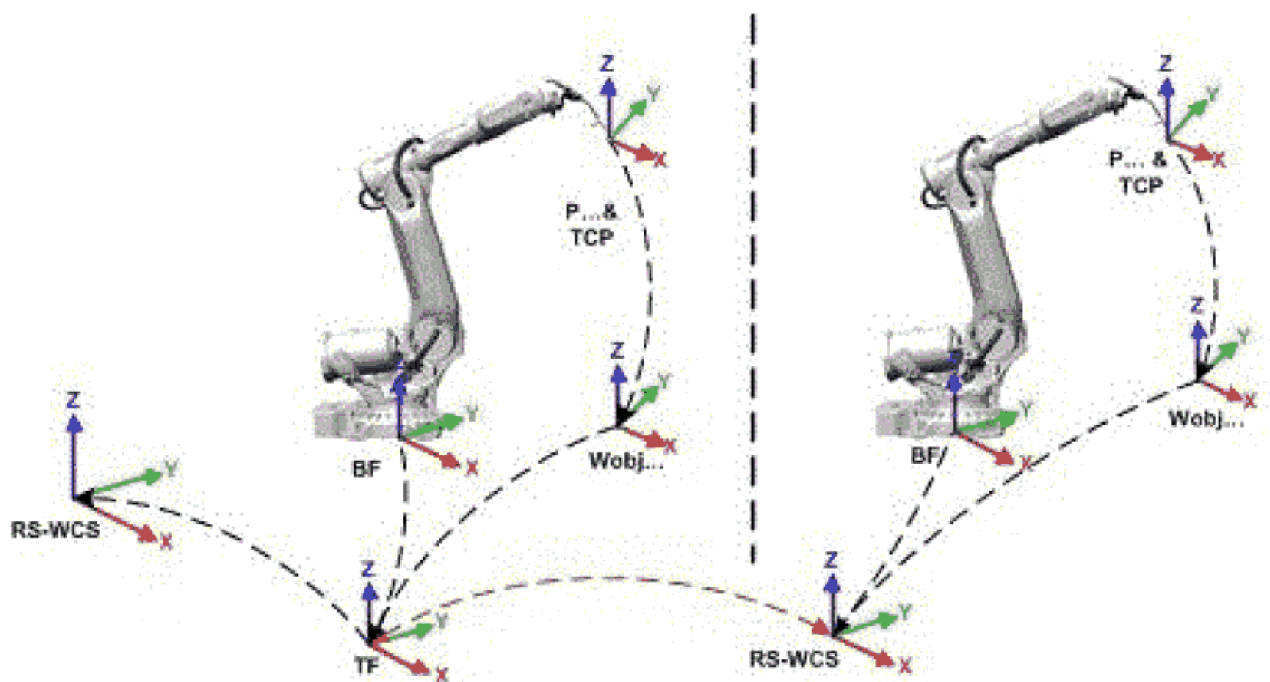


Рис. 8 – Зіставлення фрейму завдань

У таблиці 6 представлені елементи компонентів станції робота (відносно систем координат).

Таблиця 6. Елементи станції робота

RS-WCS	Світова система координат в RobotStudio®
RC-WCS	Світова система координат, визначена в роботі контролера. Вона відповідає фрейму завдань RobotStudio®
BF	Базовий фрейм робота
TCP	Точка центру інструментів
P	Базова точка траєкторії
TF	Фрейм задач
Wobj	Робочий об'єкт

7.3 Станції з кількома робототехнічними системами

У випадку єдиної робототехнічної системи (на базі кількох ПР), фрейм завдань однаковий для всіх ПР і задається в світовій системі координат. Наявність заданого фрейму при використанні декількох контролерів, дозволяє пов'язаним роботам працювати в різних системах координат. Це означає, що кожен робот може бути розташований незалежним чином, маючи власне завдання (рис. 8) [1]. Станція з кількома робототехнічними системами представлена на рисунку 9.

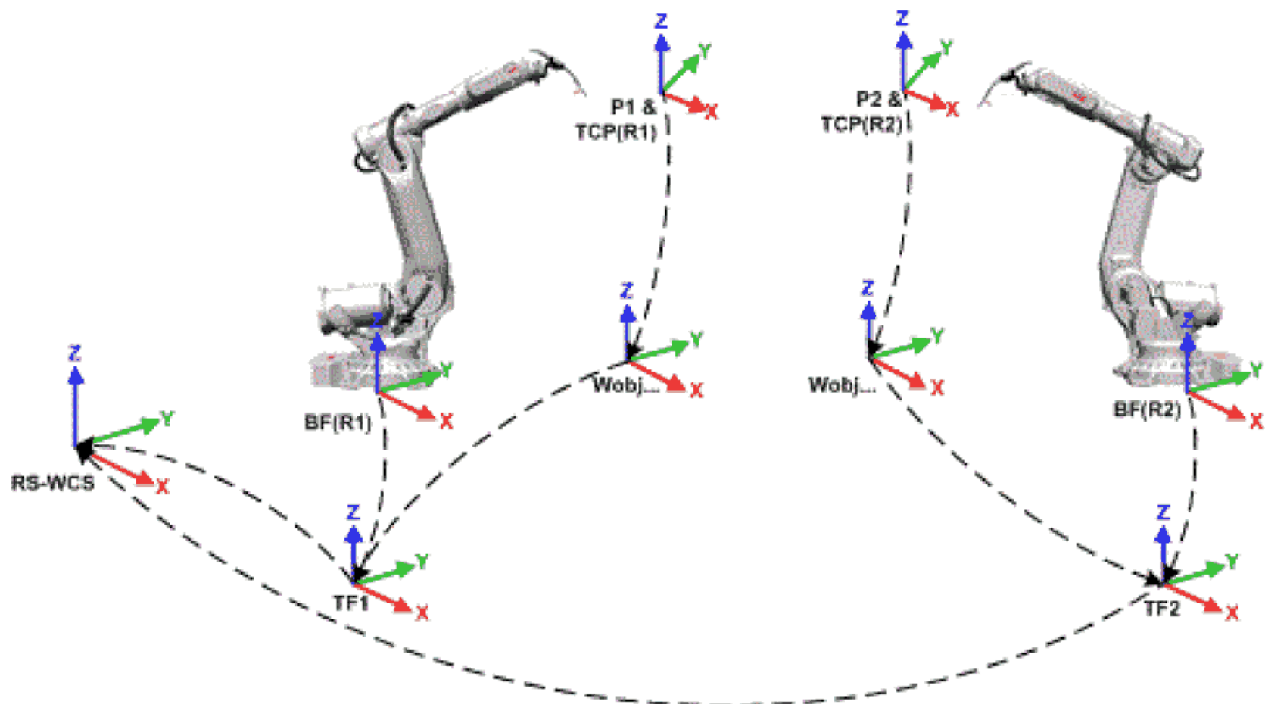


Рис. 9 – Станція з кількома робототехнічними системами

У таблиці 7 представлені елементи компонентів станції роботів (відносно систем координат).

Таблиця 7. Станції з кількома роботами

RS-WCS	Світова система координат в RobotStudio®
TCP (R1)	Точка центру інструменту робота 1
TCP (R2)	Точка центру інструменту робота 2
BF (R1)	Базовий фрейм робота 1
BF (R2)	Базовий фрейм робота 2
P (R1)	Базова точка траєкторії 1
P (R2)	Базова точка траєкторії 2
TF (R1)	Фрейм задач робототехнічної системи 1
TF (R2)	Фрейм задач робототехнічної системи 2
Wobj	Робочий об'єкт

7.4 Незалежні системи MultiMove

Існує ще один варіант програмування робототехнічної системи в RobotWare – це використання MultiMove Independent (рис. 10). При використанні MultiMove Independent роботи працюють одночасно, незалежно і керуються одним спільним контролером [1].

Наявність одного контролера та загальної світової системи координат дозволяє роботам працювати індивідуально у власній системі координат. У цьому випадку RobotStudio® надає можливість відокремити та встановити незалежні завдання для роботів (табл. 8) [1].

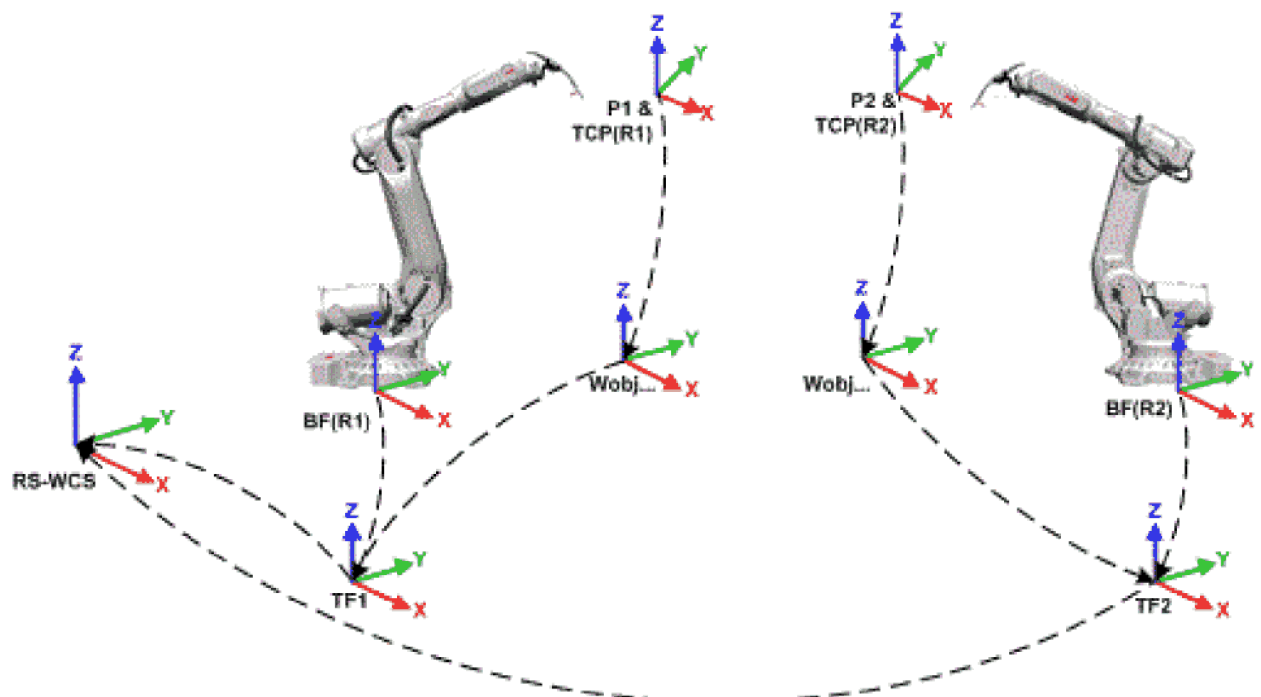


Рис. 10 – Система MultiMove Independent

Таблиця 8. Станції з кількома роботами

RS-WCS	Світова система координат в RobotStudio®
TCP (R1)	Точка центру інструменту робота 1
TCP (R2)	Точка центру інструменту робота 2
BF (R1)	Базовий фрейм робота 1
BF (R2)	Базовий фрейм робота 2
P1	Базова точка траєкторії 1
P2	Базова точка траєкторії 2
TF (R1)	Фрейм задач робототехнічної системи 1
TF (R2)	Фрейм задач робототехнічної системи 2
Wobj	Робочий об'єкт

7.5 Система координат об'єкта

Робочий об'єкт – це робочий елемент, який буде переміщений або над яким будуть проводитися технологічні операції. Він має дві системи координат: User frame і Object frame. Остання є частиною першої [1].

Якщо не визначено робочий об'єкт, запрограмовані точки траєкторії відносяться до об'єкта за замовчуванням у системі координат wobj0, що збігається з базовим фреймом робота.

Визначення власного робочого об'єкта значно полегшує налаштування програм з роботом (наприклад, при зсуві об'єкта), коли фрагмент переміщується з початкового положення. У випадку автономного програмування рішення є правильним, якщо позиції базових точок траєкторії не відповідають реальному оточенню ПР. Їх можна легко налаштовувати, особливо положення робочого об'єкта.

Коли заготовка закріплена на робочому столі, то координати робочого об'єкта не змінюються і базові точки легко задаються з врахування нульової точки системи координат даного об'єкта.

На рисунку 11 система координат, позначена сірими лініями, відповідає світовій системі. Системи координат, позначені чорними лініями, відповідають фрейму користувача робочого об'єкта та фрейму об'єкта. Тут користувацький кадр розташовується на робочому столі або спеціальному оснащенні із позиціями для утримання заготовок (касета).

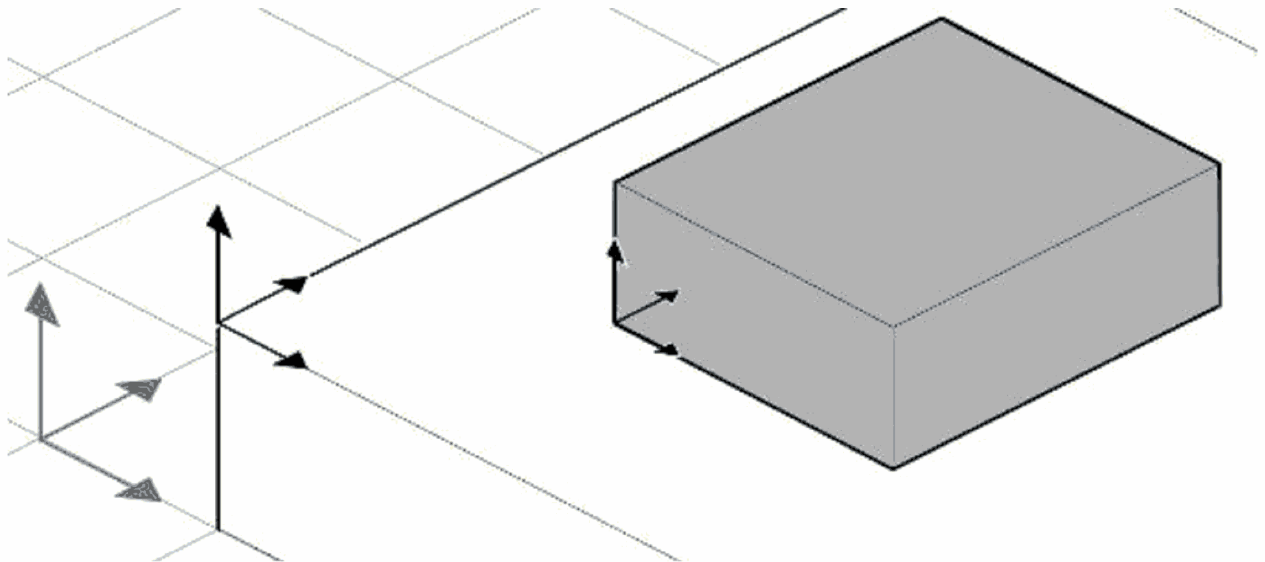


Рис. 11 – Система робочих об'єктів (wobj)

8. Конфігурації осей роботів

Конфігурація осі – це характеристика робота, що визначає спосіб досягнення базової точки. Коли базова точка зберігається, дія виконується відносно до системи координат робочого об'єкта. Для досягнення певної точки контролер обчислює положення осі робота та знаходить альтернативні способи її досягнення. Для однієї точки можуть існувати різні можливі конфігурації (рис. 12). Правильна конфігурація визначається значенням, що представляє собою квадрант, в якому кожна вісь повинна бути розташована.

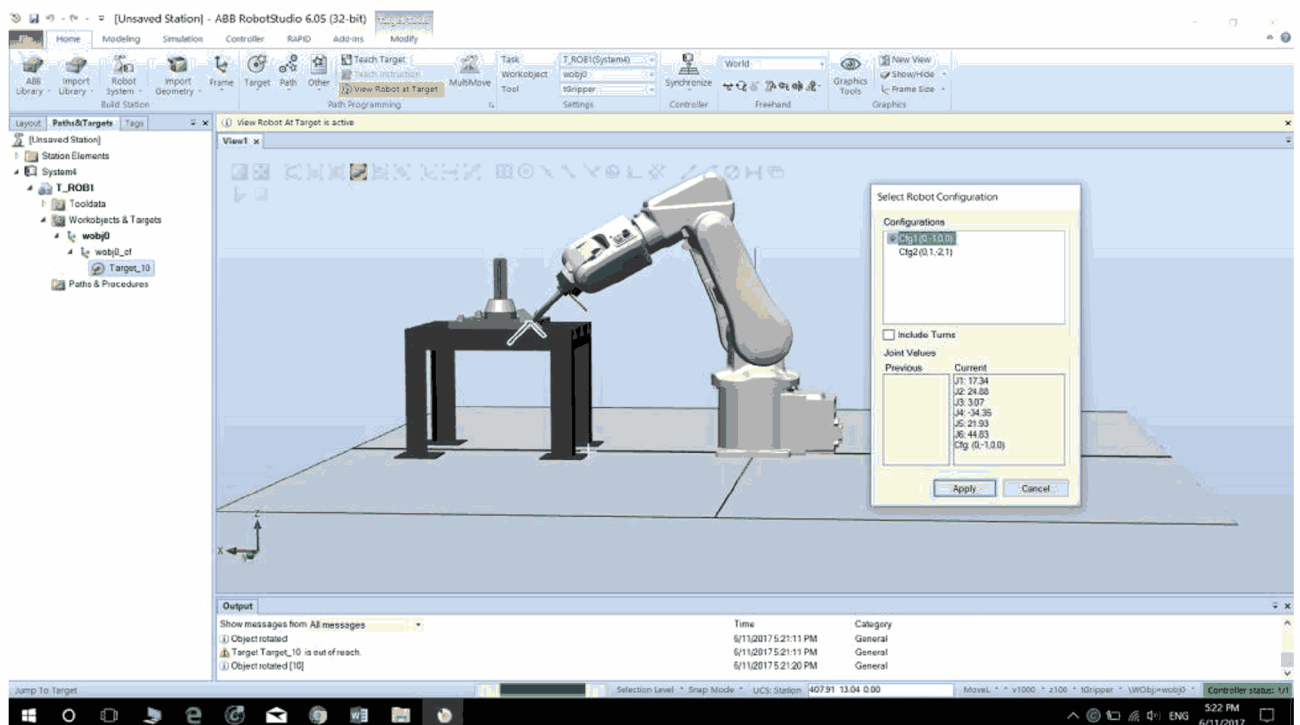


Рис. 12 – Вибір потрібної конфігурації робота серед можливих

Зберігання конфігурацій осі в базових точках

Як тільки конфігурація була вибрана, вона зберігається для цієї базової точки. Після збереження значення за замовчуванням замінюється на правильну конфігурацію.

Загальні проблеми, пов'язані з конфігураціями осей робота

Під час задання конфігурацій часто виникають колізії, що унеможливають відпрацювання необхідної траєкторії.

У деяких випадках базові точки траєкторії мають перевірені конфігурації, але при симуляції траєкторії можуть теж виникнути помилки. Наприклад, робот не може переміщатися від однієї точки до іншої у зв'язку з тим, що кут повертання однієї з кінематичних ланок може перевищувати 90 градусів у випадку лінійних рухів. Також це можливо у випадку рухомих цілей, навіть якщо базові точки зберігають свої конфігурації.

Типові вирішення проблем з конфігуруванням

Проблема, описана вище, може бути вирішена, якщо кожній конфігурації (Рис. 13) присвоєна та перевірена базова точка, коли робот рухається по траєкторії. Іншим рішенням є вимкнення моніторингу конфігурації. У цьому випадку конфігурація виконується автоматично. Якщо це не зроблено правильно, є можливість отримати несподівані результати.

Інше рішення полягає в тому, щоб змінити розташування деталі, переорієнтувати точки або додати зовнішню вісь, що дозволяє замінити орієнтацію заготовки або робота, збільшуючи доступність.

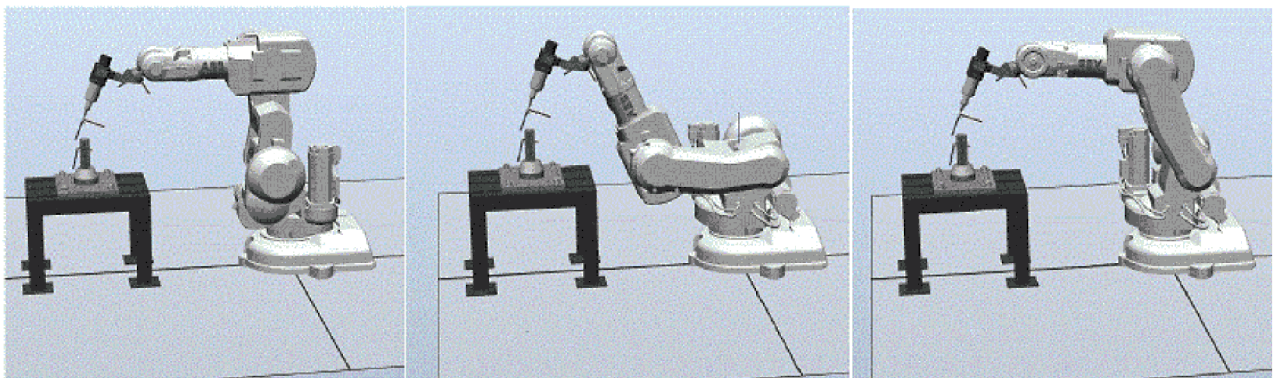


Рис. 13 – Різні конфігурації для однієї точки

Способи позначення конфігурацій (quaternions)

Конфігурації осі роботів позначаються кватерніонами. Кватерніон – вектор з чотирьох елементів, який може бути використаний для кодування будь-якого обертання в трьохвимірній системі координат. Технічно кватерніон складається з одного реального елемента і трьох складних елементів, і його

можна використовувати набагато легше, ніж обертання по осях.

Загальне визначення кватерніону наступне:

$$Q=a+b*i+c*j+d*k=[a \ b \ c \ d] \quad (1)$$

Для представлення кватерніонів (рис. 14) розглянемо вектор $\vec{V}$, визначений 3-ма скалярами (V_x , V_y і V_z) і кутом θ повороту навколо V^* .

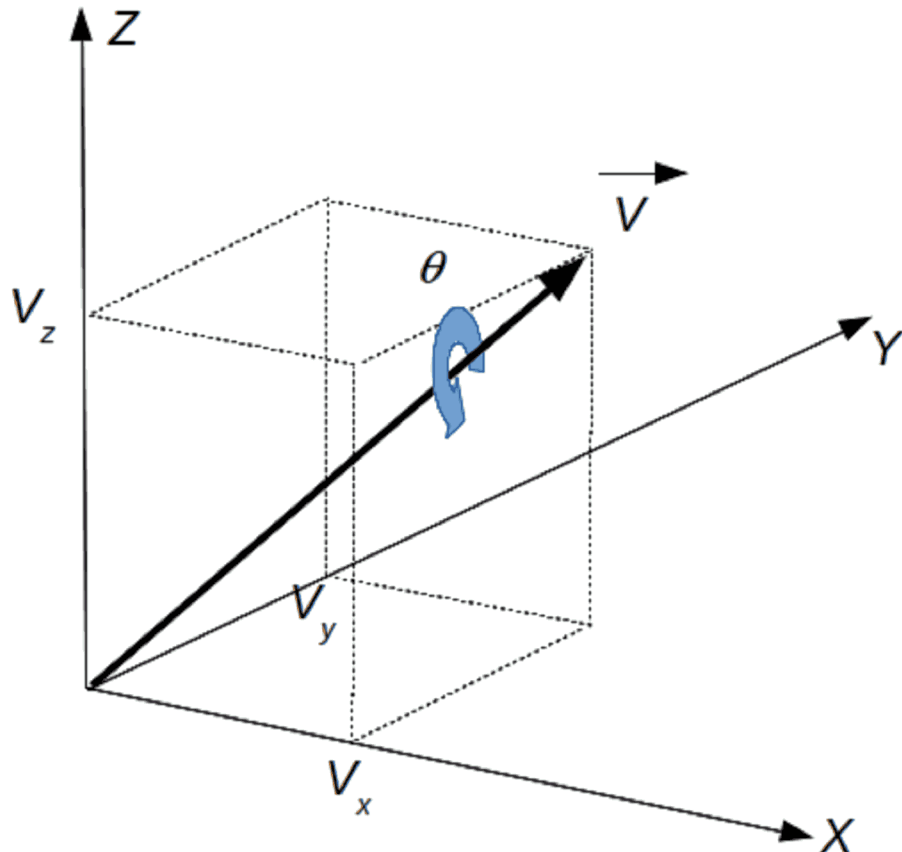


Рис. 14 – Обертання твердих тіл з використанням кватерніонів

Кватерніон, пов'язаний з цим перетворенням, задається формулою (2):

$$Q=[\cos\theta/2-V_x\sin\theta/2-V_y\sin\theta/2-V_z\sin\theta/2] \quad (2)$$

Обертання навколо осей:

Виходячи з формули 2, можна обчислити кватерніон, що визначає обертання навколо кожної осі:

Обертання навколо X (3)

$$Q_x=[\cos\theta/2 \ -V_x\sin\theta/2 \ 0 \ 0] \quad (3)$$

Обертання навколо Y (4)

$$Q_y=[\cos\theta/2 \ 0 \ -\sin\theta/2 \ 0] \quad (4)$$

Обертання навколо Z (5)

$$Q_z=[\cos\theta/2 \ 0 \ 0 \ -\sin\theta/2] \quad (5)$$

Таким чином конфігурації осі робота АВВ позначаються кватерніонами, тобто серією з чотирьох цілих чисел, що вказує, в якому квадранті знаходяться осі повного обертання. Квадранти нумеруються від нуля до позитивного (обертання проти годинникової стрілки) і від -1 для негативного (обертання за годинниковою стрілкою).

Для лінійної осі ціле число визначає діапазон (у метрах) від нейтрального положення, в якому розташована вісь.

Конфігурація шестивісного промислового робота (наприклад IRB 140) може виглядати так:

[0 -1 2 1]

- Перше ціле число (0) визначає положення осі 1: у першому позитивному квадранті (від 0 до 90 градусів).
- Друге ціле число (-1) визначає положення осі 4: у першому негативному квадранті (обертання від 0 до -90 градусів).
- Третє ціле число (2) визначає положення осі 6: у третьому позитивному квадранті (між 180 і 270 градусами).
- Четверте ціле число (1) визначає положення осі x: віртуальну вісь, що використовується для визначення центру кисті по відношенню до інших осей.

Моніторинг конфігурації

Під час виконання програми робота ви можете вибрати чи слід контролювати значення конфігурації. Якщо моніторинг конфігурації вимкнено, значення конфігурації, збережені з цілями, ігноруються і робот використовуватиме конфігурацію, найближчу до поточної конфігурації для досягнення точки. Якщо цей параметр увімкнено, для досягнення цілей використовується лише вказана конфігурація.

Моніторинг конфігурації можна вимкнути і увімкнути для спільних і лінійних рухів незалежно та контролювати їх інструкціями дії ConfJ і ConfL.

Вимкнення контролю конфігурації

Запуск програми без моніторингу конфігурації може призвести до різних колізій кожного разу, коли виконується цикл. Наприклад, коли робот повертається до початкового положення після завершення циклу, він може вибрати іншу конфігурацію, ніж задана.

Для програм з лінійними інструкціями переміщення може статися ситуація, коли робот стає все ближче до своїх меж, і в результаті не зможе досягти кінцевої точки.

Для програм зі спільними інструкціями, переміщення може викликати непередбачувані рухи.

Увімкнення моніторингу конфігурації

Запуск програми з моніторингом конфігурації змушує робота використовувати конфігурації, що збережені в базових точках. Це призводить до передбачуваних циклів і передбачуваних рухів. Проте, в деяких ситуаціях, наприклад, коли робот переміщується до точки з невідомої позиції, за допомогою моніторингу конфігурації може обмежуватися доступність робота.

При програмуванні в автономному режимі необхідно призначити конфігурацію кожній базовій точці, якщо програма використовує моніторинг конфігурацій.

Бібліотеки, геометрії та файли САПР

Для того, щоб програмувати або імітувати технологічні процеси в RobotStudio®, потрібні моделі САПР для створення справжньої роботизованої комірки. Ці моделі можна імпортувати з бібліотек або геометрій, які існують у RobotStudio®, або їх можна імпортувати як геометрії з інших програмних середовищ. Інший варіант – створити їх у RobotStudio®.

Різниця між геометріями та бібліотеками

Імпортовані об'єкти можуть бути бібліотеками (об'єкти, збережені в RobotStudio® як зовнішні файли) або геометріями (файли CAD, які після імпорту копіюються в станцію RobotStudio®). Під час імпорту бібліотеки в RobotStudio® створюється посилання між станцією і файлом бібліотеки. Проте, якщо імпортувати геометрію в станцію RobotStudio®, то посилання буде створюватися напрямку. Наприклад, якщо інструмент зберігається як бібліотека, дані інструменту зберігаються разом з даними CAD.

Як будуються геометрії

Імпортовані геометрії – це тіло, яке називається Part (частина), і яке можна побачити у браузері Layout. З вкладки «Моделювання» кожен компонент, який утворює частину, можна побачити навіть якщо він є твердотільним, представлений поверхнею, або є криволінійним.

У випадку твердих тіл мова йде про 3D-об'єкти, реалізовані в просторовій системі координат. Поверхня – це 2D-об'єкт, утворений тільки в одній площині, а криволінійне тіло утворене будь-якими дочірніми елементами.

Вкладка «Моделювання» дає можливість редагувати частини за допомогою таких команд, як додавання, видалення непотрібних тіл, переміщення, переставлення або створення нових тіл, що будуть згруповані вкінці.

Імпорт і перетворення файлів CAD

Для імпортування геометрії з окремих файлів CAD використовується функція імпорту RobotStudio®.

RobotStudio® зберігає асемблерні структури в імпортованій частині САПР. Для частин з багатьма об'єктами імпорт може тривати довго. Щоб усунути цю проблему, на вкладці «Головна» натисніть «Імпортувати геометрію», а потім виберіть «Перетворити геометрію САПР на одну частину».

Підтримувані формати 3D

Рідний 3D-формат RobotStudio® – це ACIS. RobotStudio® містить ACIS R25SP2, який підтримує більш пізні версії форматів CAD. RobotStudio® також підтримує інші формати, для яких потрібна зміна. Наступна таблиця показує підтримувані формати та відповідні параметри (табл. 9).

Таблиця 9. Підтримувані формати RobotStudio®

Формат	Розширення файлу	Необхідний варіант
3DStudio	3ds	-
3DXML, reads version v4.3	.3dxml	CATIA V5
ACIS, reads versions R1 - R25, writes versions V6, R10, R18 - R25	sat	-
CATIA V4, reads versions 4.1.9 to 4.2.4	model, exp	CATIA V4
CATIA V5/V6, reads versions R8 – R25 (V5 – 6 R2015), writes R16 – R25 (V5 – V6 R2015)	CATPart, CATProduct, .CGR	CATIA V5
COLLADA 1.4.1	dae	-
DXF/DWG, reads versions 2.5 - 2014	.dxf, .dwg	AutoCAD
IGES, reads up to version 5.3, writes version 5.3	igs, iges	IGES
Inventor, reads V6	ipt	Inventor

– V2015		
JT, reads versions 8.0 - 9.5	.jt	JT
NX, reads versions 11 – NX 10	.prt	NT
OBJ	obj	-
Parasolid, reads versions 9.0.* – 27.0.*	.x_t, .xmt_txt, .x_b, .xmt_bin	Parasolid
Pro/E / Creo, reads versions 16 – Creo 3.0	prt, asm	Pro/ENGINEER
Solid Edge, reads versions V18 – ST7	.par, .asm, .psm	SolidEdge
SolidWorks, reads versions V18 – ST7	sldprt, .sldasm	SolidWorks
STEP, reads versions AP203 and AP214 (geometry only), writes version AP214	stp, step, p21	STEP
STL, ASCII STL supported (binary STL not supported)	stl	-
VDA-FS, reads 1.0 and 2.0, writes 2.0	Vda, vdafs	VDA-FS
VRML, reads VRML2 (VRML1 not supported)	wrl, vrml, vrml2	-

9. Створення робочої станції в RobotStudio®

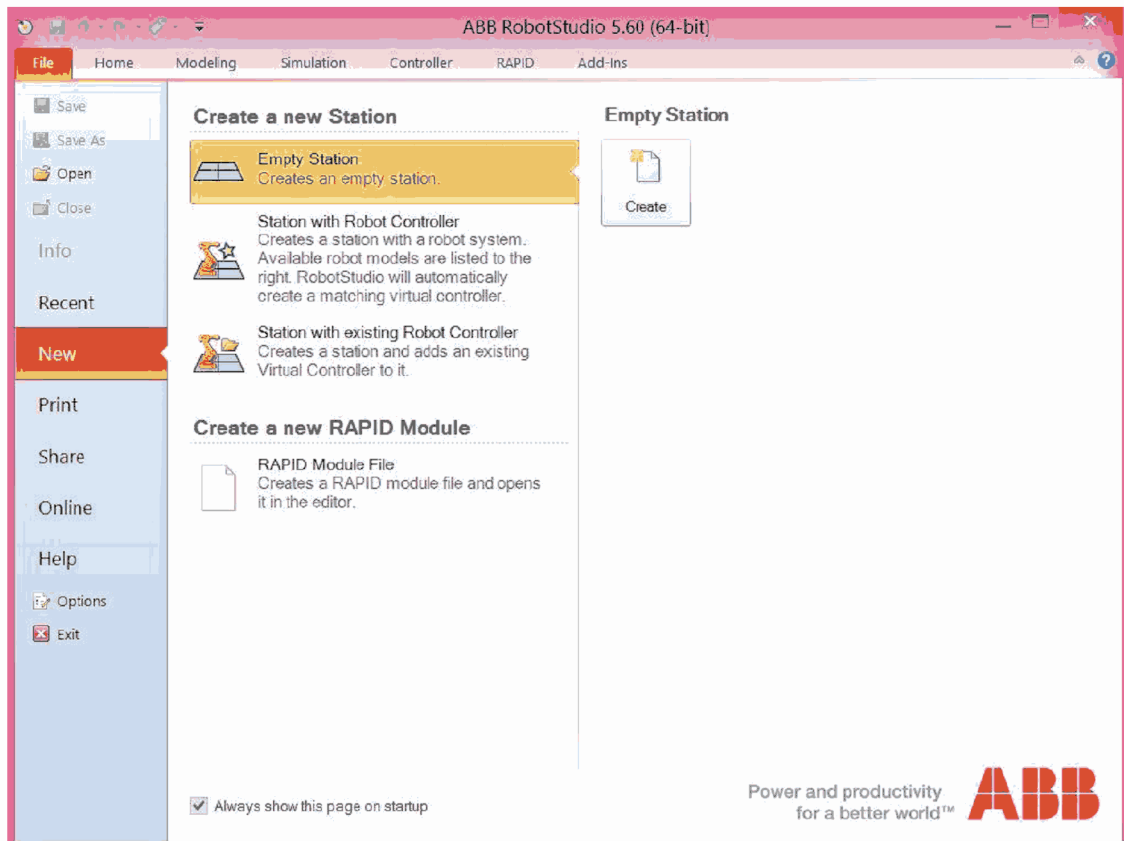


Рис. 15 – RobotStudio® – стартове вікно

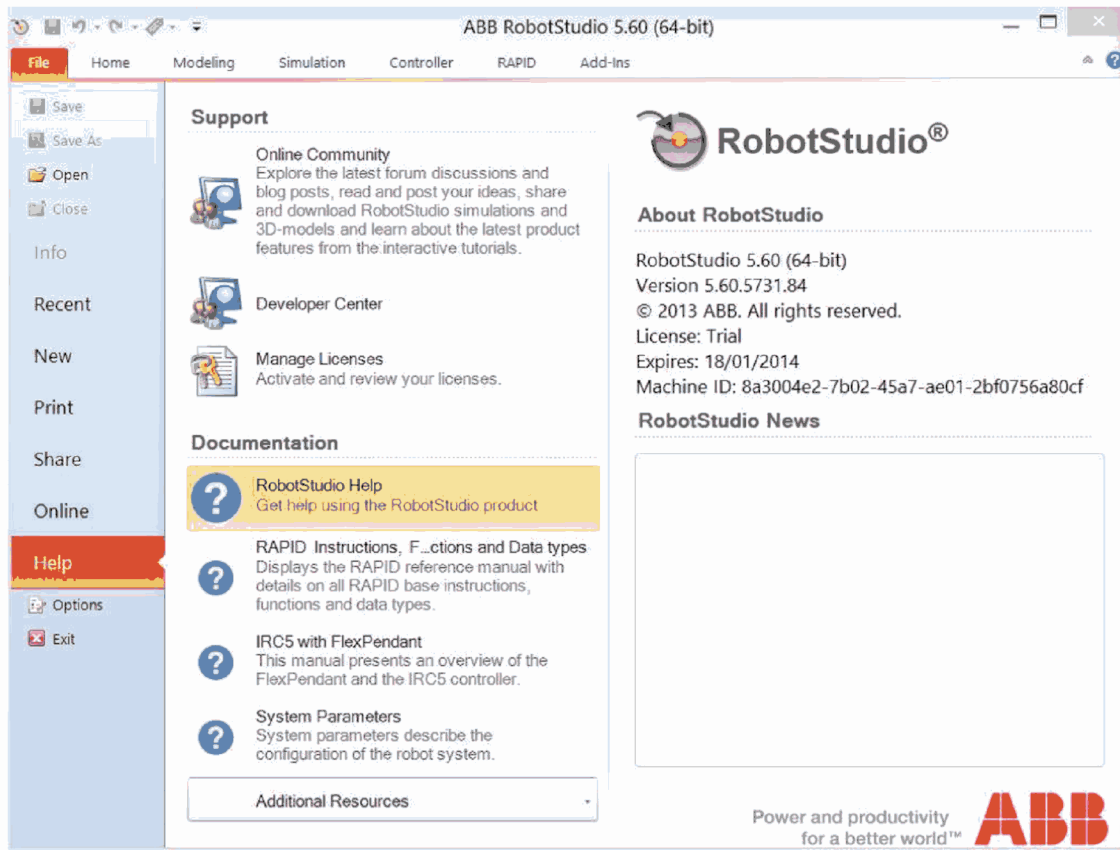


Рис. 16 – RobotStudio® – опція Довідки

На рисунку 14 представлено вікно, яке з'явиться після запуску ABB RobotStudio®. Це вікно дає можливість вибрати опції «Відкрити» або «Створити» нову станцію. Також у цьому вікні є опція «Довідка», яка надає всю необхідну інформацію про версію RobotStudio® 5.60, мову RAPID та пульт ABB для навчання (FlexPendant) (рис. 15).

З початкового вікна, використовуючи опцію «Нова», можна створити порожню станцію. Ця станція містить тільки робочу площину з опорною системою (світовою системою координат). Тому потрібно додати до станції промисловий робот. Далі необхідно перейти до бібліотеки ABB (рис. 17) і вибрати потрібного робота (маніпулятора).

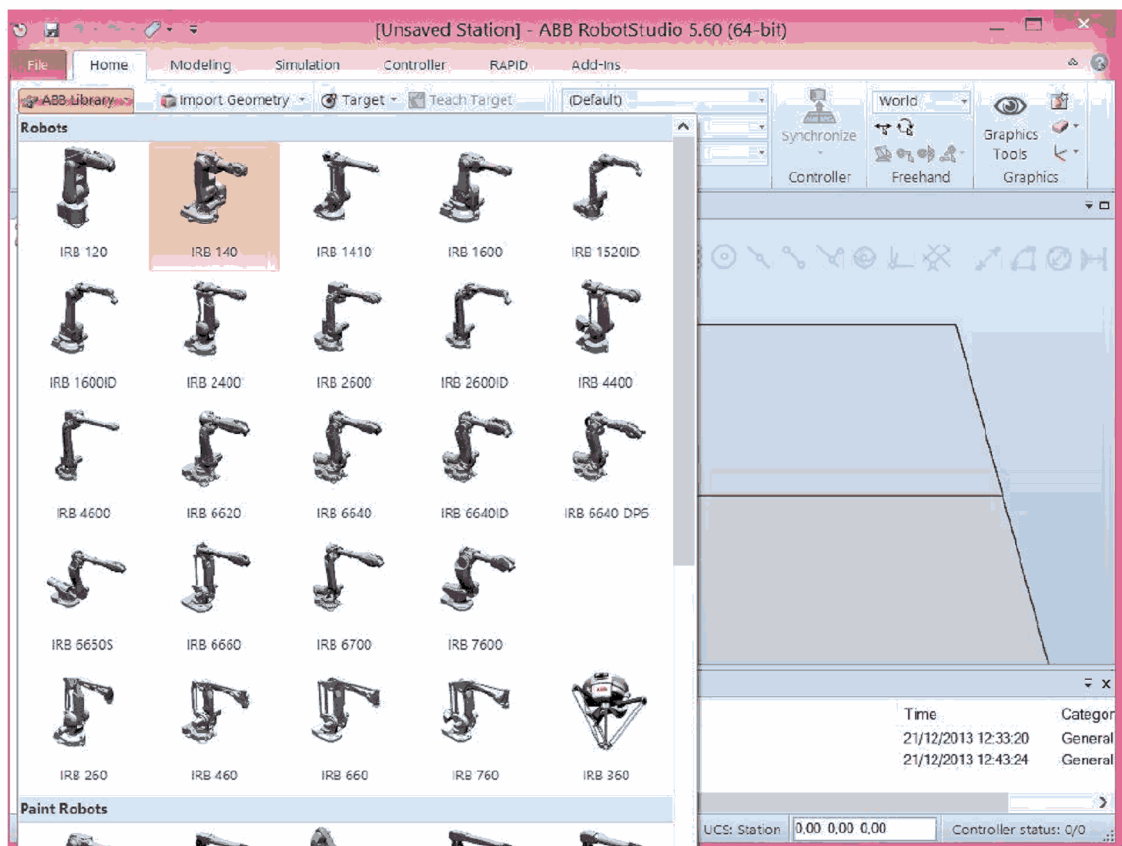


Рис. 17 – Бібліотека ABB RobotStudio®

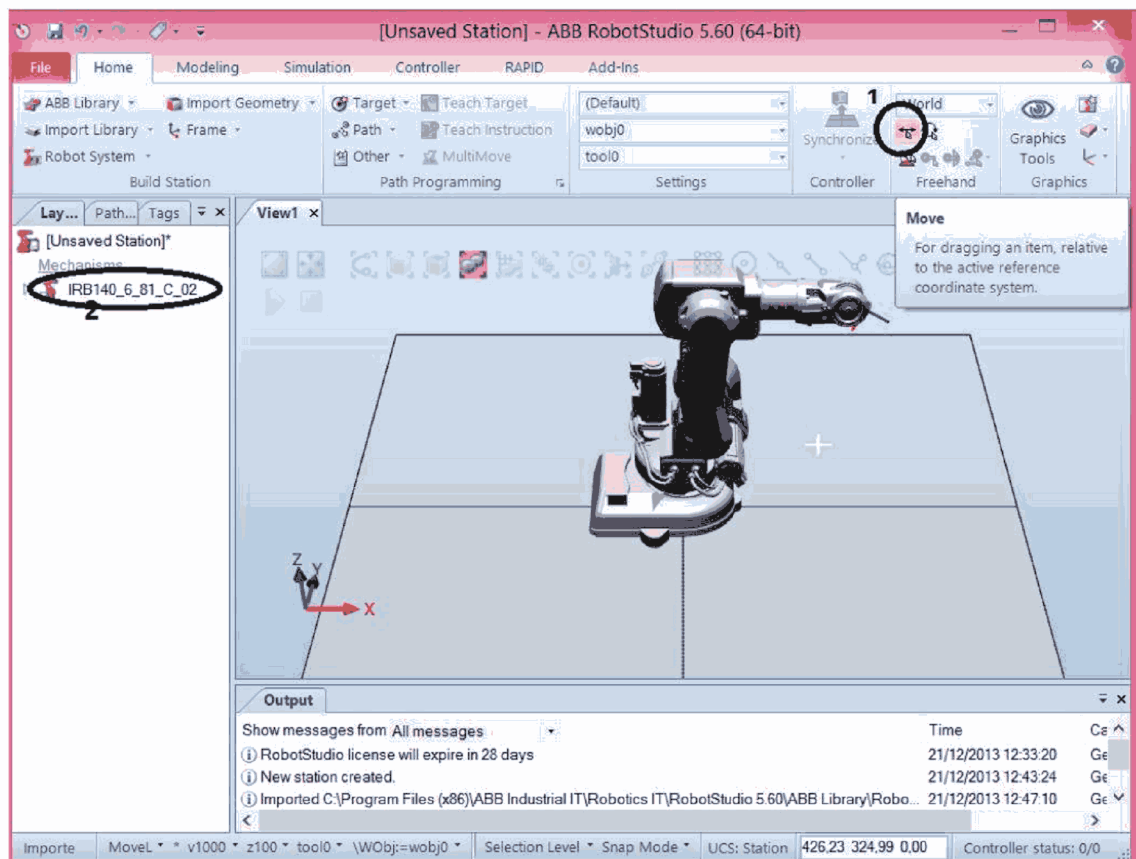


Рис. 18 – Опція «Перемістити робота»

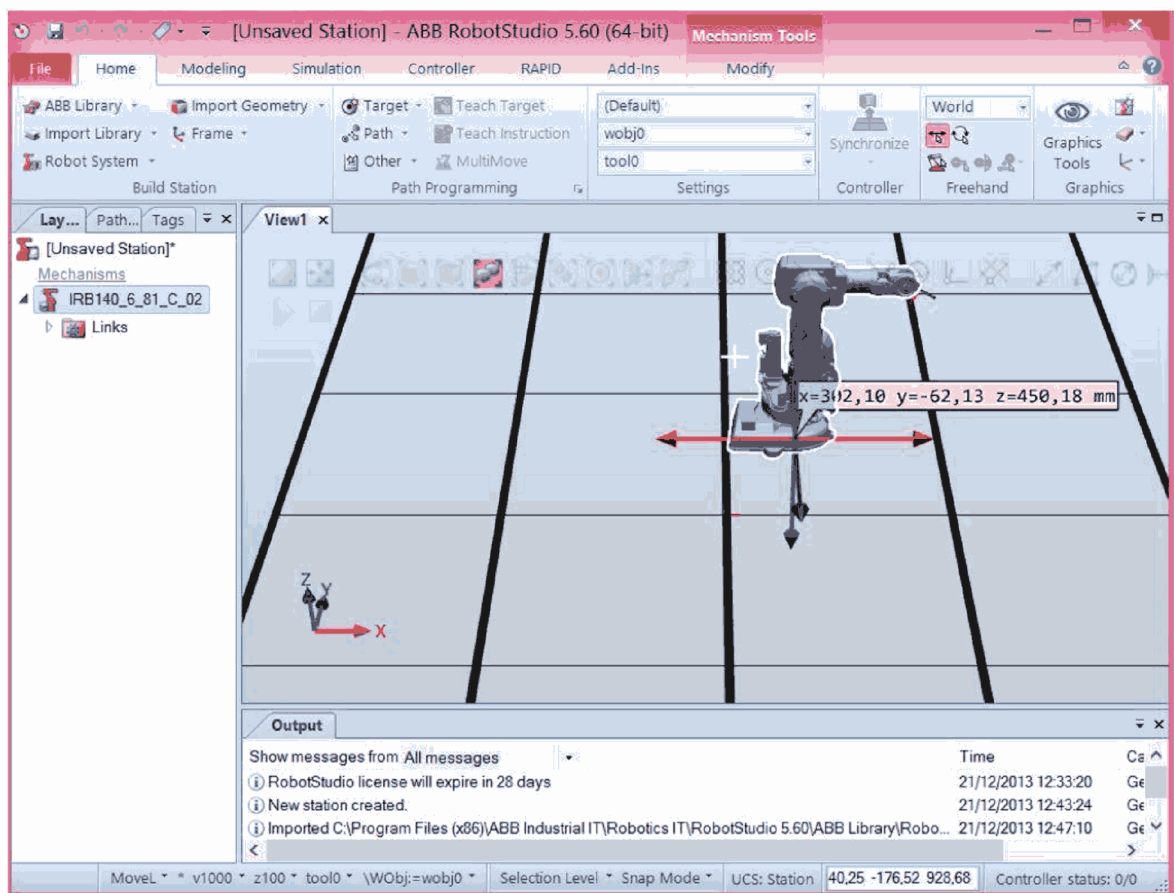


Рис. 19 – Варіант переміщення робота (зміна позиції)

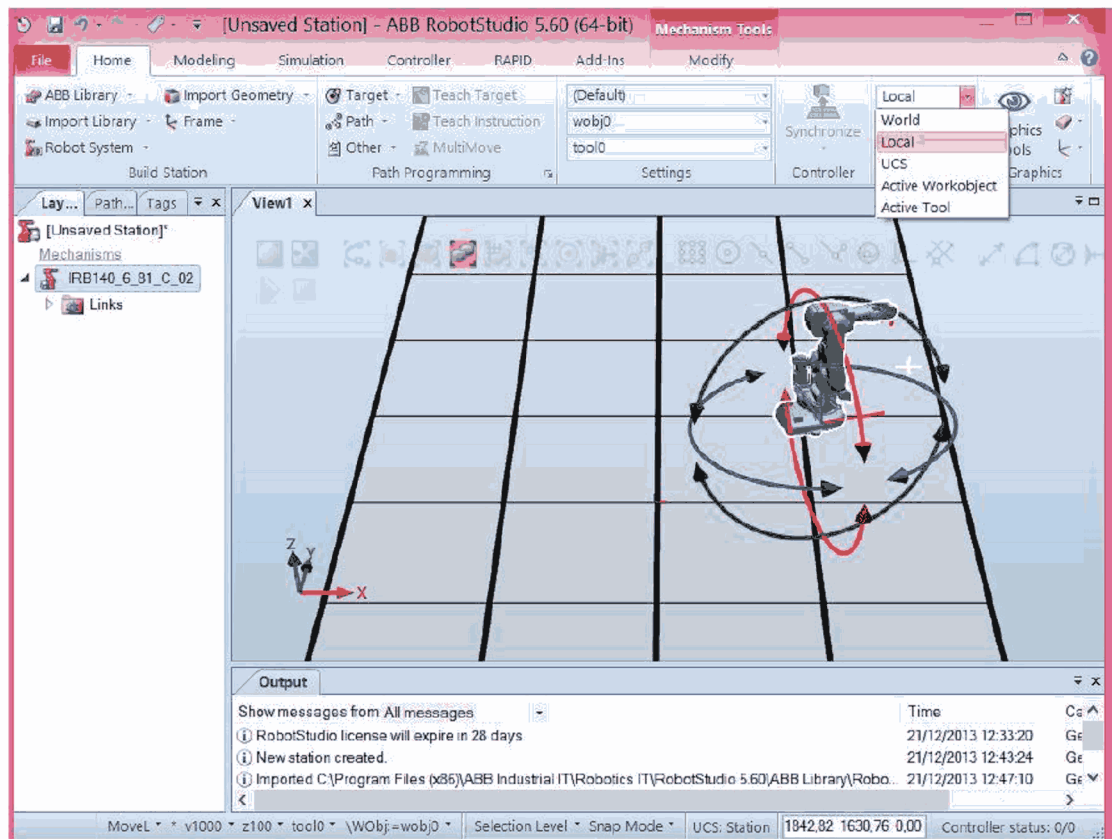


Рис. 20 – Варіант переміщення робота (зміна орієнтації)

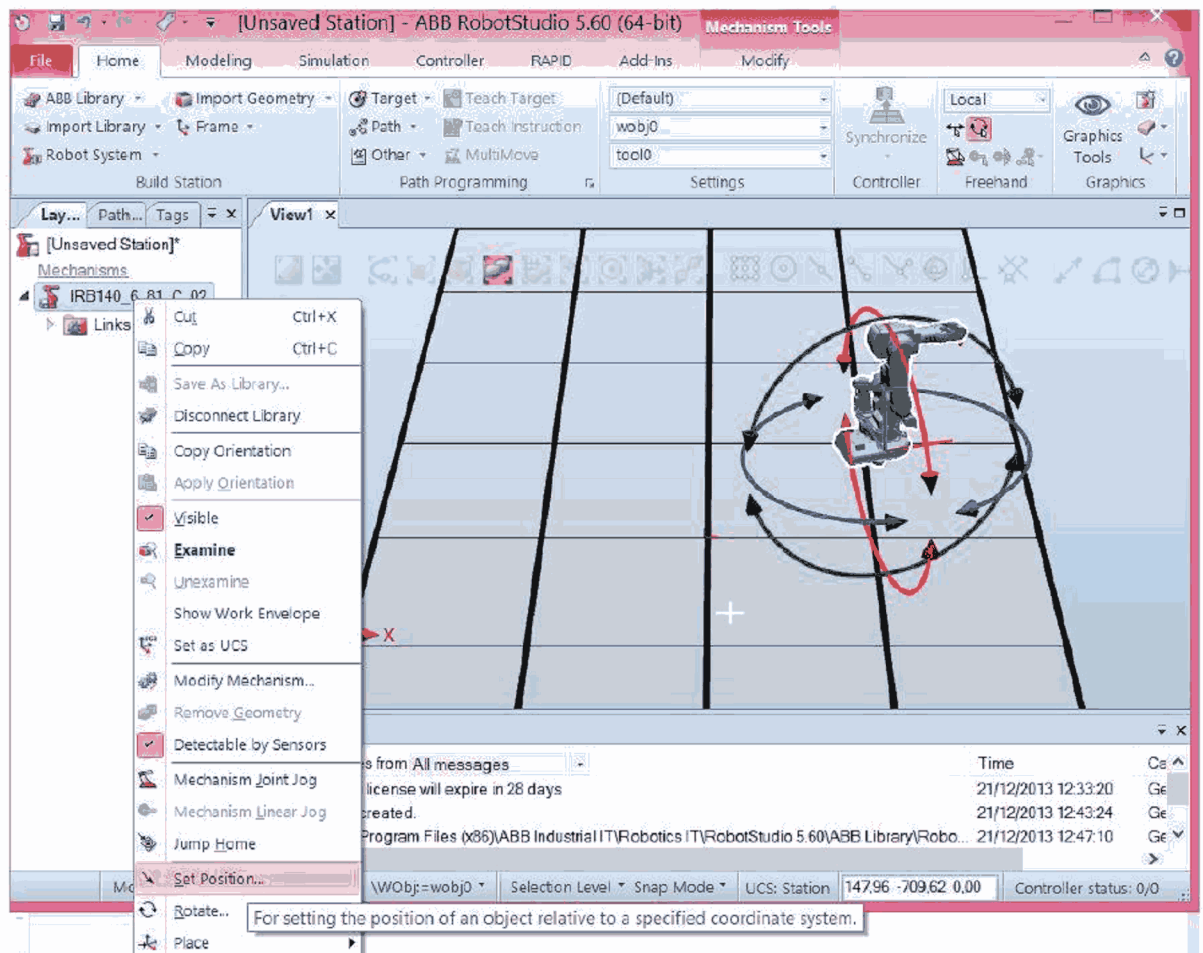


Рис. 21 – Опція точне пересування робота

Тепер можна змінювати позицію та орієнтацію робота в робочому просторі. Крім того, можна змінити кут «з'єднання» кожного робота. Для цього необхідно натиснути на моделі робота (рис. 18, виділена область зліва), і далі, натиснувши на кнопку переміщення (виділену на рис. 19), ми можемо перемістити основу робота за допомогою миші (див. рисунок 20).

На рисунку 21 можна побачити наскільки точно можна задати розташування промислового робота, а на наступному рисунку (рис. 22) – спостерігати результат цього руху.

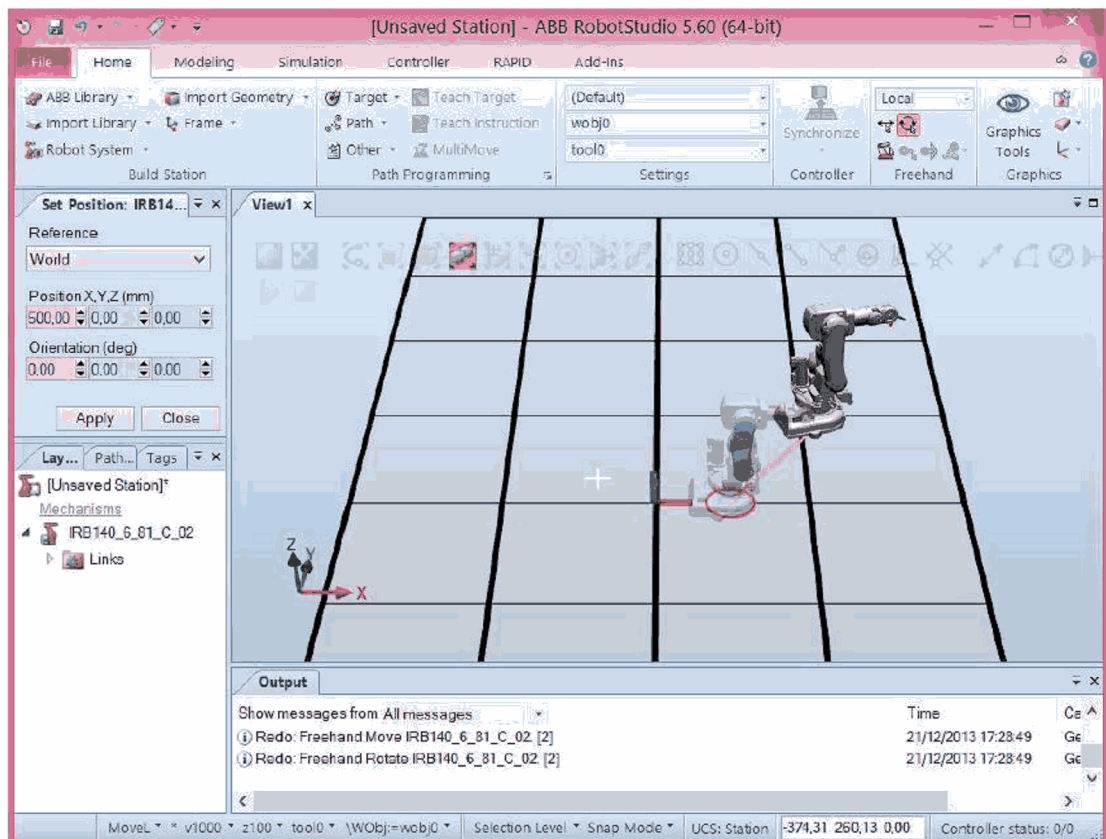


Рис. 22 – Опція точного переміщення робота (результат)

Змінити масштаб робочого середовища можна за допомогою колесика миші.

Натискаючи клавішу CTRL та ліву кнопку миші, можна перемістити сцену.

Натискаючи клавіші CTRL і SHIFT та ліву кнопку миші, можна повернути сцену.

Для зміни кутів ланок робота (рис. 23) необхідно натиснути праву кнопку миші на моделі робота (вкладка «Layout») та вибрати «Mechanism Joint Jog».

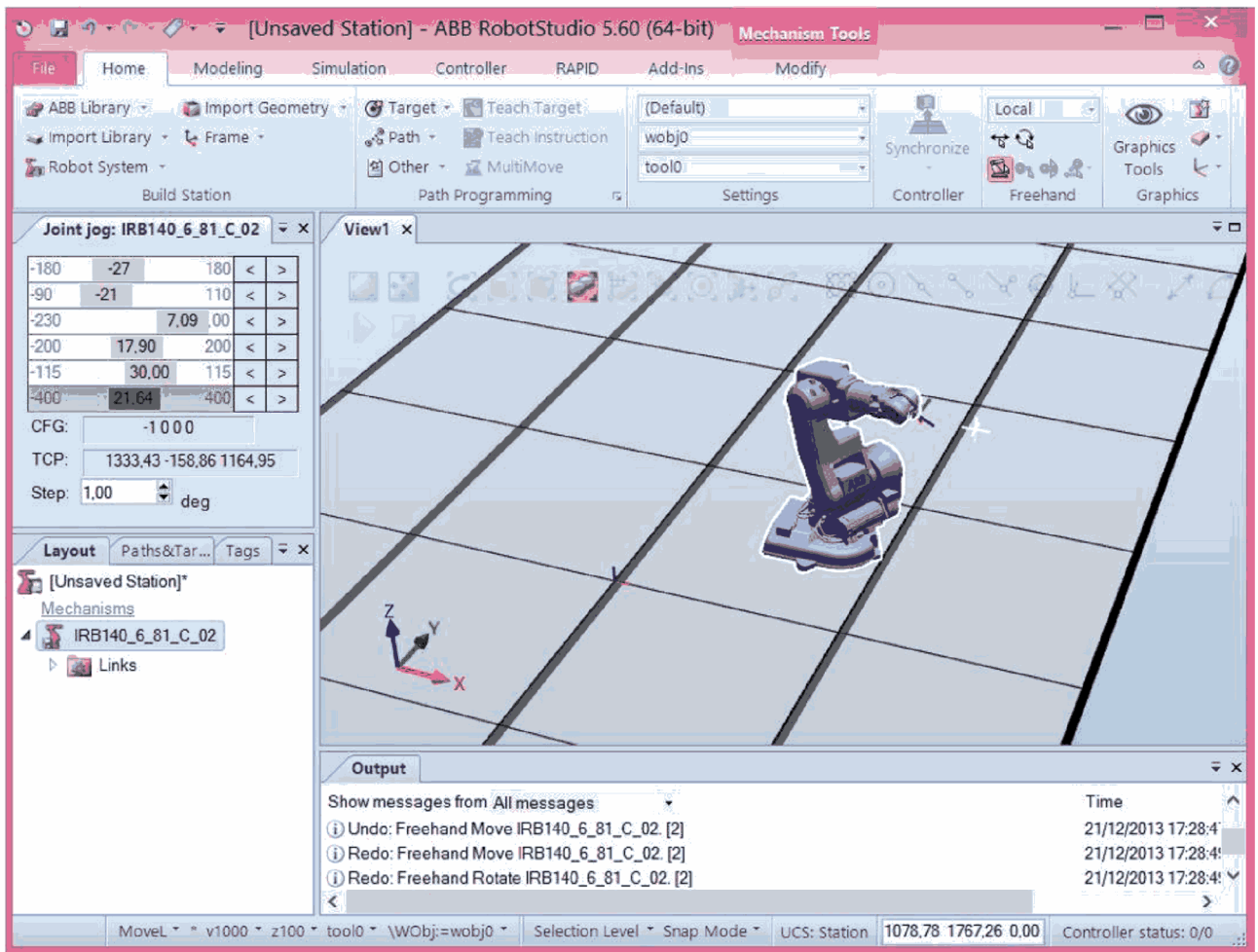


Рис. 23 – Спільний простір робота

Програмування робота в RobotStudio®.

Для переміщення робота в RobotStudio® його необхідно запрограмувати. Для програмування робота необхідно вибрати відповідний контролер, що контролюватиме його рухи. При імпорті робота з бібліотеки, контролер відсутній і робот існує лише як об'єкт.

Щоб імпортувати контролер у систему необхідно натиснути кнопку головного меню з системи роботів. З цього списку вибирається параметр «Layout». Графічний вигляд цих кроків можна побачити на рисунку 24.

Можна вибрати кілька параметрів для контролера, але, на даний момент, конфігурація за замовчуванням вважається допустимою. Для цього необхідно натискати «Next» і в кінці «Finish». Застосування вибраних параметрів може зайняти деякий час до отримання зеленого сигналу (рис. 25).

Якщо 3 кнопки, виділені на рисунку 26, є активними (рис. 27), віртуальний контролер готовий застосувати рух для робота.

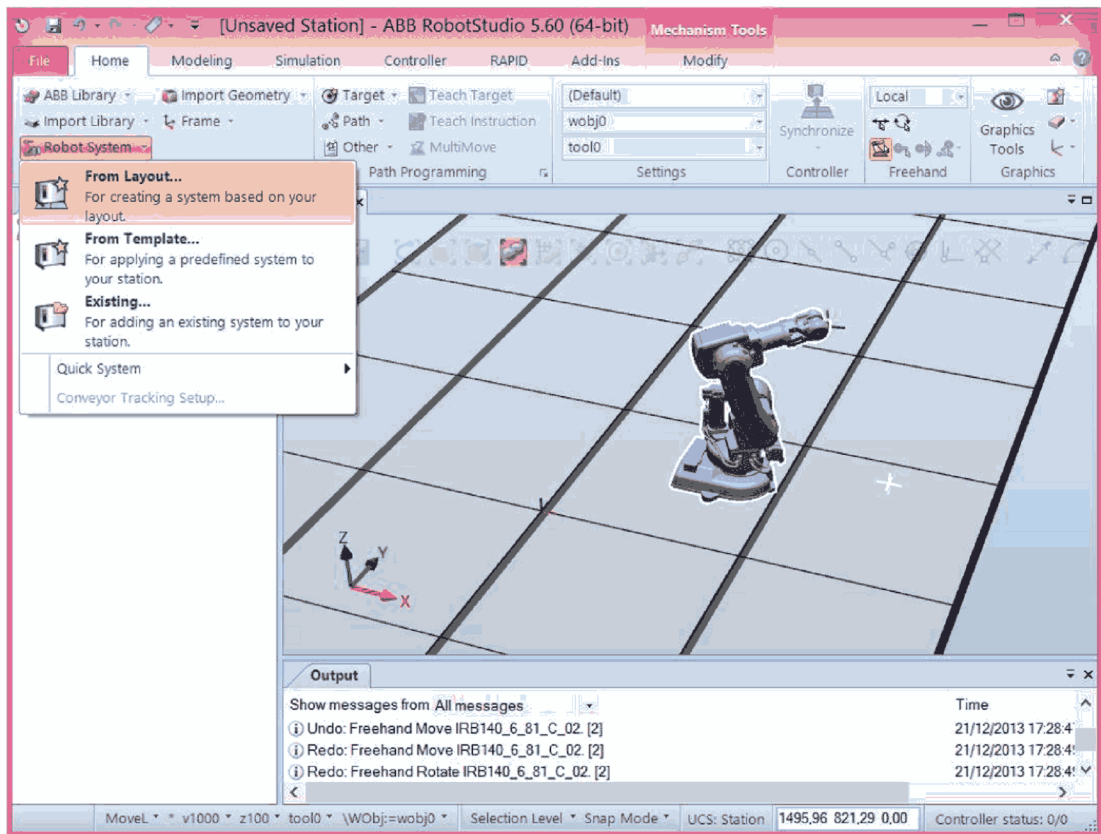


Рис. 24 – Меню «Layout»

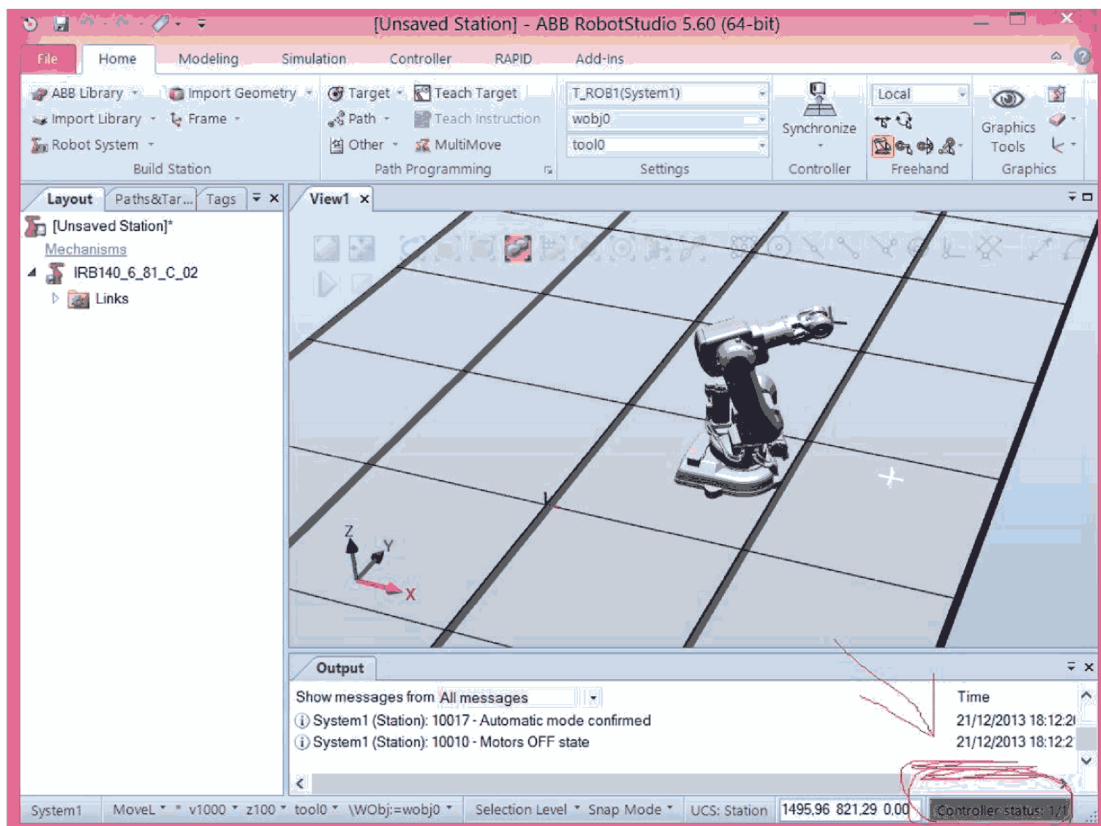


Рис. 25 – Готовність контролера робота

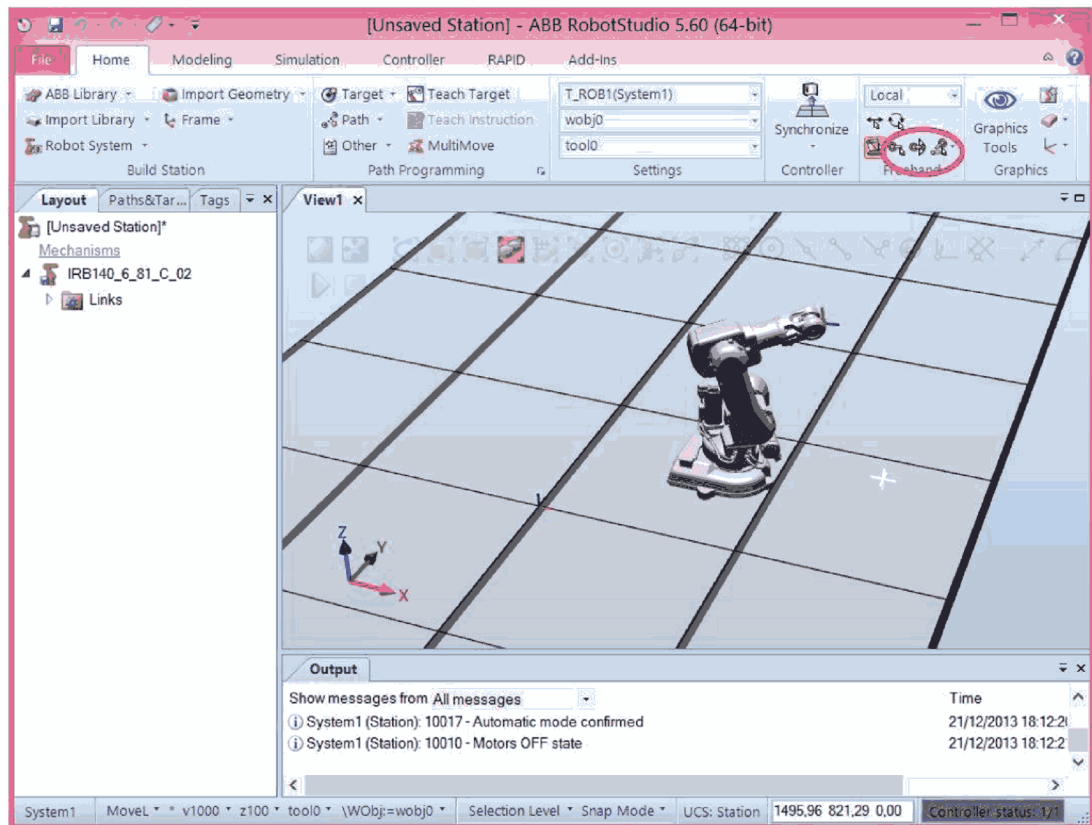


Рис. 26 – Кнопки переміщення активні

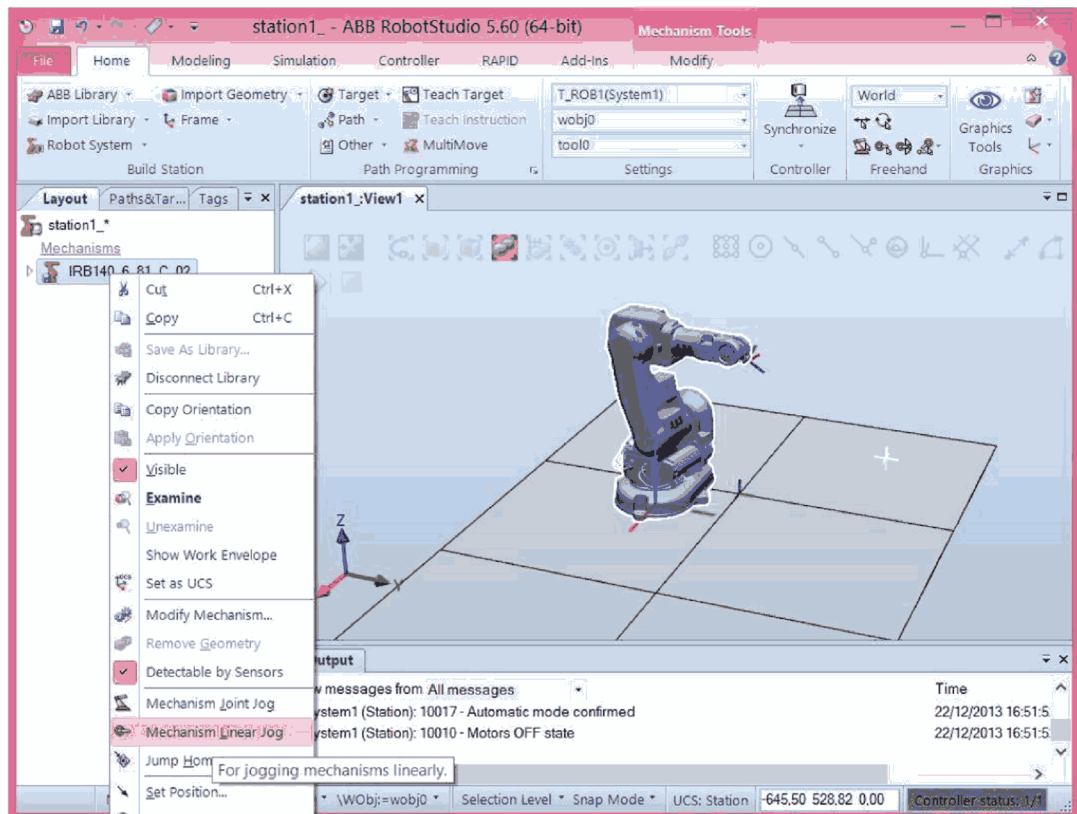


Рис. 27 – Ще один спосіб реалізувати рух роботів

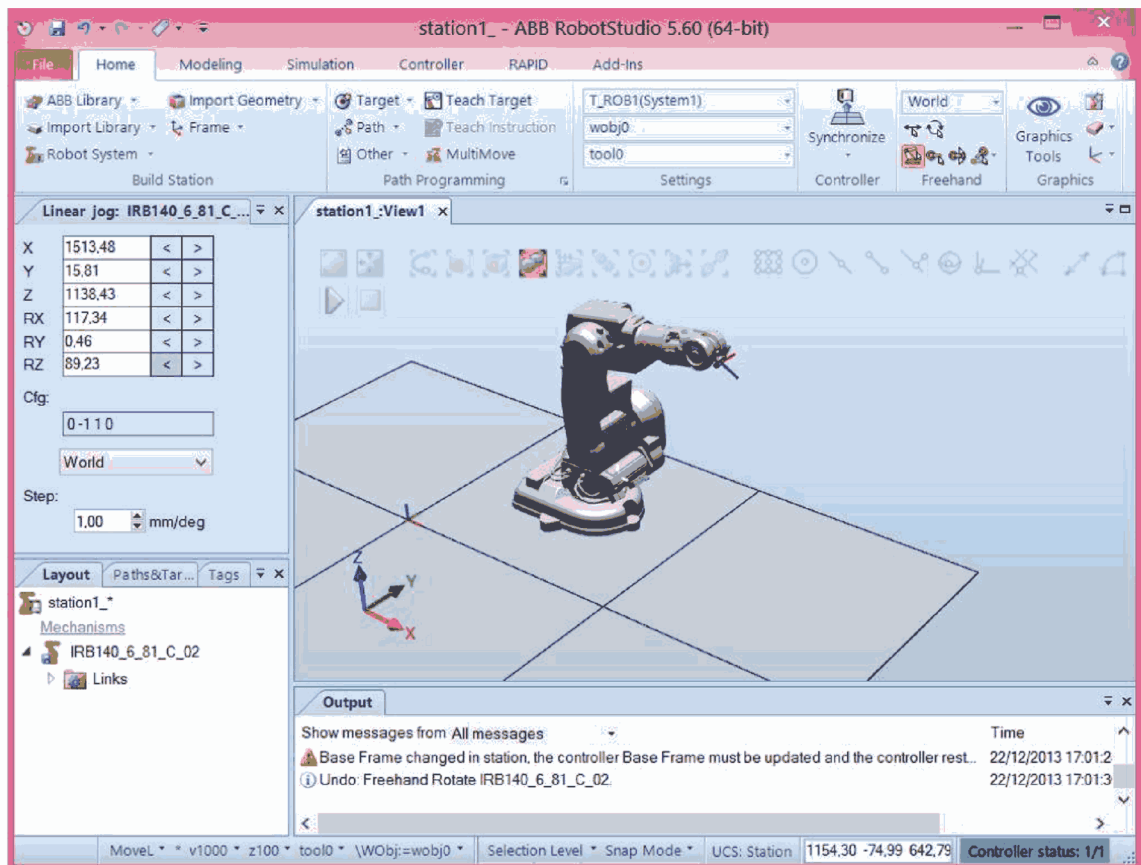


Рис. 28 – Результат руху руки маніпулятора

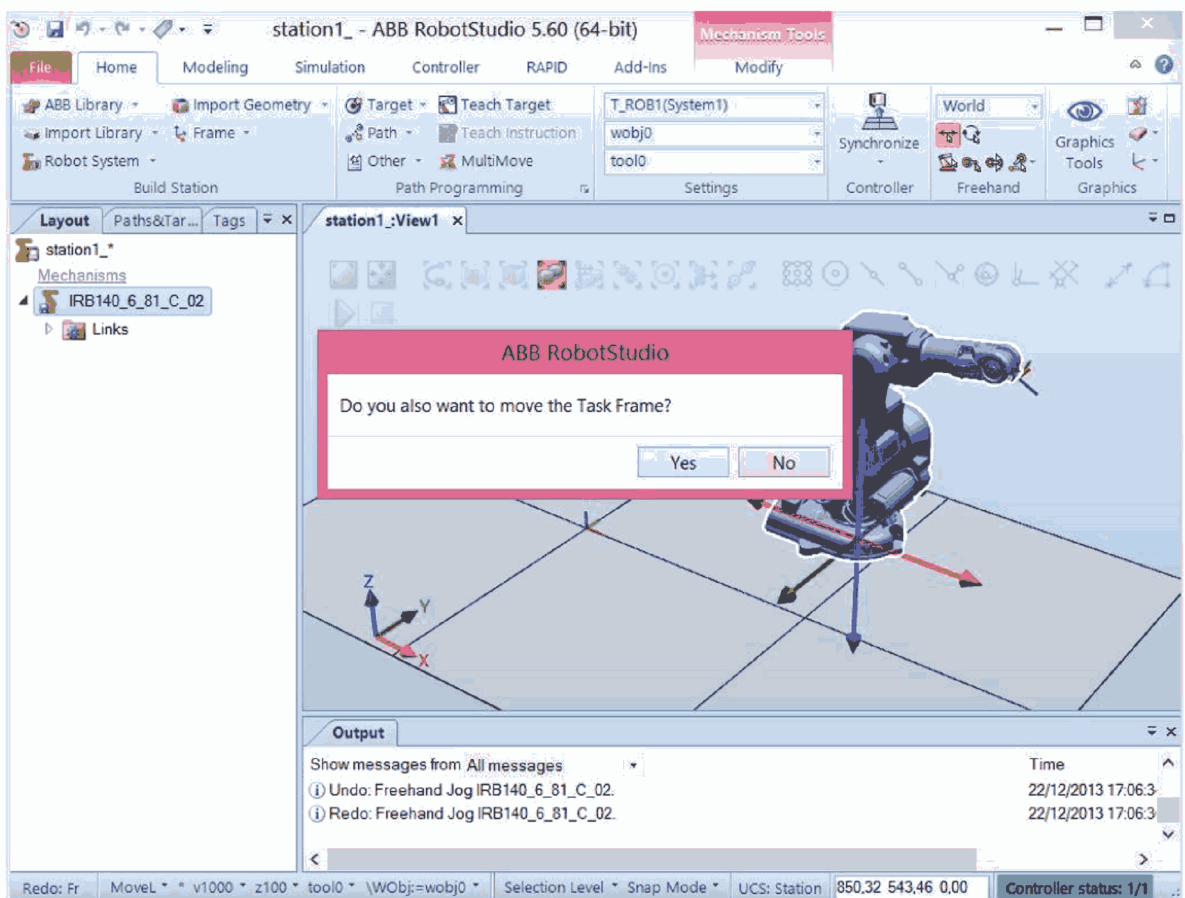


Рис. 29 – Фрейм завдань, пов'язаний з основою робота

На рисунках 28 і 29 показаний результат руху руки маніпулятора і пов'язаного з нею фрейму завдань при основі робота.

При переміщенні бази робота програмне середовище дасть запит на переміщення фрейму завдання, що пов'язаний з базою робота.

10. Імпортування інструменту в RobotStudio®

Наступним кроком є приєднання інструменту до кисті промислового робота. Його можна імпортувати з бібліотеки, наприклад, інструмент MyTool (рис. 30).

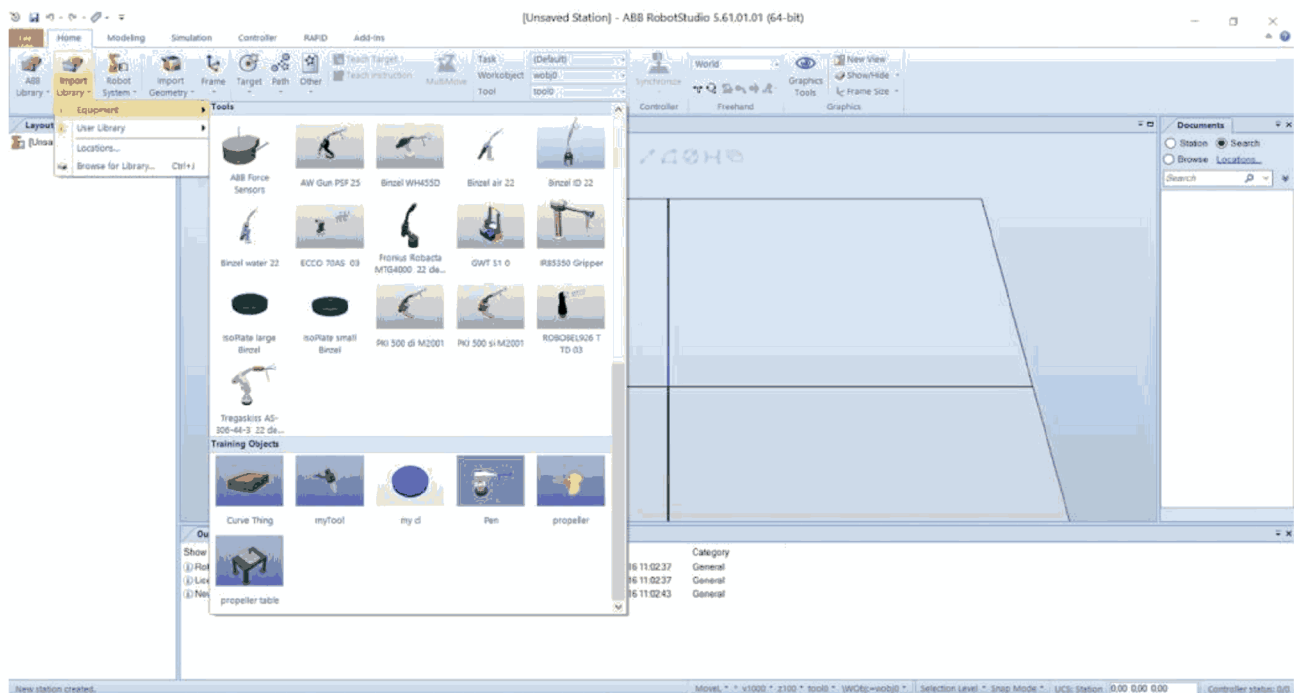


Рис. 30 – Імпортування інструмента

Після вибору інструменту необхідно прикріпити його до робота. Для цього достатньо перетягнути його на робота (рис. 31) або натиснути праву кнопку миші на інструменті і далі у третьому вікні вибрати «Attached to», а потім натиснути [ім'я / тип робота].

Тепер можна змінити орієнтацію інструменту, зберігаючи позицію «Tool Center Point» (TCP) (рис. 32).

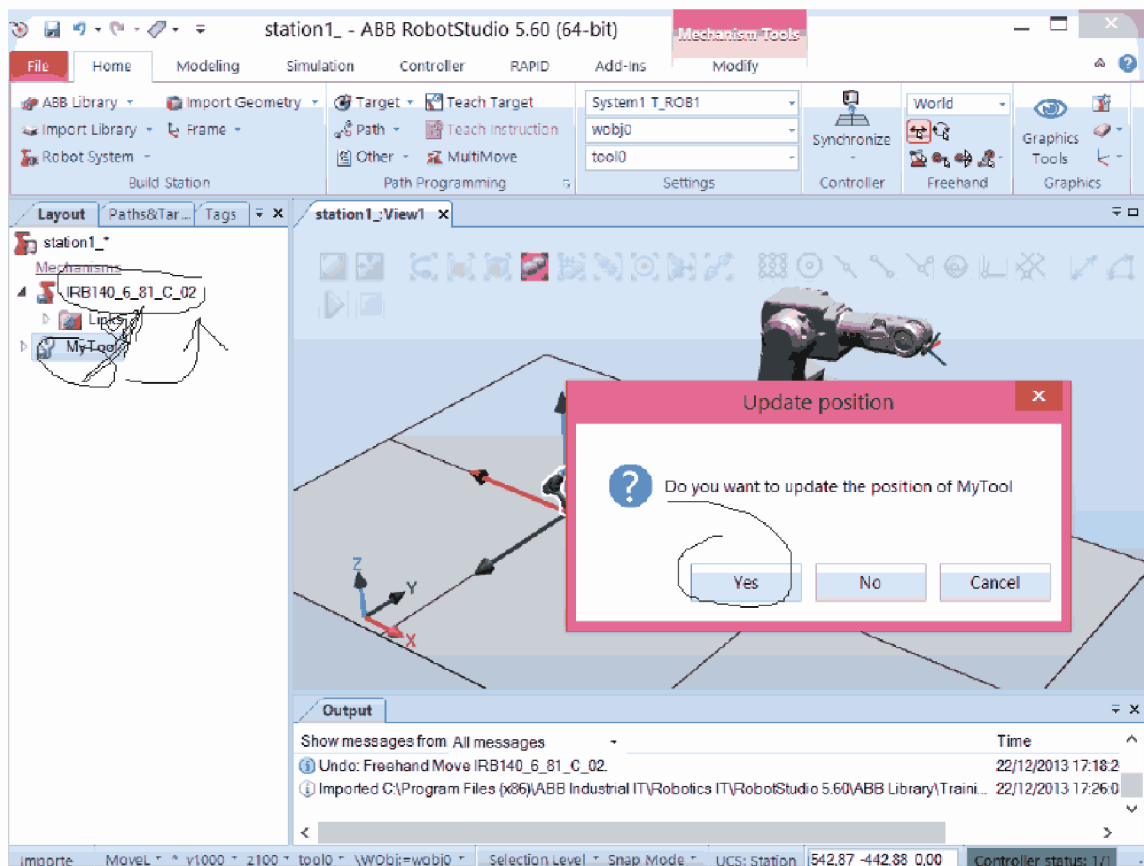


Рис. 31 – Оновлення положення інструменту

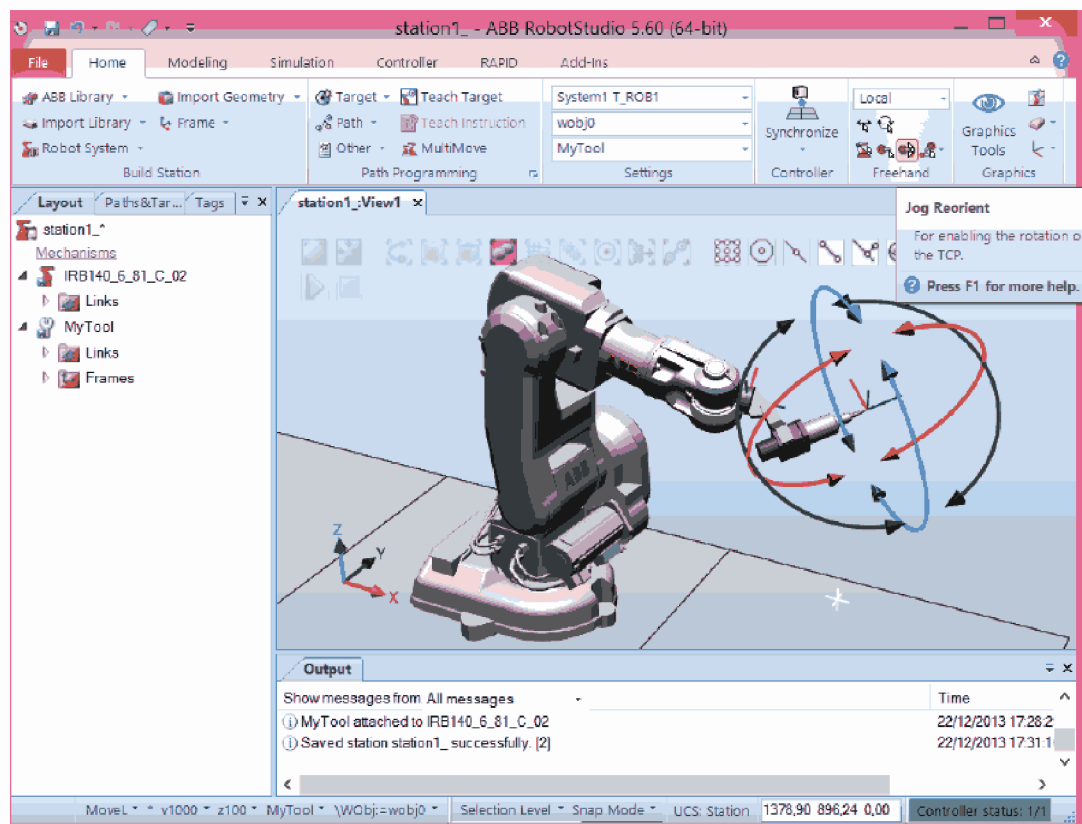


Рис. 32 – Зміна орієнтації інструменту

11. Хід роботи

1. Ознайомитися з теоретичним матеріалом, визначеннями, інтерфейсом програмного середовища RobotStudio®.
2. Зробити базові налаштування RobotStudio® під час запуску.
3. Отримати індивідуальний варіант від викладача лабораторної роботи.
4. Імпортувати робота з бібліотеки (згідно варіанту) і змінити його положення відповідно до глобальної системи координат (згідно варіанту).
5. Імпортувати контролер в систему і визначити його.
6. Імпортувати інструмент з бібліотеки (згідно варіанту) і прикріпити його до фланця робота.
7. Після завершення виконання лабораторної роботи слід показати викладачу виконане завдання та оформити звіт.

12. Порядок оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Тему і мету.
2. Теоретичні відомості.
3. Результати виконання індивідуального завдання та послідовна інструкція його виконання за допомогою збереженого зображення екрану.
4. Висновки.

13. Контрольні запитання

1. Дайте визначення промислового робота.
2. Область застосування RobotStudio® та його недоліки?
3. Що таке концепція та структура RAPID?
4. Поясніть відмінність між онлайн і офлайн програмуванням.
5. Шлях (траєкторія) та базові точки промислового робота.
6. Системи координат та TCP.
7. Що таке система координат об'єкта?
8. Що таке конфігурація осей промислового робота?
9. Поясніть як визначається (позначаються) конфігурація базової точки.
10. Побудова геометрії та різниця між геометріями і бібліотеками.
11. Поясніть процес створення робочої станції та імпорту промислового робота.

Рекомендована література

1. International Federation of Robotics: ISO 8373 «Industrial robots - definition and classification»
https://ifr.org/img/office/Industrial_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf
2. RobotStudio® Simulation of industrial automation processes and offline programming of ABBs robots - Practical guide for students - / Mocan B., Timoftei S., Stan A., Fulea M. // CLUJ-NAPOCA, 2017. – P. 140.
3. ABB, Technical reference manual RAPID Instructions, Functions and Data type, 3HAC 16581-1, 2017.
4. ABB, Operating Manual RoboStudio 6.05, 3HAC032104-001 Revision: T, 2017.
5. Energy efficiency analysis of the manipulation process by the industrial objects with the use of Bernoulli gripping devices / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon, M. Mikhalishin // Journal of Electrical Engineering. – 2017. – № 68 (6). – P. 496 – 502. – DOI: 10.1515/jee-2017-0087.
6. Chatraei A. Optimal Control of Robot Manipulators. / A. Chatraei, D.M.I.V. ZAda. – 2011.
7. Siciliano B. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Berlin : Springer, 2008. – P. 1631.
8. Михайлишин П. І. Optimization of bernoulli gripping device's orientation under the process of manipulations along direct trajectory / П.І. Михайлишин, Я. І. Проць, В.Б. Савків // Вісник ТНТУ. – Тернопіль, 2016. – Том 81. – №1. – С. 107 – 117.
9. Orientation Modeling of Bernoulli Gripper Device with Off-Centered Masses of the Manipulating Object / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, O. Fendo, M. Mykhailyshyn // Procedia Engineering. – 2017. – №187, P. 264 – 271.
10. Justification of Design and Parameters of Bernoulli-Vacuum Gripping Device / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon, O. Fendo // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2017. – № 14(6), DOI: 1729881417741740.
11. Experimental Research of the Manipulation Process by the Objects Using Bernoulli Gripping Devices / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, M. Mikhalishin, F. Duchon // In Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, International IEEE Conference. – Lviv, 2017. – P. 8 – 11.
12. Механізація та автоматизація навантажувально-розвантажувальних робіт: Навчальний посібник, Ч.1: Транспортні та навантажувально-розвантажувальні засоби / За заг. ред. С.Л. Литвиненка .-К.: Кондор, 2016 .- 208 с.
13. Modeling of Bernoulli gripping device orientation when manipulating objects along the arc. / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, M. Mikhalishin, F. Duchon // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2018. – № 15(2), DOI: 1729881418762670.
14. Substantiation of Bernoulli Grippers Parameters at Non-Contact Transportation of Objects with a Displaced Center of Mass / R. Mykhailyshyn,

- V. Savkiv, F. Duchon, P. Maruschak, O. Prentkovskis // 22nd International Scientific Conference Transport Means 2018. – Klaipeda, 2018. – P. 1370 – 1375.
15. Gasdynamic analysis of the Bernoulli grippers interaction with the surface of flat objects with displacement of the center of mass / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchon // Vacuum. – 2019. – № 159, P. 524 – 533. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.11.005.
 16. Murray R.M. A mathematical introduction to robotic manipulation / R.M. Murray, Z. Li, S.S. Sastry // CRC press. – 1994. – P. 456.
 17. Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко // Основы управления манипуляционными роботами. 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 480 с.
 18. Investigation of the energy consumption on performance of handling operations taking into account parameters of the grasping system / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, F. Duchon, V. Koloskov, I. Diahovchenko // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) – IEEE, 2018. – P. 295 – 300. – DOI: 10.1109/ieps.2018.8559586.
 19. Analysis of frontal resistance force influence during manipulation of dimensional objects / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, F. Duchon, V. Koloskov, I. Diahovchenko // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) – IEEE, 2018. – P. 301 – 305. – DOI: 10.1109/ieps.2018.8559527.
 20. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов / Ю. Г. Козырев. – Москва: КНОРУС, 2010. – 312 с.
 21. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навчальний посібник / Я.І. Проць – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, 2008. – 232 с.
 22. Михайлишин Р.І. Обґрунтування параметрів та орієнтації струминного захоплювача маніпулятора для автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.05 “Піднімально-транспортні машини” / Р.І. Михайлишин. – Тернопіль, 2018. – 21 с.
 23. Михайлишин Р. І. Аналіз методів планування траєкторій маніпуляторів / Р.І. Михайлишин, В.Б. Савків // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» Луцький НТУ. – Луцьк, 2016. – №8 (1). – С. 61 – 69.
 24. Justification of the object of manipulation parameters influence on the optimal orientation and lifting characteristics of Bernoulli gripping device / В.Б. Савків, Р.І. Михайлишин, Ф. Духон, М.С. Михайлишин // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон, 2017. – № 2 (61). – С. 98 – 104.
 25. The analysis of influence of a nozzle form of the Bernoulli gripping devices on its energy efficiency / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, P. Maruschak, F. Duchon, L. Chovanec // Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019. – Tern.

- : TNTU, Scientific Publishing House “SciView”, 2019. – P. 66–74. – DOI: 10.5281/zenodo.3387275.
26. Justification of Influence of the Form of Nozzle and Active Surface of Bernoulli Gripping Devices on Its Operational Characteristics / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, P. Maruschak, F. Duchon // TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. – Springer, 2020. — P. 263–272. – DOI: 10.1007/978-3-030-38666-5_28.
27. Rogowsky coil applications for power measurement under non-sinusoidal field conditions / I. Diahovchenko, R. Mykhailyshyn, D. Danylchenko, S. Shevchenko // Energetika. – 2019. – 65(1), P. 14 – 20. – DOI: 10.6001/energetika.v65i1.3972.
28. Analysis of Operational Characteristics of Pneumatic Device of Industrial Robot for Gripping and Control of Parameters of Objects of Manipulation / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, P. Maruschak, F. Duchon, O. Prentkovskis, I. Diahovchenko // TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. – Springer, 2020. — P. 504–510. – DOI: 10.1007/978-3-030-38666-5_53.
29. Optimization of design parameters of Bernoulli gripper with an annular nozzle / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, P. Maruschak, L. Chovanec, E. Prada, I. Virgala, O. Prentkovskis // Transport Means - Proceedings of the International Conference. – 2019. – P. 423-428.
30. Control of a small quadrotor for swarm operation / A. Trizuljak, F. Duchon, J. Rodina, A. Babinec, M. Dekan, R. Mykhailyshyn // Journal of Electrical Engineering. – 70(1). – 2019. – P. 3-15. – DOI: 10.2478/jee-2019-0001.
31. Protection of Digital Power Meters Under the Influence of Strong Magnetic Fields / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, I. Diahovchenko, R. Olsen, D. Danylchenko // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2019 – IEEE, 2019. – P. 314 – 320. – DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879985.
32. Research of Energy Efficiency of Manipulation of Dimensional Objects With the Use of Pneumatic Gripping Devices / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, I. Diahovchenko, F. Duchon, R. Trembach // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2019 – IEEE, 2019. – P. 527 – 532. – DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879957.