

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Мехатроніки та комп'ютерних  
технологій

Кафедра прикладної механіки та машин

**ДИПЛОМНА РОБОТА (ПРОЄКТ)**

на тему: Тестування промислових роботів за точністю,  
повторюваністю та надійністю

Виконав: студент групи БПМ-17  
спеціальності 131 Прикладна  
механіка освітня програма  
Прикладна механіка

Мазуренко Д.О.

Керівник Березін Л.М.

Рецензент Ковальов Ю.А.

Київ 2021

ВСТУП.....	
АНОТАЦІЯ	
ВСТУП	
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД, КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ТА МАНІПУЛЯТОРІВ	
1.1. Класифікація за видом системи координат	
1.2. Класифікація за вантажопід'ємністю	
Висновки до розділу 1	
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ТОЧНОСТІ ТА ПОВТОРЮВАННОСТІ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ.....	
2.1. Точність промислових роботів .....	
2.2. Повторюваність промислових роботів .....	
Висновки до розділу 2	
РОЗДІЛ 3. ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ КУКА ЯК ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	
3.1. Опис об'єкта досліджень.....	
3.2. Основні положення щодо програмування роботів КУКА.....	
Висновки до розділу 3.....	
РОЗДІЛ 4. ТЕСТУВАННЯ РОБОТА КУКА НА ТОЧНІСТЬ ТА ПОВТОРЮВАНІСТЬ.....	
4.1. Лазерний трекер FARO Laser Tracker як координатно-вимірювальна машина .....	
4.2. Метод вимірювання точності та повторюваності позиціонування промислового робота Kuka KR 16-2 за допомогою технології лазерного вимірювання.....	
4.3. Систематизація представлення результатів.....	
Висновки до розділу 4.....	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	

## АНОТАЦІЯ

Мазуренко Дмитро Олександрович. Тестування промислових роботів за точністю, повторюваністю та надійністю. – Рукопис. Бакалаврський дипломний проект на здобуття ступеня бакалавра за освітньою програмою Машинобудування спеціальності 131 Прикладна механіка, Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2021.

В результаті виконання бакалаврського дипломного проекту було проаналізовано сучасний стан робототехніки та застосування промислових роботів різних галузях. Виконано аналітичний огляд промислових роботів та розглянуто їх класифікацію. Серійних промислових роботів Kuka KR 16-2. Розглянуто характеристики робот-маніпулятора Kuka KR 16-2, алгоритми його програмування та способи досягнення точності позиціонування. На основі наведених характеристик робота-маніпулятора Kuka KR 16-2 були розглянуті основні положення, щодо точності та повторюваності його при позиціонуванні робочого інструмента. Отримані залежності, які описують точність та повторюваність робота в ангулярних сферичній системі координат. В роботі також були розглянуті способи та прилади для тестування робота Kuka за допомогою лазерного трекера Faro Laser Tracker як координатно-вимірювальної машини. В результаті був виконаний розрахунок точності робота Kuka KR 16-2, з урахуванням паспортних даних похибки 0,2 до 0,4 мм, встановлено, що на відстанях від 600 до 1000 мм від об'єкту, в крайніх точках вимірювання еталону по формі куба з довжиною сторони 1000 мм, показало велике відхилення від заданого положення, що потребує алгоритмів для корегування похибок. Також було визначено параметри повторюваності позиціонування промислового робота Kuka KR 16-2 з обертанням інструменту  $\pm 20^\circ$  відносно осей X та Y.

**Ключові слова:** промислові роботи–маніпулятори, точність та повторюваність робота маніпулятора, калібрування промислових роботів, діагностика точності промислових роботів.

## SUMMARY

Dmitro Mazurenko. Testing of industrial robots for accuracy, repeatability and reliability. - Manuscript. Bachelor's degree project for a bachelor's degree in the educational program of Mechanical Engineering, specialty 131 Applied Mechanics, Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2021. As a result of the bachelor's thesis project, the current state of robotics and the field of application of industrial robots was analyzed. An analytical review of industrial robots is performed and their classification is considered. serial industrial robots Kuka KR 16-2. The characteristics of the robot manipulator Kuka KR 16-2, algorithms of its programming and ways to achieve positioning accuracy are considered. Based on the above characteristics of the robot manipulator Kuka KR 16-2 were considered the main provisions regarding its accuracy and repeatability when positioning the working tool. The dependences which describe accuracy and repeatability of work in angular spherical coordinate system are received. Methods and devices for testing the Kuka robot using the Faro Laser Tracker as a coordinate measuring machine were also considered. As a result, the accuracy of the robot Kuka KR 16-2 was calculated, taking into account the passport data of the error of 0.2 to 0.4 mm, it was found that at distances from 600 to 1000 mm from the object, at the extreme measurement points of the standard cube shape with a side length of 1000 mm, showed a large deviation from the specified position, which requires algorithms for error correction. The repeatability parameters of the Kuka KR 16-2 industrial robot with tool rotation  $\pm 20^\circ$  relative to the X and Y axes were also determined.

**Keywords:** *industrial works-manipulators, accuracy and repeatability of manipulator work, calibration of industrial robots, diagnostics of accuracy of industrial robots.*

## ВСТУП

Розгортання промислових роботів у різних галузях промисловості виробництво стикається з важкими умовами, що ставляться до точності їх роботи. Це головним чином через те, що більшість операцій, виконуваних роботом, потрапляють в точну технологію та елементів точної механіки. Для опису та аналізу додатків з роботами може бути використаний підхід оцінка двонаправлених зв'язків, а також функціональних зв'язків кінематики (навантаження, точність, швидкість, ...), її параметри та параметричні символи, які в сукупності визначають придатність робота для конкретних точних задач. Цей підхід є одним з основних етапів підготовки проекту робота програми для конкретних виробничих та невиробничих процесів.

Параметри роботів вибираються з характеристики робота, його призначення та ступені точності. У робототехніці для загальної класифікації створених роботів та позначень системних символів за їх навантаженнями використовують таблиці характеристик та класифікацію.

Процес тестування роботів на точність та повторюваність виконують для точного визначення функціональної залежності між зчитуваннями показників датчиків у ступенях рухомості та поточним положенням робочого органу в просторі та за

результатами порівняння вносити відповідні зміни параметрів в програмному забезпеченні для позиціонування робота.

Тестування та подальше калібрування робота виконують рідко, що відрізняє її від адаптивного управління, при якому ідентифікація моделей здійснюється постійно та параметри управління встановлюються відповідно до певних змін. Калібрування роботів поділяють за трьома рівнями. Перший рівень калібрування полягає в визначенні залежності між сигналами датчиків, що визначають положення з'єднань і дійсне їх положення. Другий рівень включає калібрування кінематичної моделі робота. Другий рівень полягає в калібруванні кінематичної моделі роботи. Третій рівень включає налаштування параметра роботів в алгоритмі визначення помилкового позиціонування, які викликані зміною податливості у шарнірах і ланках роботів, тертя, люфти тощо.

Таким чином, в дипломному проекті розглядаються положення процесу підвищення точності та повторюваності робота за допомогою випробувань їх позиціонування з подальшим калібруванням програмного забезпечення без змін та переробки конструкцій роботи та систем управління.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Продуктивність та якість виконання операцій обладнанням залежить від точності виконання технологічних операцій, в тому числі при виготовленні виробів легкої промисловості

На сьогоднішній день все більш застосовуються промислові роботи, які адаптовані для різних технологічних операцій. Застосування промислових роботів на сьогодні застосовується не лише для забезпечення технологічної логістики але і для виконання технологічних операцій, і повністю замінюють людську працю. Висока точність позиціонування та постійність повторюваність забезпечують виконання складних і важких операцій. Так наприклад, для пошиття крісел та чохлів в автомобілебудуванні широко застосовані роботи Kuka, Fanuc.

Поставлена задача цієї роботи зводиться до визначення точності позиціонування промислових роботів та точності повторюваності.

Об'єкт дослідження - технологічний процеси легкої промисловості та вимоги до їх точності.

Предмет дослідження – вплив параметрів ланок робота маніпулятора на його функціональність.

*Методи досліджень.* Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях теорії механізмів і машин, теоретичної механіки, надійності та теорії вірогідності.

*Наукова новизна* Наукова новизна та цінність отриманих результатів полягає в отриманні параметрів та функціональних характеристик промислових роботів та визначення приналежності застосування їх для реалізації в технологічних процесах виготовлення виробів легкої промисловості.

*Практична значимість* полягає в застосування промислових роботів для виконня ряду технологічних операцій при виготовленні виробів легкої промисловості.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД, КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ТА МАНІПУЛЯТОРІВ**

### **1.1. Класифікація за видом системи координат**

Система координатних переміщень (система координат ) промислового робота визначає кінематику основних рухів та форму робочої зони. До основних рухів відносять усі рухи механічної системи промислового робота без урахування руху захвату деталі, орієнтовних рухів та додаткових переміщень основи промислового робота.

Системи координат бувають двох видів: прямокутні та криволінійні (рис. 1-2). В прямокутній системі координат (плоскій та просторовій) об'єкт маніпулювання розміщується в певну точку простору за допомогою прямолінійних переміщень ланок механічної системи промислового робота по трьом (або двом) взаємно перпендикулярним осям.

В криволінійній системі координат найбільш поширені: плоскі полярні (переміщення об'єкту відбувається в одній координатній площині у напрямку радіус-вектору  $r$  та куту  $\varphi$ ); циліндричні, які характеризуються переміщенням об'єкту в основній координатній площині в напрямках  $r$  та  $\varphi$ , а також по нормалі до неї  $z$ ; сферичні (полярні), де переміщення об'єкту маніпулювання у просторі здійснюється за рахунок лінійного руху руки промислового робота на величину  $r$  та його кутового переміщення  $\varphi$  та  $\omega$  в двох взаємно перпендикулярних площинах.

Різновидом криволінійної системи є ангулярна (кутова) плоска або просторова (циліндрична та сферична) система координат,



характерна для рухів багатоланкових шарнірних рук промислових роботів та маніпуляторів.

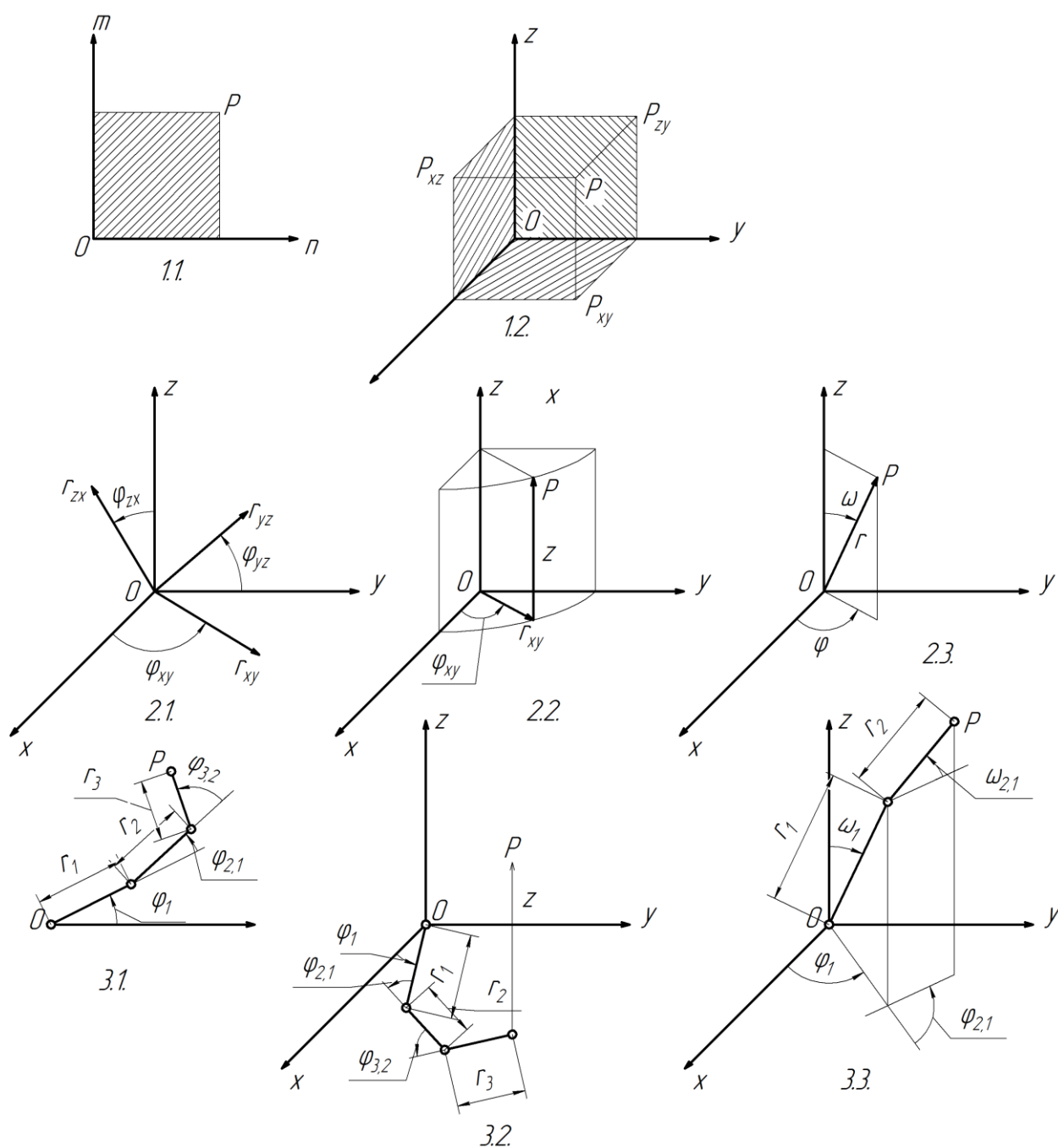


Рис. 1. Системи основних координатних переміщень ланок механічної системи маніпуляторів та промислових роботів: 1.1 — прямокутна плоска система координат; 1.2 — прямокутна просторова система координат; 2.1, 2.2, 2.3 — полярні системи

координат: плоска, циліндрична та сферична відповідно; 3.1, 3.2, 3.3, — ангулярні системи координат: плоска, циліндрична та сферична відповідно.

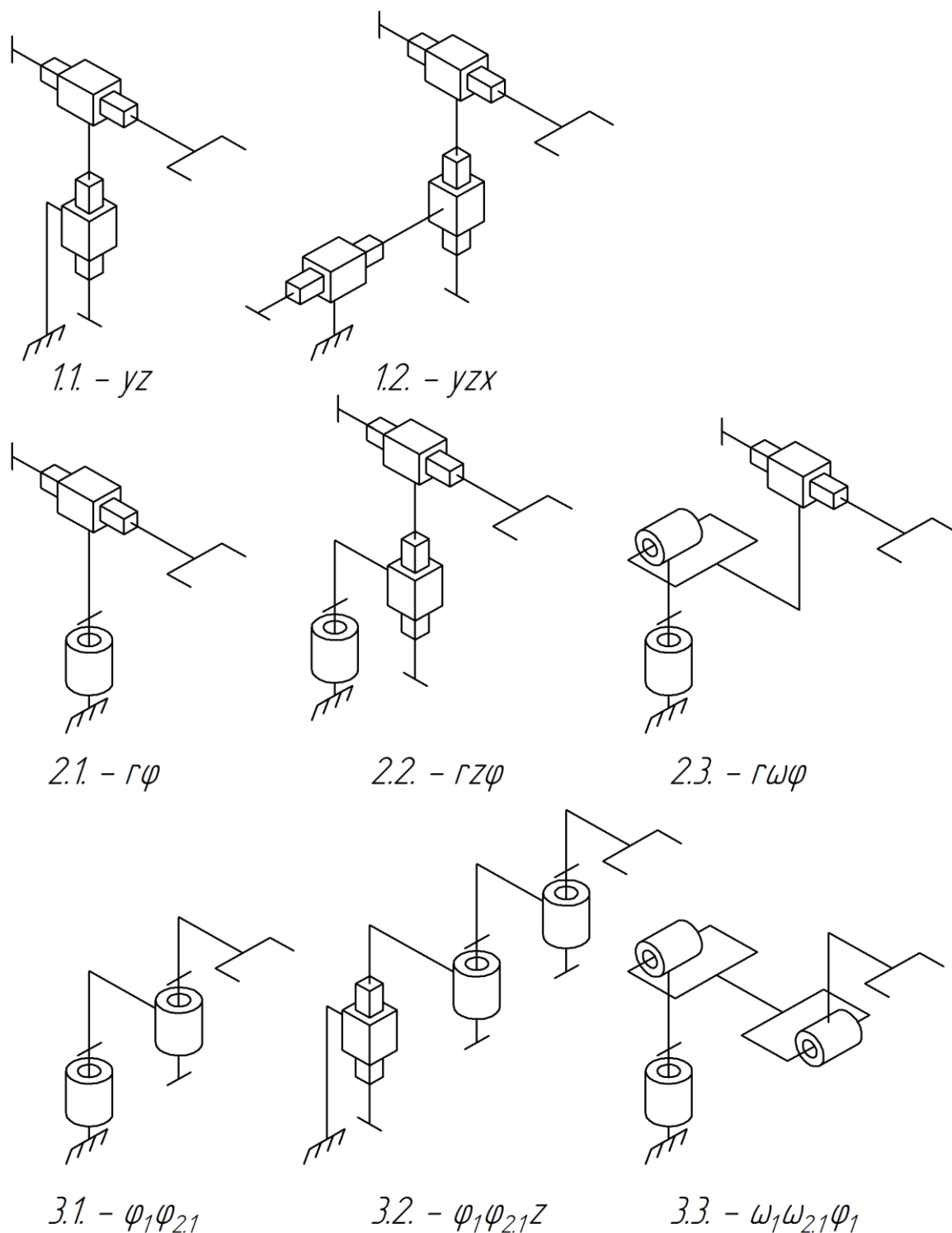


Рис. 2. Приклади структурних кінематичних схем. 1.1 — прямокутна плоска система координат; 1.2 — прямокутна просторова

система координат; 2.1, 2.2, 2.3 — полярні системи координат: плоска, циліндрична та сферична відповідно; 3.1, 3.2, 3.3, — ангулярні системи координат: плоска, циліндрична та сферична відповідно.

В ангулярній плоскій системі координат об'єкт маніпулювання переміщується в координатній площині завдяки відносним поворотам ланок руки, які мають постійну довжину. Ангулярна циліндрична система характеризується додатковим зміщенням відносно основної координатної площини в напрямку перпендикулярної до неї координати  $z$ .

В ангулярній сферичній системі координат переміщення об'єкту в площині виконується тільки за рахунок відносних кутових поворотів ланок руки, при цьому хоча б одна ланка має можливість повороту на кути  $\varphi$  та  $\omega$  в двох взаємно перпендикулярних площинах.

## **1.2. Класифікація за вантажопід'ємністю**

Вантажопід'ємність промислового робота визначається як суммарна вантажопід'ємність його рук (захватів) [2].

Вантажопід'ємність руки промислового робота — найбільша маса об'єктів маніпулювання (включаючи масу захватного пристрою), які можуть пересуватися рукою при заданих умовах (при максимальній або мінімальній швидкості, при максимальному вильоті руки тощо).

При виконанні з декількома руками разом з суммарною вантажопід'ємністю промислового робота слід зазначати вантажопід'ємність однієї руки.

Для деяких типів промислових робіт важливим показником є зусилля (або крутний момент), який розвиває виконавчий механізм при

заданих умовах. До числа цих показників можна віднести зусилля стиснення (захвату, утримки) об'єкта маніпулювання захватним пристроєм; робоче зусилля руки промислового робота впродовж її повздовжньої вісі; крутний момент при повороті захватного пристрою.

Розрізняють промислові роботи за вантажопідйомністю:

- надлегкі (0,08; 0,16; 0,32; 0,40; 0,50; 0,63; 0,80; 1,0 кг);
- легкі (1,25; 1,60; 2,0; 2,50; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0 кг);
- середні (12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0 80,0; 100,0; 125,0; 160,0; 200,0 кг);
- важкі (250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000 кг);
- надважкі (1250; далі значення обирають з ряду R10 за ГОСТ 8032-84).

#### Таблиця

#### Класифікація роботів за навантаженням

Категорія	Позначення	Навантаження [кг]		
		Мінімальне	Середнє	Максимальне
Дуже важкі	G	300	1 000	3 000
Важкі	T	30	100	300
Середні	S	3	10	30
Легкі	L	0,3	1	3
Дуже легкі	M	0,03	0,1	0,3

Загальна класифікація маніпуляторів та роботів наведена схемою рис. 3 [2]. Висновки за розділом 1. Розглянута класифікація роботів-маніпуляторів дає можливість вибору його типу в залежності від поставлених задач. Класифікація за видами координат промислових роботів дозволяє оптимальний їх вибір в залежності від технологічного

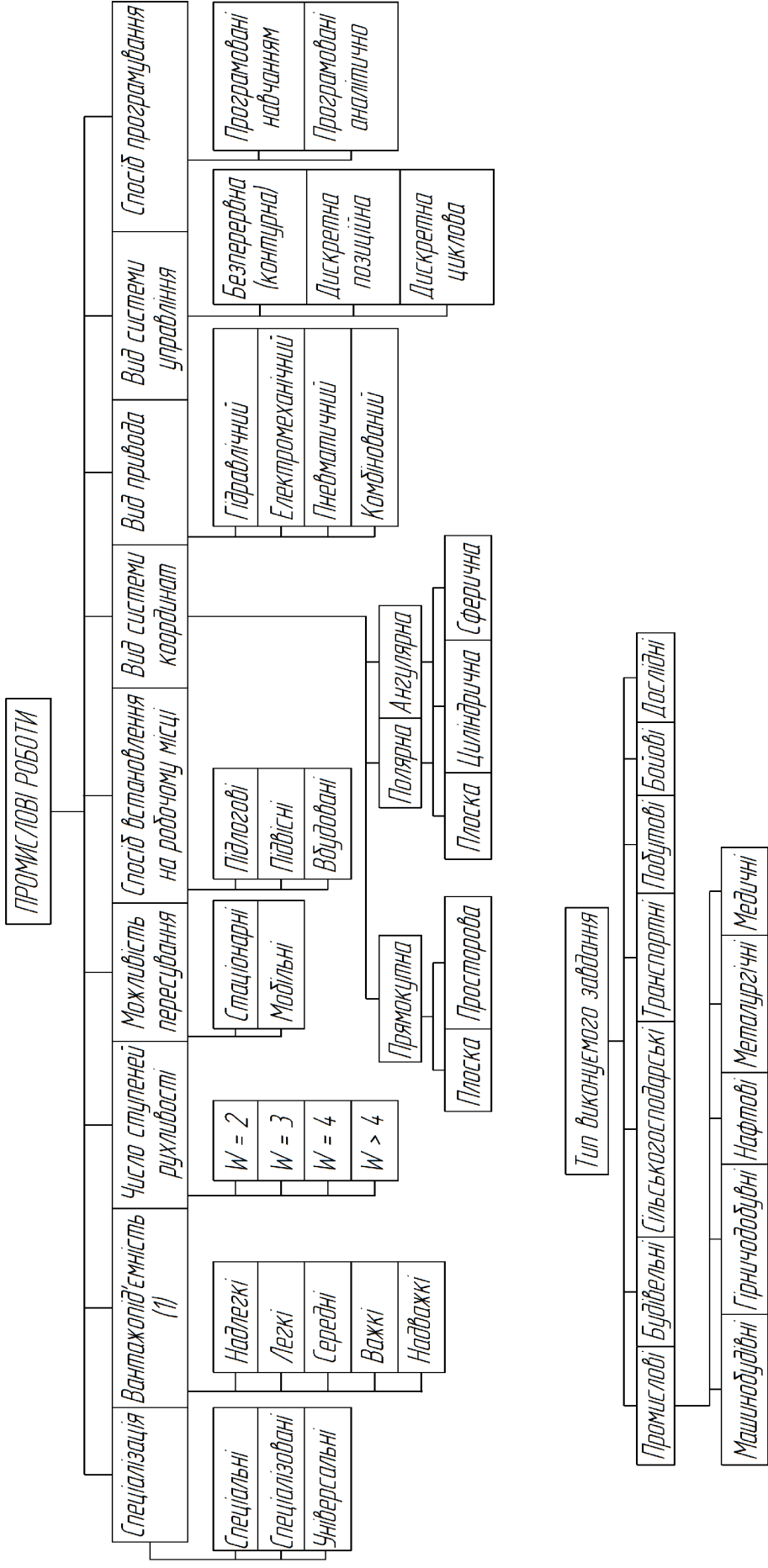


Рис. 3. Класифікація промислових роботів



## РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ЩОДО ТОЧНОСТІ ТА ПОВТОРЮВАННОСТІ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

### 1.2. Точність промислових роботів

Точністю промислових роботів називають здатність його маніпулятора досягти заданої точки в робочій зоні. Основним методом визначення похибок точності при позиціонуванні промислового робота є вимірювання кутових або лінійних змін окремих ланок його маніпулятора. Оскільки методи безпосереднього вимірювання кінцевого визначення положення маніпулятора робота відносять до високо вартісних та чутливих до впливу на датчик положення, то їх використання обмежене. На фактори точності позиціонування впливають фактори, які описано більш широко, серед іншого в роботі [21], такі як помилки позиціонування та візуалізація траєкторії (наприклад, через деформації, спричинені температурою, неточністю сигналів системи управління або інерційними силами). Відповідно до стандарту точність односпрямованого позиціонування (AP) описує відхилення між заданим положенням та середнім значенням фактичних положень при досягненні встановленого положення з того ж напрямку [26].

Класифікація роботів з позицій досягнення повторної точності позиціонування представлена в табл. 2.

## Класифікація робіт за односпрямованою точністю позицій

Клас	Категорія	Діапазон [мм]
0	Ультра точний	( $\pm 0,001$ ; $\pm 0,01$ )
I	Дуже точний	( $\pm 0,01$ ; $\pm 0,1$ )
II	Зі збільшеною точністю	( $\pm 0,1$ ; $\pm 0,5$ )
III	З нормальною точністю	( $\pm 0,5$ ; $\pm 1$ )
IV	З низькою точністю	$> \pm 1$

Положення інструменту в маніпуляторі переважно обчислюється на основі вимірювання кутів або люфтів в з'єднаннях з урахуванням розмірів та жорсткості маніпулятора у відношенні до маси як навантаження на інструмент. На точність позиціонування впливає нещільність (знос) зчленованих з'єднань, тертя, похибки передач у механізмах, точність елементів маніпулятора, обмежена механічна жорсткість, коливання потужності, похибки обчислення, робоче середовище, пружні ефекти компонентів та спосіб закріплення, а також багато інші статичні та динамічні фактори.

Оскільки більшість з перерахованих факторів не піддаються сталим передбаченим змінам, це призводять до створення похибок між математичними моделями та реальними характеристиками робота. Ці відмінності, як правило, зменшують шляхом калібрування математичних моделей. Іншим методом підвищення точності є використання прямих датчиків в кінці механічного схвату робота, наприклад лазерних, індуктивних чи зорових датчиків.

Найпоширеніший метод підвищення точності робіт - програмування їх за допомогою навчання. Цей метод складається з дискретного або безперервного програмування, які різняться за



характером навчання. Дискретне програмування передусім використовують для переміщення об'єктів, для склеювання або зварювання, а безперервне - де рухи робота є плавними і неперервними, наприклад, для таких операцій, як фарбування спреєм.

В даний час інтенсивно розробляється метод офлайн - програмування роботів. Його використання значно скорочує витрати на впровадження нових моделей автомобілів на виробничій лінії. Головним є те, що при цьому методі робот не потрібний для самого процесу програмування, бо він демонструється в модельованому 3D-середовищі за допомогою програм Robcad, Delmia, Roboguide, Robot Studio або Process Simulator. Створене віртуальне середовище включає 3D-моделі пристроїв з існуючої технологічної лінії, розташування яких достовірно відтворює 3D-лазерна метрологія, що дозволяє дуже точно програмувати роботів без необхідності їх фізичної участі. Це дозволяє зменшити витрати, скоротити час запуску нової продукції та покращення тривалість циклу на виробничій лінії. Також передбачається швидке реагування, коли одна з моделей несумісна, тобто захват несумісний з об'єктом маніпуляції на даному етапі виробництва. Додатковою перевагою цього методу є зниження ризику нещасних випадків в робочій зоні та підвищення безпеки операторів роботів.

Для розрахунків точності роботів  $AP_P$  використовують наступні залежності[27]:

$$AP_P = \sqrt{(\bar{x} - x_C)^2 + (\bar{y} - y_C)^2 + (\bar{z} - z_C)^2}, \quad (1.1)$$

де

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (1.2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (1.3)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (1.4)$$

Параметри  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  позначають середні значення координат серії вимірюваних точок одним із методів випробувань;

$x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$  - координати заданого положення,

$x_j$ ,  $y_j$ ,  $z_j$  - координати  $j$ -ї вимірюваної позиції

## 2.2. Повторюваність промислових робіт

Повторюваність маніпулятора - це можливість переміщення effector tip /кінцівки ефектора до тієї ж, заданої точки в просторі. Рішення системи управління є першою, що впливає на відтворюваність/збіжність результатів маніпулятора.

Для даної позиції повторюваність визначається наступним чином:

- значення повторюваності RP, яке представляє радіус сфери, центр якої співпадає з центром ваги і який обчислюється як за рис 4.

- розсіяння значень кутів  $\pm 3Sa$ ,  $\pm 3Sb$ ,  $\pm 3Sc$  відносно середніх значень  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$ , де  $Sa$ ,  $Sb$  і  $Sc$  – стандартне відхилення.

При цьому повторюваність положення робота визначається за формулою:

$$RP_i = \bar{l} + 3S_l_i \quad (1.5)$$

$$\text{де } \bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (1.6)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (1.7)$$

де  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  і  $x_j$ ,  $y_j$ ,  $z_j$  визначаються за формулами,

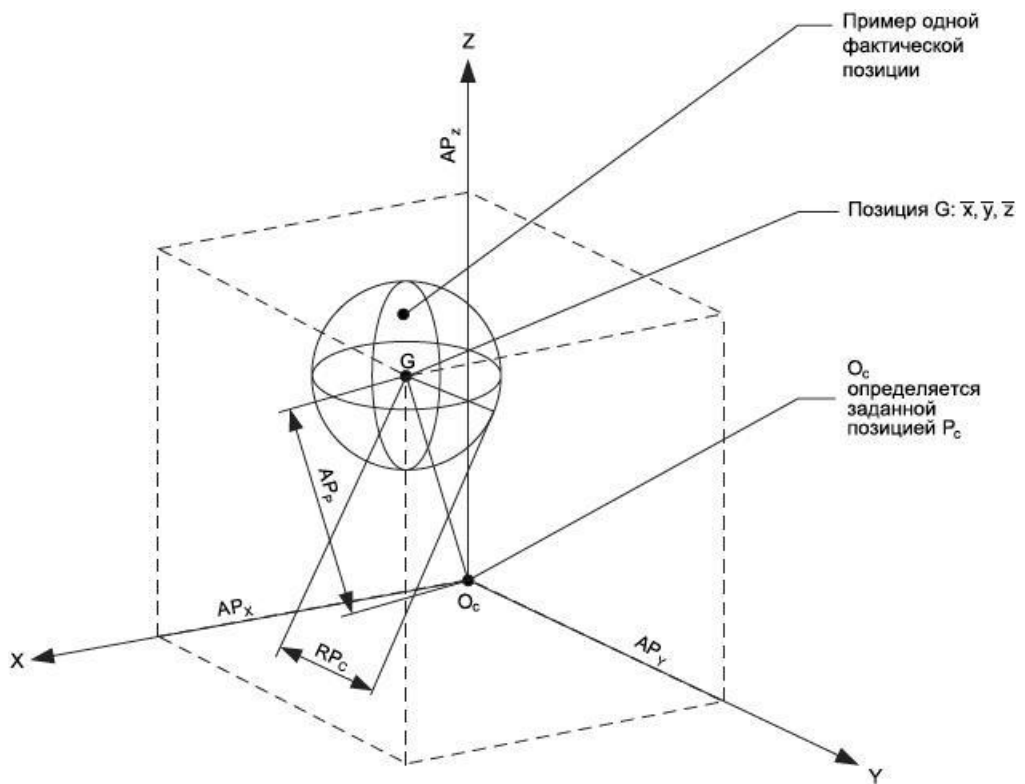


Рис. 4. Повторюваність положення

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (1.8)$$

В свою чергу повторюваність орієнтації:

$$RP_a = \pm 3S_a = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{3j} - \bar{a})^2}{n-1}}$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{3j} - \bar{b})^2}{n-1}}$$

$$RP_c = \pm 3S_c = \pm 3\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{3j} - \bar{c})^2}{n-1}}$$

Маніпулятори промислових роботів, які в даний час використовуються в промисловості, характеризуються дуже хорошою повторюваністю ( $RP$ ), але не дуже хорошою точністю ( $AP$ ).

З позиції зон експлуатації (обсяг простору, доступного для робочого кінцевого ефекту) класифікація роботів представлена на рис.5

Висновок за розділом 2. Наведені характеристики промислових роботів можуть бути корисні при виборі роботів з урахуванням вимоги до точності та повторюваності технологічних процесів. Отримані залежності з визначення точності та повторюваності промислових роботів в різних системах координат, можуть бути застосовані для аналізу діючих промислових роботів та застосовані в алгоритмах компенсації похибок.

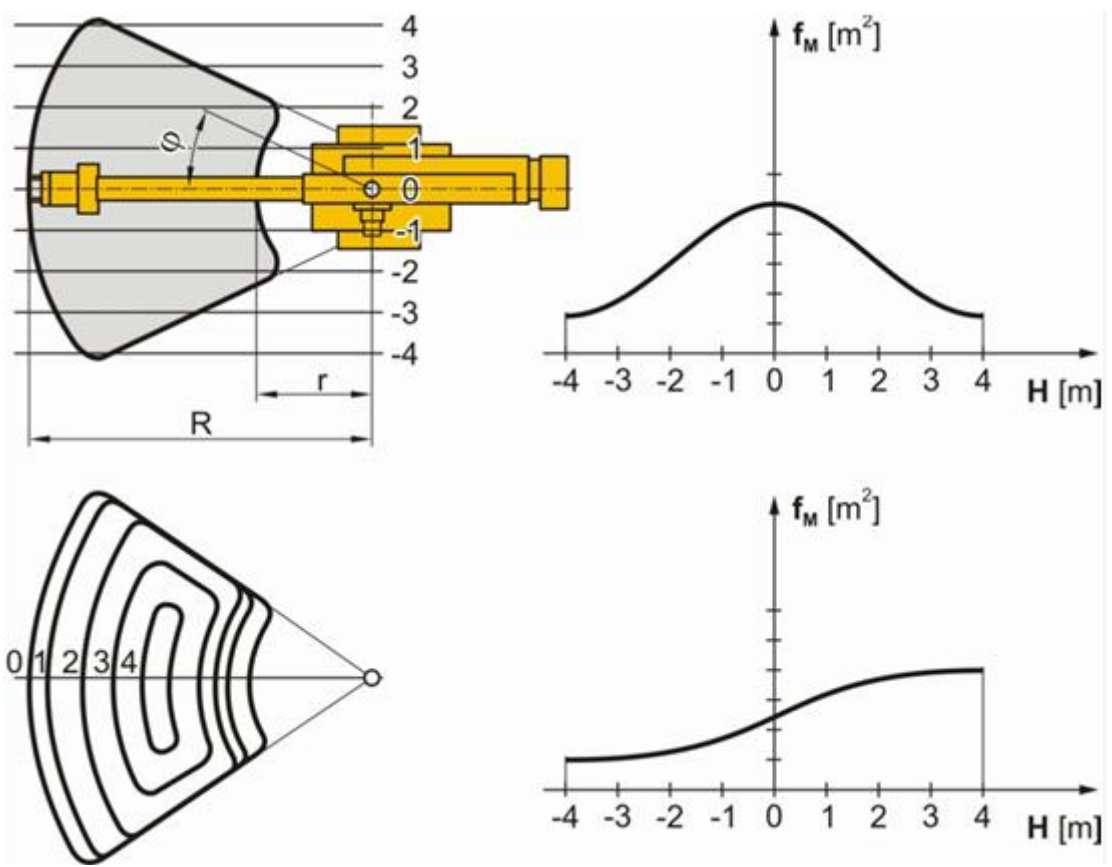


Рис. 5. Зони обслуговування робота

## **РОЗДІЛ 3. ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ КУКА ЯК ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **3.1. Опис об'єкта досліджень**

Kuka - німецька компанія, яка спеціалізується на виробництві великої кількості моделей роботів-маніпуляторів для автоматизації виробничих процесів. Серія роботів Kuka характеризується незначною вантажопідйомністю в межах 7-15 кг, але високою швидкістю роботи і можливістю використання в обмеженому просторі. Маніпулятори Kuka найбільше пристосовані до виконання високоточних робіт та роботи з дрібними деталями.

Робот-маніпулятор Kuka KR 16-2 є швидкісною моделлю для складання і скріплення, обробки поверхонь, вимірювання і тестування, обслуговування інших верстатів, перенесення різних предметів і палетування та багато інших областей застосування. Маніпулятор оснащений системою розпізнавання нового покоління. Механічна трансмісія прискорює функціонування центральної руки робота. Kuka KR 16-2 має 6 осей, з яких перші три сильно оптимізовані для збільшення швидкості, мають можливість закріплення практично на будь-якій поверхні (навіть на стелі). Максимальний радіус роботи складає 1610 мм, що покращує доступ до інструментів як на далекі, так і ближчі відстані, вантажопідйомність - до 16/10 кг при власній вазі - 235 кг.

Загальний вигляд та основні геометричні розміри робот-маніпулятора Kuka KR 16-2 представлено на рис. 6-9, а основні технічні характеристики – в табл. 3-4.



Рис. 6. Загальний вид робот-маніпулятора Кука KR 16-2



Рис. 7. Розташування 2 осі додатково забезпечує високу гнучкість та надзвичайну доступність до об'єкту



Рис. 8. Обтічна конструкція з низькими руйнуючими контурами дозволяє діставатися до заготовок навіть у обмежених просторах



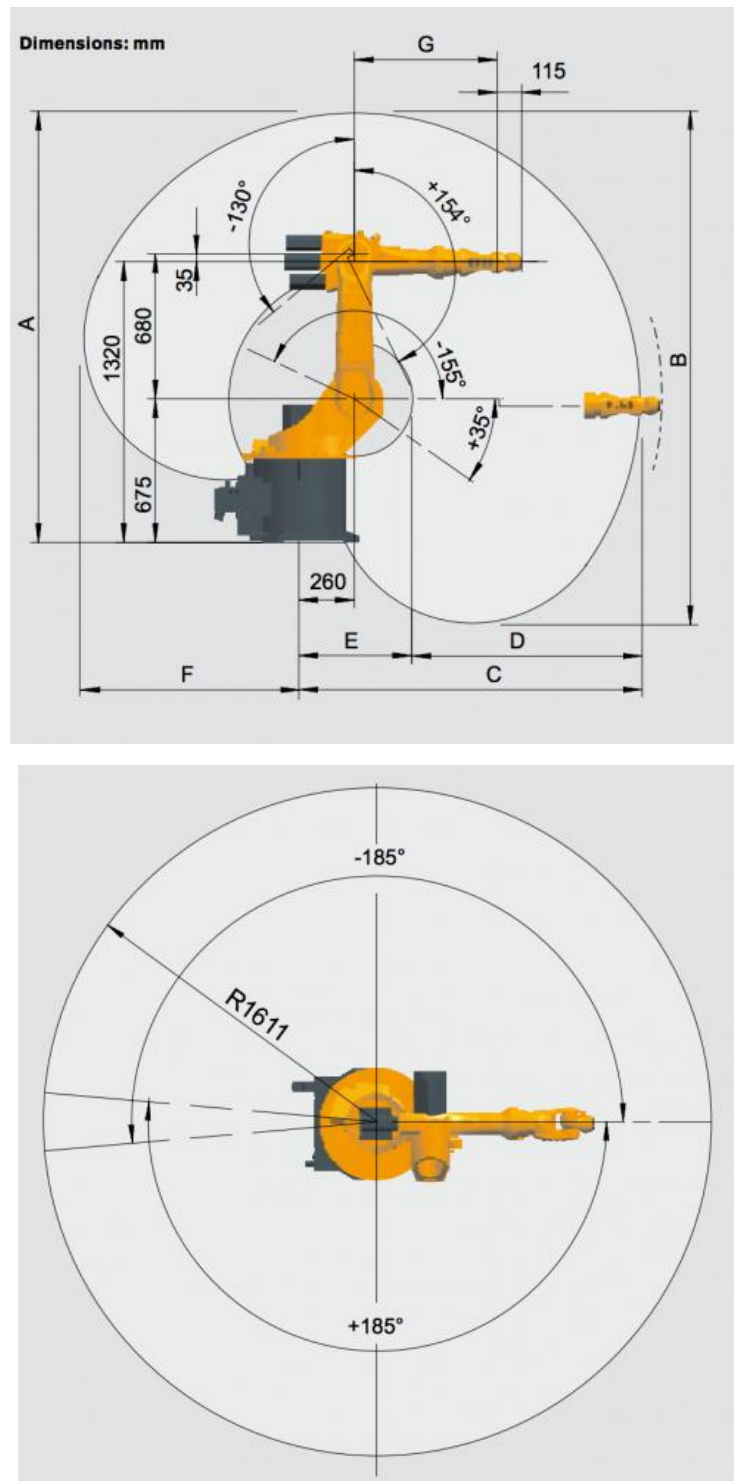


Рис. 9. Основні геометричні розміри робот-маніпулятора Kuka KR

16-2:

Розміри, мм							Об'єм.
A	B	C	D	E	F	G	м <sup>3</sup>
1576	2691	1801	1081	720	453	670	12,0

Параметри синхронізації дозволяють декільком роботам працювати разом як єдиний комплекс. Робот-маніпулятор Kuka KR 16-2 має кращий інтерфейс з використанням стандартних компонентів ПК, які приймають налаштування відповідно до індивідуальних переваг. Програмне забезпечення також надійне і включає багато з іноваційних технологій. Незважаючи на те, що всі зусилля були спрямовані на мінімізацію розбивки, обслуговування контролера легке, оскільки використовуються стандартні компоненти, які доступні і легко замінні. Також наявні функції усунення відмов та пошкоджень за рахунок дистанційного моніторингу і резервного копіювання через дисководи гнучких дисків та CD-ROM.

Також система допускає просте розширення при використанні двох слотів для зовнішніх осей в базовому корпусі разом з урахуванням додаткових шаф, що забезпечує управління до 6 зовнішніх осей. Окрім того, KR-16-2 повністю оснащений варіантами безпеки, що підвищує надійність і продуктивність. Додаткові функції, такі як «plug and play», дозволяють швидко запускати в робочий режим.

Таким чином основними особливостями моделі KR 16-2 є:

- широка область застосування;
- великий радіус дії;
- висока швидкість роботи;
- можливість інтеграції в конвеєрні стрічки;
- спеціалізоване ПО;
- простота в установці і обслуговуванні.

KR-16-2 оснащений контроллером KRC2 ed05, який виділяється серед інших завдяки простоті обслуговування, модульній конструкції і зручному у використанні, а також дозволяє швидко змінювати компоненти місцями. Набір додаткових діагностичних функцій,

наприклад, віддалене обслуговування через інтернет, різноманітні варіанти розширення системи і комплексний підхід до безпеки, доповнюють спектр необхідних для оптимізації виробництва можливостей контролера KRC2.

Переваги використання полягають в наступному:

- універсальність концепції управління лінійкою роботів KUKA - від роботів малої вантажопідйомності до потужних агрегатів, призначених для роботи у важких умовах, що забезпечує точність планування і взаємозамінність машин;

- модульна конструкція забезпечує створення цілого ряду пристосованих до індивідуальних потреб варіантів апаратного і програмного забезпечення;

- функція автоматичної конфігурації, що дозволяє здійснювати швидкий запуск роботів;

- ефективні інтерфейси і висока сумісність з використанням новітніх комп'ютерних технологій;

- технології і стандартні комп'ютерні компоненти забезпечують максимальний ресурс експлуатації при мінімальних термінах та витратах на технічне обслуговування;

- об'єднання контролерів в єдину мережу в реальному часі уможлиблює одночасну роботу декількох роботів на одному робочому місці.

Області застосування робот-маніпулятора Kuka KR 16-2: дугове зварювання, палетування, завантаження й розвантаження деталей, обробка деталей (рис. 10), вимірювання, складальні операції



Рис. 10. Застосування робота при обробці

### **3.2. Основні положення щодо програмування роботів KUKA [18]**

Концепція програмування роботів KUKA була випробувана протягом багатьох років, заснована на інтуїтивно зрозумілих, логічно структурованих бібліотеках, оптимальному контролі руху та оптимізації часу циклу для підвищення прибутковості виробництва. Виходячи з цієї концепції, підтримано оптимальне програмування нових та існуючих виробничих компонентів - для ефективного введення в експлуатацію та безперебійного виробничого потоку.

На етапі концептуального проектування можна використовувати додатки, які допомагають уникнути помилок при плануванні на ранній стадії.

3D-моделювання та офлайн - програмування допомагає визначити оптимальні шляхи руху та точки збору. Результати моделювання використовуються в автономному програмуванні для забезпечення швидкої та економічної реалізації програми в системі.

Стандартизоване та структуроване програмування роботів KUKA знижує витрати на технічне обслуговування та скорочує простой під час пошуку несправностей. Простота (готові програмні модулі та гнучкі концепції управління роботом з інтерфейсом PLC) використання пришвидшує адаптацію або розширення програм.

Запропоновано поради з концепції безпеки при налаштуванні технологічних пакетів KUKA Safe Operation, які дозволяють перевіряти та документувати конфігурацію, починаючи з площі комірки, робочих просторів та захищених просторів, включаючи різні інструменти та зменшену швидкість.

### **3.2.1. Підготовчі роботи з програмування роботів KUKA**

До попередніх робіт по програмуванню роботів KUKA відносять:

#### **1. Управління роботою робота:**

- зчитування та інтерпретація повідомлень контролера робота;
- вибір та установка режиму роботи робота, руху окремих осей робота;
- вибір координатних систем в роботі;
- переміщення робота в основній системі координат, в системі координат інструмента, в базовій системі координат;
- управління стаціонарним інструментом.

#### **2. Підготовка та запуск робота:**

- оволодіння принципами калібрування роботів;
- калібрування робота, навантаження робота та робочі інструменти;

## **РОЗДІЛ 4. ТЕСТУВАННЯ РОБОТА КУКА НА ТОЧНІСТЬ ТА ПОВТОРЮВАНІСТЬ**

### **4.1. Лазерний трекер FARO Laser Tracker як координатно-вимірювальна машина**

Лазерний трекер FARO Laser Tracker дозволяє з високою точністю вимірювати найпростіші геометричні фігури (точки, кола, площини, кону також можливо контролювати складні криволінійні поверхні методом порівняння з си, циліндри тощо), відстані, кути між ними, відхилення форми та взаємного розміщення. Також можливо контролювати складні криволінійні поверхні методом порівняння з CAD моделлю.

Принцип дії трекера FARO Laser Tracker – в режимі інтерферометра (рис. 11). Центральним елементом інтерферометра є напівпрозора пластинка, призначена для того, щоб розділити світловий промінь на два когерентні промені, а потім знову об'єднати їх, забезпечуючи інтерференцію. Світловий промінь від джерела світла падає на пластинку під кутом 45. Світло частково відбивається від пластинки, а частково проходить її. На певній віддалі від пластинки під прямим кутом до променів встановлені дзеркала. Відбившись від дзеркал, промені знову повертаються до пластинки, частково відбиваючись, а частково проходячи її. Проміжки між напівпрозорою пластинкою та дзеркалом називаються плечами інтерферометра. Екран, на якому формується інтерференційна картина встановлений навпроти одного із дзеркал, так, що джерело світла, два дзеркала і детектор утворюють хрест.

Світловий промінь розділяється на два. Один із променів відбивається від напівпрозорої пластинки і проходить до дзеркала (вгору на схемі). Відбившись від дзеркала, промінь повертається і проходить

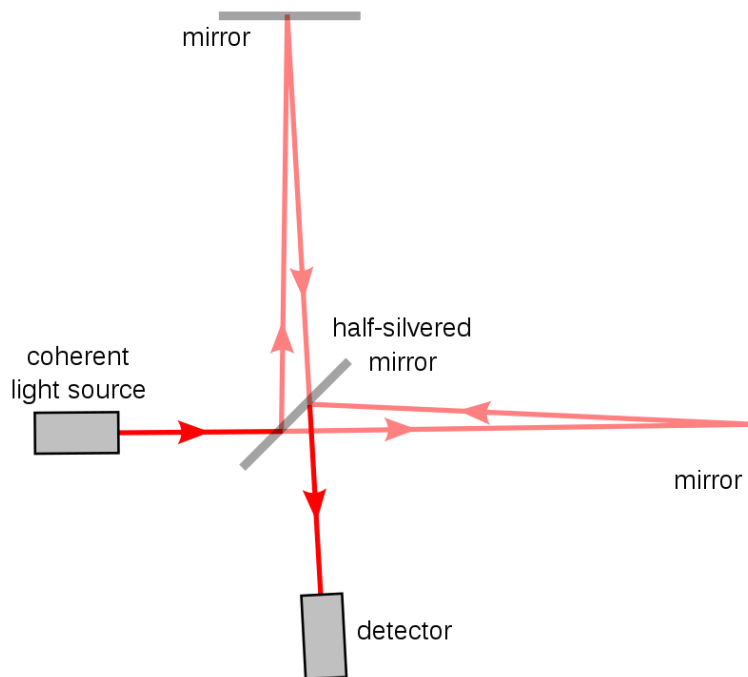


Рис. 11. Принцип дії інтерферометра: Mirror – дзеркало; coherent light source- когерентне джерело світла; half-silvered mirror напівсрібне дзеркало



Рис. 12. Координатно-вимірювальна машина - лазерний трекер Laser Vantage

через напівпрозору пластинку до детектора. Інший промінь проходить через напівпрозору пластинку до іншого дзеркала, відбивається від нього, повертається до пластинки і відбивається в напрямку детектора. Інтерференційна картина залежить від різниці оптичного шляху двох променів.

Принцип дії координатно-вимірювальних машин Лазерный трекер Laser Vantage полягає в наступному (рис. 12).

Особливості FARO Vantage:

- найлегший і простий у використанні трекер;
- велика робоча зона до 160 м в діаметрі;
- запатентована компанією FARO технологія TruARM спрощує процес вимірювання і не вимагає застосування допоміжної технології інтерферометра IFM для проведення високоточних вимірювань;
- поліпшені алгоритми відстеження метрологічної сфери дозволяють сканувати досліджуваний об'єкт навіть при швидких динамічних переміщеннях відбивача;
- використання двох інтегрованих камер з функцією MultiView дозволяє здійснювати роботу з найскладнішими об'єктами різної форми і не випускати з поля зору вимірювальну сферу при переміщенні;
- вбудована функція SmartFind відстежує місце розташування оператора і відновлює зв'язок при втраті променя;
- нова оптична система з більш широким кутом огляду дозволяє вимірювати об'єкти більшої площі;
- вбудований модуль WiFi дозволяє фіксувати показання і зберігати з максимальною швидкістю.

Функціональні характеристики лазерного трекера FARO Vantage:

- захист від води і пилу IP52 Vantage може вільно застосовуватися в виробничих умовах;



- TruADM: запатентований 5 покоління системи ADM забезпечує точність, необхідну для вирішення щоденних завдань;
- камери MultiView: запатентована вбудована система з 2-ма камерами може автоматично перейти до потрібної мети, і швидко знайти ціль, коли вона розташована не в правильній позиції;
- QuickComp: оптимізація вимірювань в певних діапазонах для збереження точності;
- енкодери TriMap: система потрібного зчитування з самокалібруванням. Більш швидкий сервіс в більш зручних умовах;
- функція пошуку SmartFind: швидкий і зручний пошук і фіксація на правильної мети.

Області застосування лазерного трекера FARO Laser Tracker Vantage:

1. Контроль великогабаритних виробів Завдяки великій робочій зоні (до 160 м з однієї установки) FARO Laser Tracker Vantage дозволяє контролювати великогабаритні деталі: фюзеляжі і крила літаків, корпуси суден і вагонів, кузова автомобілів, станини верстатів і пресів, великі Металоконструкції т.д. 2. Збірка великогабаритних виробів Винятковою особливістю Laser Tracker Vantage є те, що він здатний відстежувати положення вимірювальної сфери в режимі реального часу (в динаміці). Це дозволяє ефективно використовувати обладнання для складання виробів з кількох компонентів, наприклад, стикування крила літака з фюзеляжем. Завдяки використанню FARO Laser Tracker Vantage можна скоротити час на проведення подібних операцій в рази і відмовитися від виготовлення спеціальних дорогих вимірювальних шаблонів і контрольної оснастки.

3. Контроль складних криволінійних поверхонь Лазерний трекер Vantage може ефективно використовуватися для контролю складних криволінійних поверхонь, наприклад, робочих коліс гідротурбін, великогабаритних антен, фюзеляжів літаків і т.д. методом порівняння з САД моделлю. Використання цього методу дозволяє відмовитися від недешевих контрольних пристосувань.

Таблиця 4

<b>Вимір поперечно розміщеного еталону довжини</b>	
<b>Відстань, м</b>	<b>Похибка ADM, мм</b>
2	0,044
5	0,064
10	0,098
20	0,170
30	0,240
40	0,312
50	0,382
60	0,452
70	0,524
80*	0,594

Таблиця 5

<b>Вимір відстані до цілей, вибудованих в одну лінію</b>		
<b>Діапазон, м</b>	<b>Відстань, мм</b>	<b>Похибка, ADM, мм</b>
2-5	3	0,018
2-10	8	0,022
2-20	18	0,030
2-30	28	0,038
2-40	38	0,046
2-50	48	0,054
2-60	58	0,062
2-70	68	0,070
2-80	78	0,078

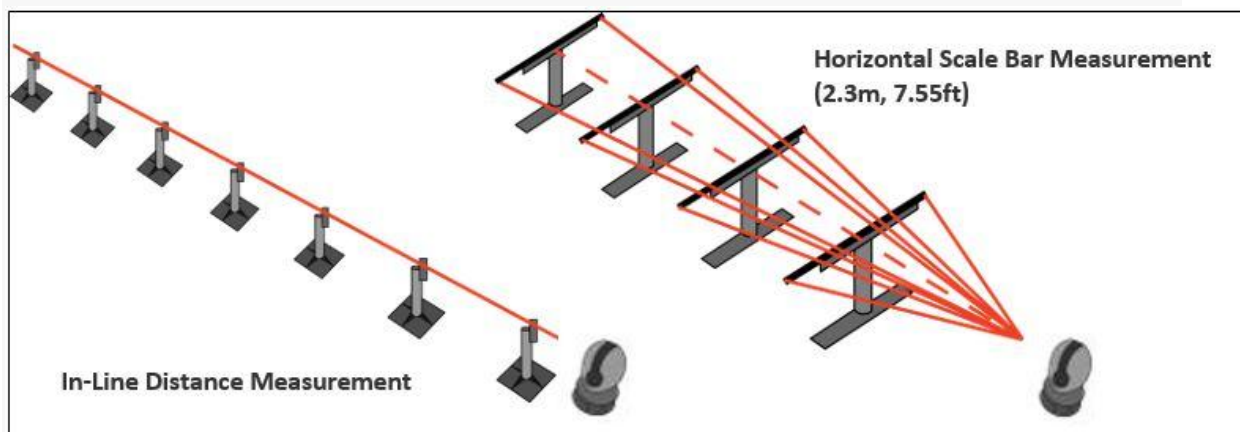


Рис. 13. Розміщення об'єктів-еталону: вибудовані в одну лінію; поперечно розміщені еталони довжини

## **4.2. Метод вимірювання точності та повторюваності позиціонування промислового робота Kuka KR 16-2 за допомогою технології лазерного вимірювання**

Процес тестування дозволяє більш точно визначити функціональну залежність між показниками, які отримують з датчиків у ступенях рухомості та поточним положенням робочого органу в вибраній декартовій координат. Відмінність значень передбачає внесення відповідних змін параметрів, що використовуються в програмному забезпеченні для позиціонування роботи, тобто калібрування необхідне для налагодження параметрів робота в алгоритмах обліку помилок позиціонування, які пов'язаних з ефектами кінематичного характеру та такими, як податливість в шарнірах і ланках робота, тертя, люфти тощо. Процес корекції полягає або в зміні значень цих параметрів в програмному забезпеченні при програмному перетворенні показників датчиків, або в апаратному перетворенні. Таким чином, одним із кроків калібрування полягає в зборі даних про позиціонування реального робота, на основі яких можна зіставляти значення на вході і виході моделі. Цей крок називають вимірювальним. Розглядаємо вимірювальну систему, яка накладає обмеження на взаємне розташування геометричних елементів, на робочому органі і в робочому просторі.

У роботі представлені положення організації лабораторних вимірювань позиціонування реального промислового робота Kuka KR 16-2 та порівняння з відповідними запрограмованими координатами. Інформацію про координати схвату робота в окремих точках при моделюванні отримували з використанням Kuka KR C1 Spot, який відповідальний за роботу програмного забезпечення робочого контролера RCS ( Robot Controller Software). Для вимірювання точності

Для використання Faro tracker під час проведення тестів, необхідно визначити базу (робочий об'єкт) і точку центру інструменту (ТСП - Tool Center Point) робота, оскільки точки, створені роботом, визначаються відстанню та обертанням системи ТСП відносно базової системи. База робота визначається положенням двох площин: першої - для призначення нульової точки та висоти в напрямку осі Z, а друга - для визначення напрямку осі X. Для полегшення роботи та отримання максимальної точності трекер базувався на так званій нульовій точці робота. Це визначена на заводі фіксована система координат, розміщена в центральній частині осі J1, на рівні землі.

Систему координат ТСП визначали після приєднання в якості номінального навантаження робота в 10 кг адаптера з сильним магнітом та вимірювальним зондом SMR.

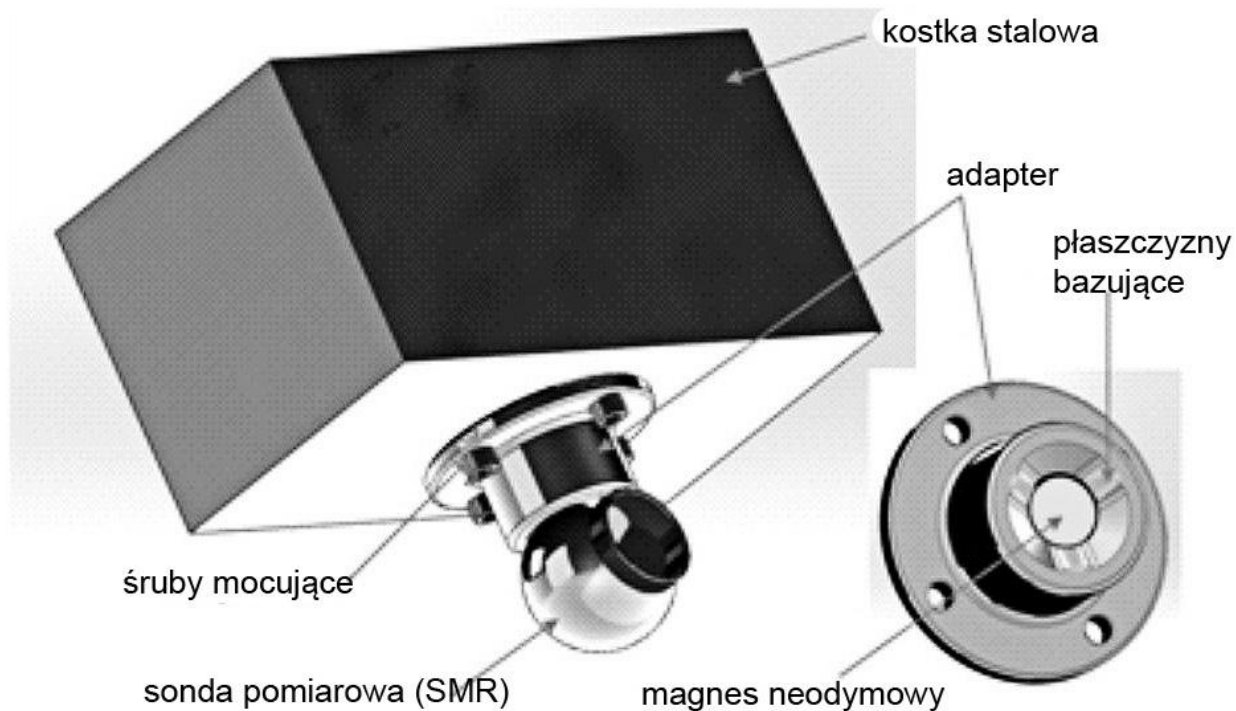


Рис. 14. Конструкція вимірювального приладу Faro Laser Tracker - Laser Tracker Ventage,

śruby mocujące –кріпильні гвинти;

sonda pomiarowa (SMR) – вимірювальний зонд (SMR);

magnes neodymowy– неодимовий магніт;

adapter – адаптер;

płaszczyzny bazujące – базові площини;

kostka stalowa – сталевий куб.

Далі роботом діставалися до довільних восьми точок та фіксувалися їх координати, що вводилися в програму Kuka Funke для визначення положення ТСР. Ця інформація фіксується в пам'яті для реальних і модельованих роботів. Значеннями, що визначають положення системи ТСР, є відстані та обертання відносно до 0 системи інструменту. Це заздалегідь визначена система координат, яка розташована в центральній частині осі J6, на рівні захвату робота, яка постійно рухається разом з ним.

На рис. 15 показано промисловий робот, положення якого змодельовані у програмі Robcad разом із системами координат ТСР.

Програма вимірювання та налаштування вимірювального пристрою.

Перед вимірюванням розробляється програма стабілізації робота, де враховується жорсткість фундаменту, що виключає появу помилок та розігрів впродовж 40 хвилин циклу всіх з'єднань та трансмісій роботів на максимально можливих переміщеннях по всіх осях в робочому просторі. Кімнатна температура під час випробувань було 22 градуси Цельсія.

Тестування проводяться на наступними напрямками:

точність роботи, що визначається як різниця між запрограмованими та фактичними координатами точки ТСР,

повторюваність робота, тобто обчислення радіуса сфери, в якій вимірювальні точки містяться під час подальших рухів робота.

Для цього використовуємо стандартні вимірювальні кубів з різною довжиною сторін, а точки вимірювання розміщувались у чотирьох вершинах цих кубів по діагоналі (рис. 16).

Система координат по відношенню до точок вимірювання повинна бути зафіксована та зберігаючи вісь паралельною головній системі координат промислового робота, як показано на рис .3.7.

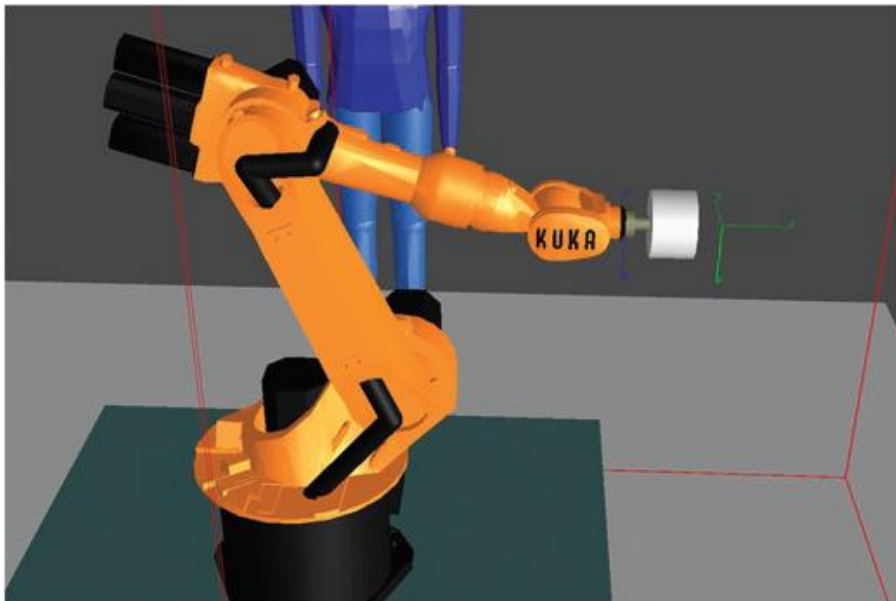


Рис. 15. Розташування систем координат промислового робота в програмі Robcad: TCP (позначено зеленим кольором) та базова система координат робочого об'єкту (позначена червоним кольором)

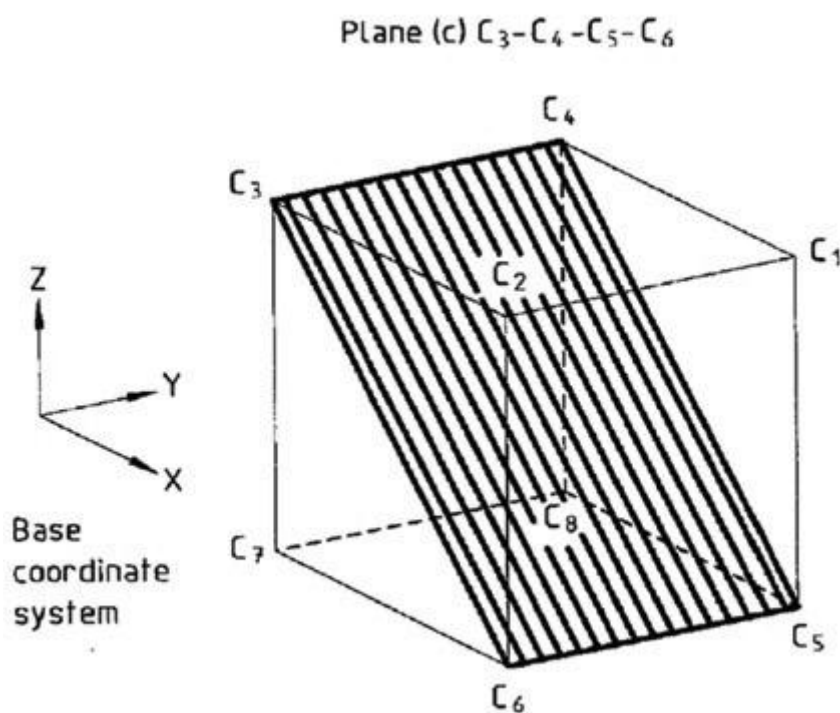


Рис. 16. Вимірювальна площина, визначена точками, розташованими у вершинах куба відповідно до стандарту PN-EN 9283 [27]



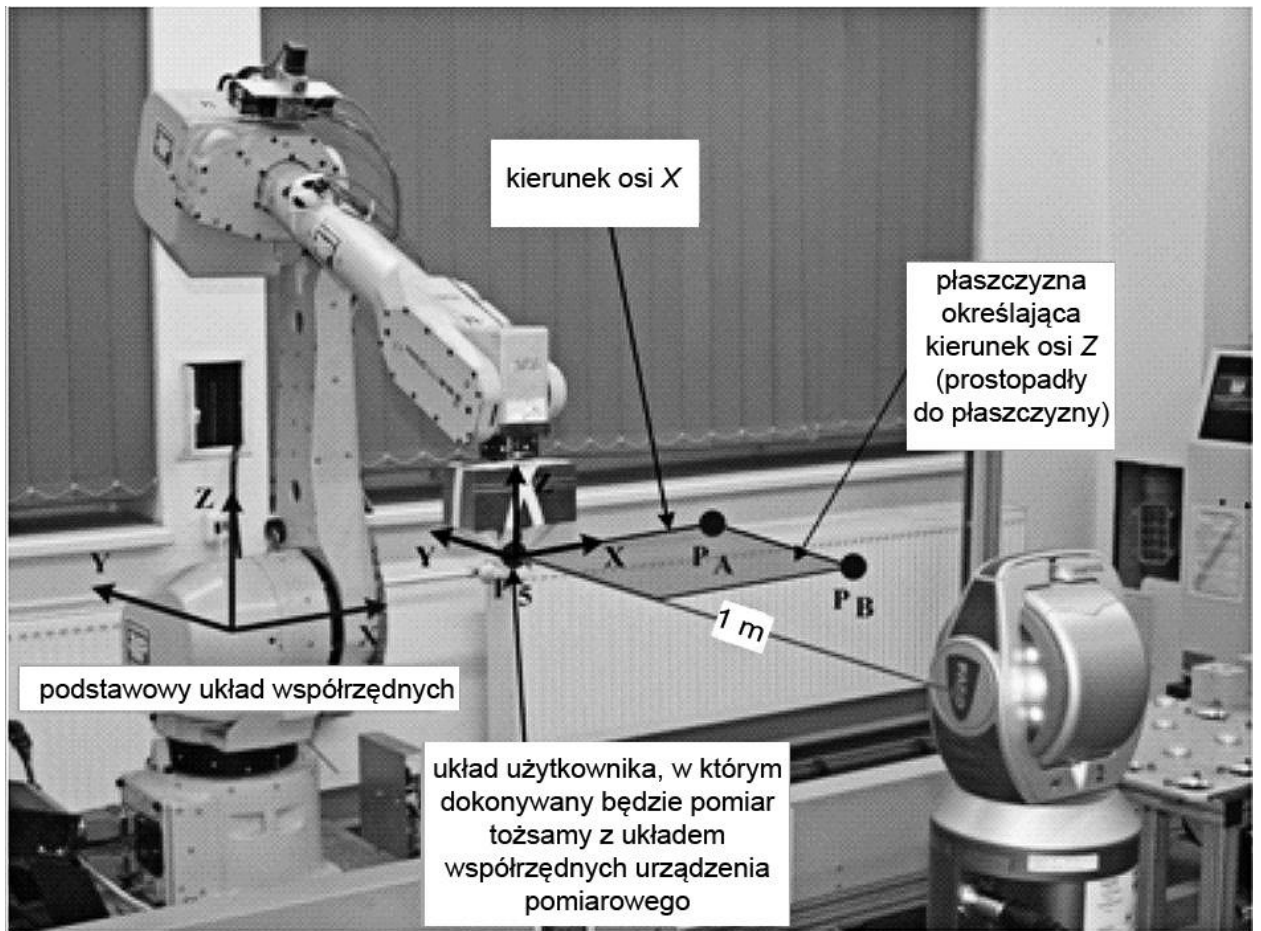


Рис. 17. Система координат вимірювального приладу Faro Laser Трекер Vantage

До рисунка:

kierunek osi – X Напрямок осі X

podstawowy układ współrzędnych – базова система координат

płaszczyzna określająca kierunek osi Z (prostopadły do płaszczyzny) –  
 площина, що визначає напрямок осі Z (перпендикулярна до площини)

układ użytkownika, w którym dokonywany będzie pomiar tożsamy z  
 układem współrzędnych urządzenia pomiarowego – аддитивна система, в  
 якій проводитимуться вимірювання, така ж, як і система координат  
 вимірювального пристрою

Під час вимірювань точності робота використовували куб зі стороною 1000 мм з точками вимірювання С4-С3-С6-С5. У першому застосовано використовували поворот інструменту на кут  $+ 20^\circ$  по осі Y (рис. 16), а в другому - поворот інструменту на кут  $+ 20^\circ$  по осях X і Y. Положення робота показано в імітованому та реальному середовищі в точках вимірювання С4-С3-С6-С5.

#### **4.3. Систематизація представлення результатів**

Для визначення точності  $AP_p$  позиціонування промислового робота доцільно використовувати електронну таблицю Excel 2007.

Для розрахунків було використовуємо рівняння (1.1 – 1.4):

Математичні залежності вводяться у вибрані комірки таблиці для обрахунків. Окрім того, вводяться наступні дані:

1. Положення ТСР (відносно системи координат механічного інтерфейсу).
2. Розташування точки ТСР щодо основної системи координат промислового робота.
3. Відстань точки ТСР від землі (площині трекара).
4. Вимірювання довжини сторони та положення трекара.

Після введення вищезазначених даних обчислюється положення вершин куба, в якому буде проведено вимірювання та визначені координати точок вимірювання С4-С3-С6-С5, які вводять в програму промислового робота.

Лист обчислених значень точності позиціонування промислового робота представлений на рис. 18. Для аналізу точності позиціонування робота для куба з довжиною сторони 1000 мм (рис.3.19), де помилки позиціонування були в окремих точках: С4 (APp1) 1,5 - 1,77 мм, С3 (APp2) 0,95 - 1,04 мм, С5 ( APp3) 1,96 - 2,36 мм і С6 (APp4) 1,59 - 1,97 мм, доцільно використовувати діаграму (рис. 3.11).

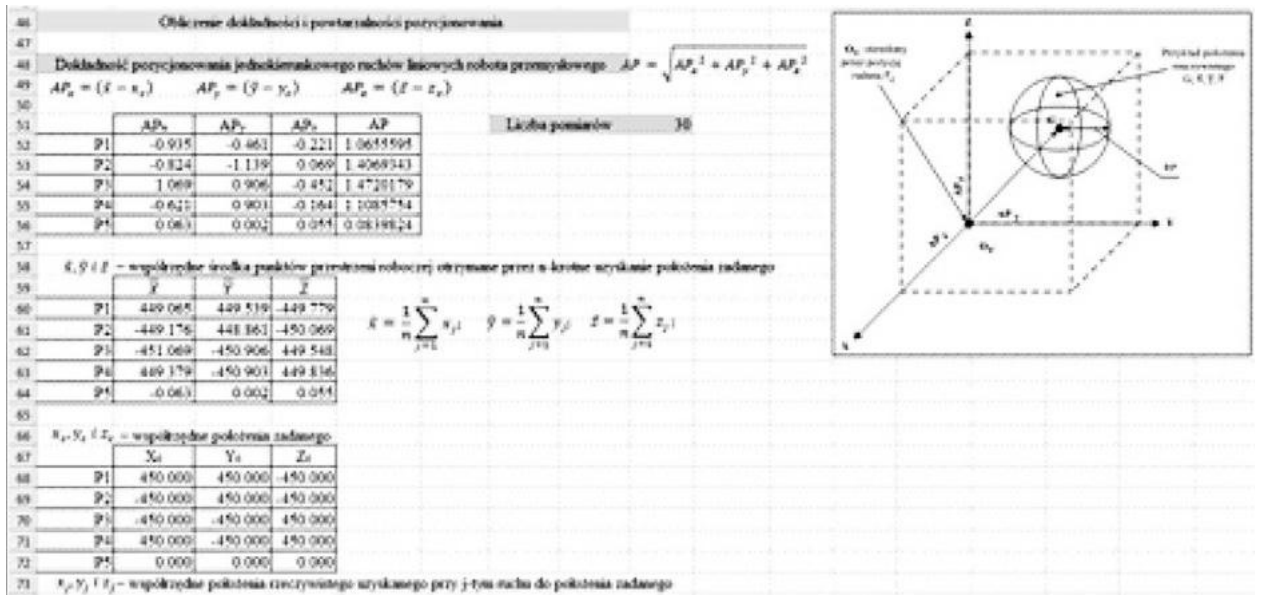


Рис. 18. Результати точності позиціонування промислового робота

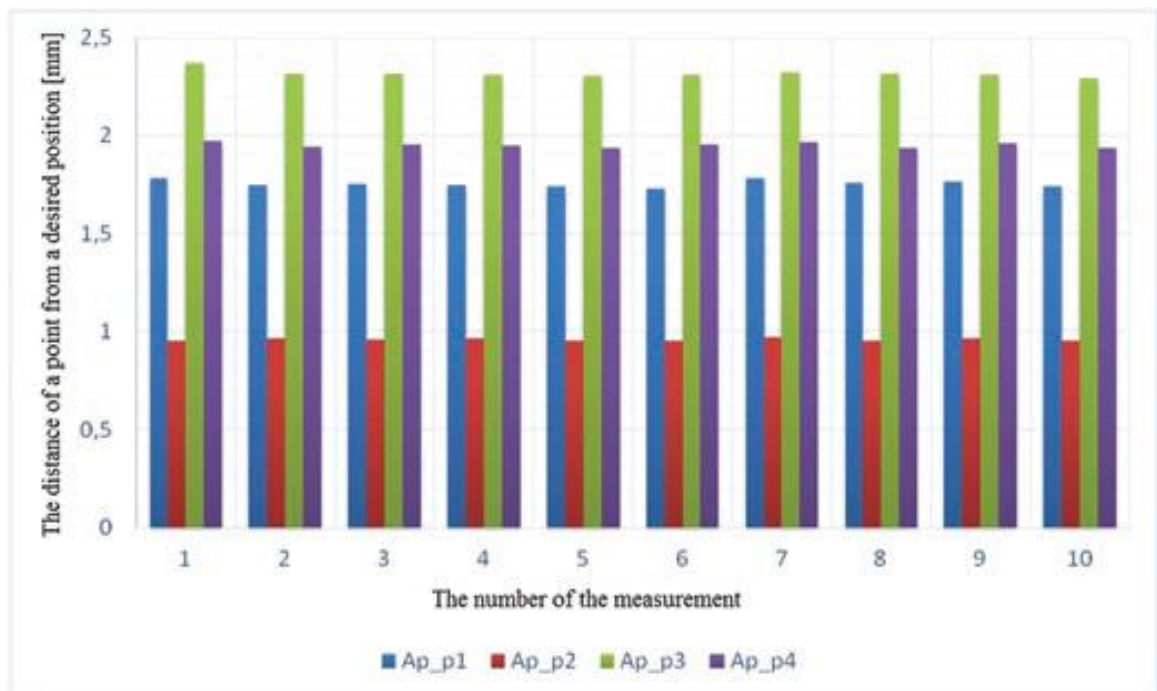


Рис. 19. Діаграма точності позиціонування кубових точок довжиною сторони 1000 мм, без обертання інструменту

У випадку точок C5 і C6 було показано дуже велике відхилення від заданого положення, і тут координати точок доведеться виправити.

Допустима середня точність робота Kuka KR 16-2, яка заявлена виробником, становить від 0,2 до 0,4 мм на відстанях від 600 до 1000 мм від об'єкту, відповідно при різних орієнтаціях камери. Таким чином, всі координати точок доведеться виправляти, а особливо у випадку точок C5 і C6, де було показано дуже велике відхилення від заданого положення

Тести на точність позиціонування робота можна також проводити для кубів з довжиною сторін 200 та 600 мм.

Підсумовуючи вищезазначені міркування, слід зазначити, що для правильного вимірювання точності та повторюваності позиціонування промислових роботів виконайте дії, описані в пункті 3, тобто:

- 1) створіть окремий файл для кожного вимірювання в САМ Measure 10 та Microsoft Excel,

- 2) генерувати звіт у програмному забезпеченні САМ Measure 10 (у форматі Excel),

- 3) вставляти отримані результати в аркуш вимірювань, який буде автоматично обчислюватися як точність позиціонування та значення повторюваності, а потім, відповідно до стандарту [1], підготуйте підсумковий звіт.

Результати випробувань на повторюваність позиціонування промислового робота, позначеного символом RPl, були отримані з використанням даних тестів на точність позиціонування. Повторюваність визначається як сфера з радіусом, рівним величині повторюваності (repeatability RPl), і центром з координатами, обчисленими з середніх координат окремих точок вимірювання у відповідності до співвідношень (1.5) – (1.8).

Лист обчислених значень повторюваності позиціонування промислового робота представлений на рис. 20.

На рис. 3.13. показані вибрані результати розрахунку повторення позиціонування розглянутого робота при досягненні окремих точок вимірювання.

75	Powtarzalność porycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych	$RP = \bar{l} + 3S_l$	0.040
76			
77	$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j$	= 0.01334	
78			
79	$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}$		
80			
81			
82	$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej uzyskanej przez n-krotne powtórzenie położenia zadanego,		
83			
84	$x_j, y_j, z_j$ – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy j-tym powtórzeniu położenia zadanego.		
85			
86	$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n - 1}}$	- rozrzut punktów	0.00879379
87			
88			

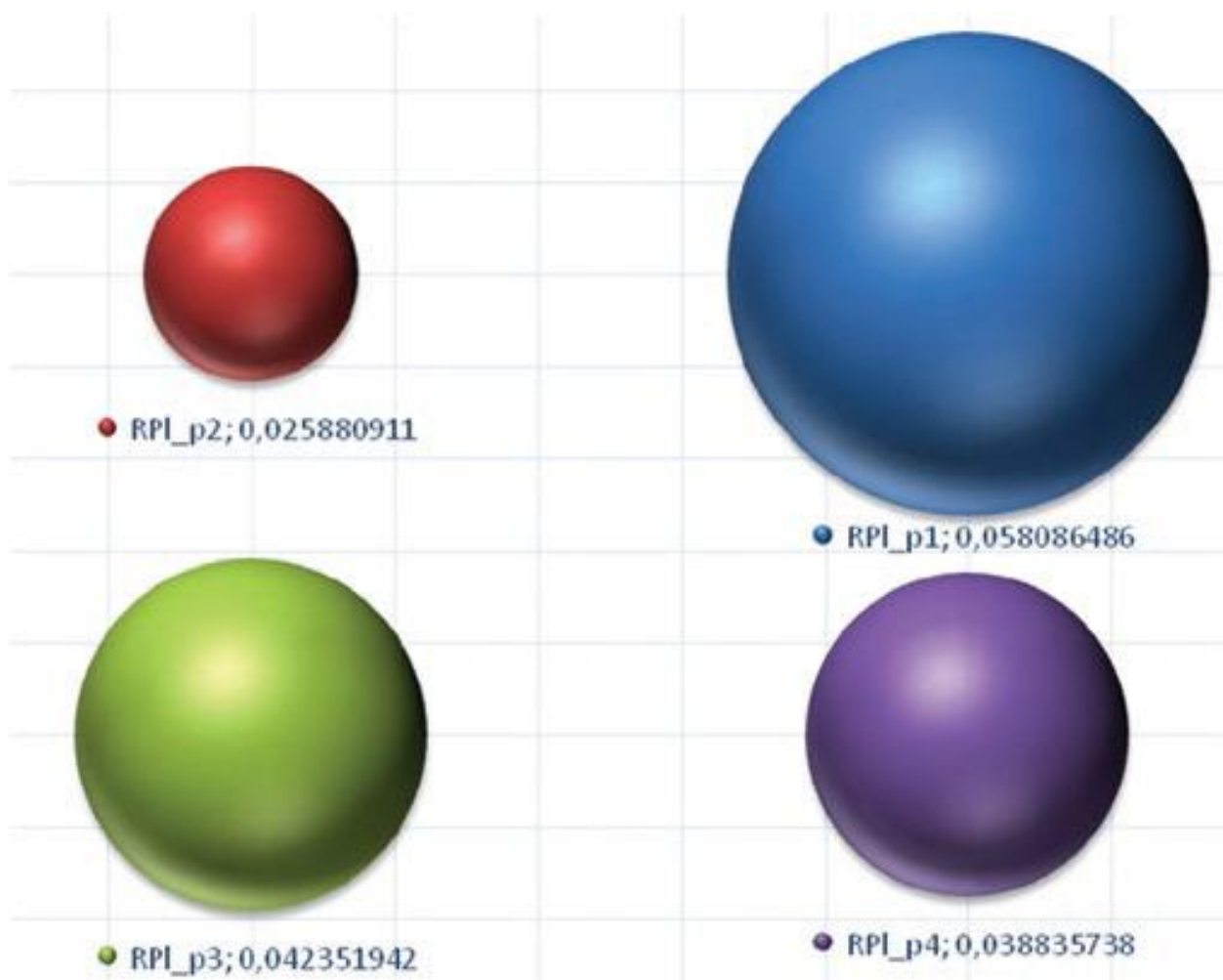


Рис. 21. Повторюваність позиціонування точок куба з довжиною сторони 1000 мм, з обертанням інструменту + 20 ° по осях X та Y.

**Висновки до розділу 4.** Програмування роботів в автономному середовищі значною мірою залежить від точного позиціонування їх елементів в реальному середовищі. Тому важливо, щоб вимірювання об'єктів у реальному робочому середовищі роботів проводились ретельно і точно. Це потребує точного визначення базової системи робочого об'єкта та системи точки ТСР. При створенні програм в offline/автономному середовищі слід враховувати його точність і повторюваність позиціонування, значення яких є випадковими та не прогнозованими. Як було показано, при вимірюванні точності досягнення набору вимірювальні точки, у випадку куба довжиною сторони 1000 мм, одна з точок була досягнута з похибкою 2,21 мм щодо встановленого положення. Це значення є неприйнятним і потребує виправлення під час онлайн-програмування.

Представлений метод вимірювання також дозволяє оцінити вплив таких факторів, як його навантаження або температура навколишнього середовища, на ці параметри руху робота.

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В результаті виконання дипломного бакалаврської роботи було виконано:

1. Аналітичний огляд промислових роботів, та розглянуто їх класифікацію;

2. Розглянуто основні положення щодо точності та повторюваності промислових роботів, отримані залежності, які описують точність та повторюваність робота в ангулярній сферичній системі координат;

3. Розглянуто характеристики робот-маніпулятора Kuka KR 16-2, алгоритми його програмування та способи досягнення точності позиціонування.

4. Розглянуто спосіб тестування робота Kuka на точність та повторюваність з застосуванням лазерного трекера Faro Laser Tracker як координатно-вимірвальна машина. Розглянуто характеристики точності в залежності від відстані вимірювання.

5. Виконано розрахунок точності робота Kuka KR 16-2, з урахуванням паспортних даних похибки 0,2 до 0,4 мм, встановлено, що на відстанях від 600 до 1000 мм від об'єкту, в точках C5 і C6 при вимірюванні еталону у формі куба, показує дуже велике відхилення від заданого положення, що потребує алгоритмів для корегування похибок.

Визначено параметри повторюваності позиціонування промислового робота Kuka KR 16-2 за еталонем точок куба з довжиною сторони 1000 мм, з обертанням інструменту  $\pm 20^\circ$  по осях X та Y.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gecko Tape That Lets Go/ Kristina Grifantini// Technology review. – 22.01.2009. – Режим доступу: <http://www.technologyreview.com/computing/21990/>
2. Агаєв, Ігор Анатолійович. Транспортуючі пневмоприводи маніпуляторів з вакуумними захоплюючими пристроями. 2018. Master's Thesis. Київ.
3. Библиотека технической литературы. URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/35/198.htm> (дата звернення: 12.02.2020).
4. В.И. Костюк, А.П. Гавриш, Л.С. Ямпольський, А.Г. Карлов. Промышленные роботы. – К.: Вища школа, 1985. – 359с.
5. В.І.Онофрійчук,; Г.М. Драпак. Класифікація захватних пристроїв у легкій промисловості. Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк, 2012. Випуск №37. С. 258-260.
6. Вакуумные захватные устройства [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://vektor-grupp.ru/articles/1156>.
7. Ганулич Л.А. Роботизированная технология швейных изделий. – М.: «Легпромышлениздат», 1990 – 200 с.
8. Захватные устройства промышленных роботов. Учебное пособие / К.А. Украженко, Ю.В. Янчевский, А.А. Кулебякин, А.Ю. Торопов. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2007. - 83 с.
9. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 392 с.
10. Магнитные захватные устройства [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.voith.at/en/Products/Magnet-crane/Plate-bundle-magnetic-grab/53-Kovac-Stahl>.
11. Орловский Б.В. Роботизация швейного производства. – К.: Техніка, 1986.- 159 с.



12. Павленко І.І. Структура промислових роботів. — Кіровоград.: КІСМ, 1998. — 100с.

13. Павленко, І. І.; Годунко, М. О. Структурні особливості будови та функціонування захватних пристроїв промислових роботів. 2007.

14. Павленко, І. І.; Мажара, В. А. Продуктивність функціонування двозахватних промислових роботів на позиціях допоміжних пристроїв. 2005.

15. Похілько, Л. К. Питання систематизації та оцінювання фрикційних захватних пристроїв. Вісник СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія, 2013, 137: 308-314.

16. Спину, Г. А. Промышленные роботы. Конструирование и применение: учеб. пособие/Г. Спину.-2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Выща шк., 1991.-311с.

17. Юревич, Е.И. Основы робототехники./ Е.И. Юревич, СПб: БХВ Петербург, 2005.

18. KUKA.PLC mxA. One interface for all.

Режим

доступу:

<http://fs1.gongyeku.com/data/default/201212a/20121217160406275.pdf>

19. Режим доступу:

<https://www.fanuc.eu/ua/ru/%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D1%8B>

