

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО  
(ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**  
**за освітньо-науковою програмою «Магістра»**  
**зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»**  
**на тему: «Наземний роботизований комплекс,**  
**оснащений системою маніпуляторів»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи МВ-91мн

Вакуленко Сергій Юрійович \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

д.т.н., професор,

Струтинський Василь Борисович \_\_\_\_\_

Консультант розділів:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Рецензент:

д.т.н., професор,

Петраков Юрій Володимирович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра конструювання машин**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-наукова програма «Магістр»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Вакуленко Сергію Юрійовичу**

1. Тема дисертації «Наземний роботизований комплекс, оснащений системою маніпуляторів», науковий керівник дисертації Струтинський Василь Борисович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «12» березня 2021 р. № 814-С.

2. Термін подання студентом дисертації: травень 2021р.

3. Об'єкт дослідження: система маніпуляторів наземного роботизованого комплексу.

4. Вихідні дані: технічні характеристики роботизованого комплексу згідно технічного завдання на аванпроект «Роботизований комплекс ЦНДІОВТ», інформація про наявні подібні іноземні проекти.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Огляд актуальних технічних рішень. 2. Проектування циклоїдного редуктора. 3. Проектування наземного роботизованого комплексу. 4. Інноваційна діяльність за темою дисертації.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: плакат з оглядом аналогів АЗ, кінематика системи маніпуляторів АЗ, робочий простір системи маніпуляторів АЗ, складальне креслення циклоїдного редуктора АЗ, аналіз напружень в редукторі АЗ, схема комплексу АЗ,

загальний вигляд АЗ, плакат по математичній моделі АЗ, плакат по патенту АЗ, плакат про проект Sikorsky Challenge АЗ.

7. Орієнтовний перелік публікацій: патент України на винахід та корисну модель.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання: листопад 2020р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд існуючих технічних рішень	Листопад 2020р.	
2	Створення плакатів, інформаційний пошук	Грудень 2020р.	
3	Проектування циклоїдного редуктора	Січень 2021р.	
4	Проектування наземн. роботиз. комплексу	Лютий 2021р.	
5	Розробка моделей та техн. документації	Лютий 2021р. – Березень 2021р.	
6	Оформлення дисертації	Квітень 2021р.	
7	Попередній захист	Травень 2021р.	
8	Захист перед ДЕК	Травень 2021р.	

Студент \_\_\_\_\_ Вакуленко С.Ю.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ Струтинський В.Б.

## **Анотація**

Пояснювальна записка магістерської дисертації на тему «Наземний роботизований комплекс, оснащений системою маніпуляторів» має **145 аркушів** формату А4, містить **84 ілюстрації, 4 таблиці, 5 додатків**, що містять теоретичні відомості про сучасні мобільні роботи, проектування циклоїдного редуктора та перевірочний розрахунок, проектування системи маніпуляторів та її математичної моделі. При написанні роботи використано **53 джерела** інформації.

**Графічна частина складається з 8 аркушів формату А3: 1. Плакат з оглядом аналогів; 2. Складальне креслення циклоїдного редуктора; 3. Аналіз напружень в редукторі; 4. Схема комплексу; 5. Загальний вигляд; 6. Плакат по математичній моделі; 7. Плакат по патенту; 8. Плакат про проект Sikorsky Challenge;**

**2 аркушів формату А1: 1. Кінематика системи маніпуляторів; 2. Робочий простір системи маніпуляторів.**

Метою роботи є розробка системи маніпуляторів, призначеної для наземного роботизованого комплексу.

Ключові слова: наземний роботизований комплекс, маніпулятор, система маніпуляторів, робот-сапер, циклоїдний редуктор.



## **Аннотация**

Пояснительная записка магистерской диссертации на тему «Наземный роботизированный комплекс, оснащённый системой манипуляторов» имеет **145 листов** формата А4, содержит **84 иллюстрации, 4 таблицы, 5 приложений**, содержащих теоретические сведения о современных мобильных роботах, проектировании циклоидного редуктора и проверочном расчёте, проектировании системы манипуляторов и её математической модели. При написании работы использованы **53 источника** информации.

**Графическая часть состоит из 8 листов формата А3: 1. Плакат с обзором аналогов; 2. Сборочный чертеж циклоидного редуктора; 3. Анализ напряжений в редукторе; 4. Схема комплекса; 5. Общий вид; 6. Плакат по математической модели; 7. Плакат по патенту; 8. Плакат о проекте Sikorsky Challenge;**

**2 листов формата А1: 1. Кинематика системы манипуляторов; 2. Рабочее пространство системы манипуляторов.**

Целью работы является разработка системы манипуляторов, предназначенной для наземного роботизированного комплекса.

Ключевые слова: наземный роботизированный комплекс, манипулятор, система манипуляторов, робот-сапер, циклоидный редуктор.

## **Abstract**

The explanatory note of the master's thesis project on the topic "Ground robotic complex equipped with a system of manipulators" has **145 sheets** of A4, contains **84 illustrations, 4 tables, 5 appendices** containing theoretical information about modern mobile robots, design of cycloid gearbox and testing calculation, design of the system of manipulators and its mathematical model. When writing the paper, **53 sources** of information were used.

**The graphic part consists of 10 sheets of A3 format: 1. Poster with a review of analogues; 2. Assembly drawing of a cycloid reducer; 3. Analysis of stresses in the gearbox; 4. Scheme of the complex; 5. General view; 6. Poster on the mathematical model; 7. Poster about the patent; 8. Poster about the Sikorsky Challenge project;**

**2 sheets of A1 format: 1. Kinematics of the manipulator system; 2. Working space of the manipulator system.**

The aim of the work is to develop a system of manipulators designed for ground-based robotic complex.

Key words: ground robotic complex, manipulator, system of manipulators, robot sapper, cycloid reducer.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

На тему: «Наземний роботизований комплекс,  
оснащений системою маніпуляторів»

## Зміст

Вступ	9
1. Огляд актуальних технічних рішень	10
1.1. Об'єкти, над якими проводитимуть роботи маніпулятори	10
1.2. Найбільші виклики при побудові сучасних роботів	19
1.3. Патентний пошук за темою проекту	22
1.4. Огляд сучасних мобільних роботів	33
1.5. Оцінка рухових можливостей дворуких роботів	46
2. Проектування циклоїдного редуктора	56
2.1. Принцип роботи циклоїдного редуктора	56
2.2. Проектування циклоїдного редуктора	60
2.3. Аналіз напружень редуктора та окремих деталей	66
3. Проектування наземного роботизованого комплексу	76
3.1. Схемне рішення та принцип роботи комплексу	76
3.2. Кінематика системи маніпуляторів	77
3.3. Математична модель системи маніпуляторів	88
3.4. Проектування конструкції шасі та опис системи керування	105
3.5. Проектування модуля з'єднання шасі та маніпуляторів	108
3.6. Проектування конструкції модулів шарнірів	113
4. Інноваційна діяльність за темою дисертації	117
4.1. Опис мобільного робота, на який отриманий патент України	117
4.2. Представлення проекту на конкурс оборонних технологій	120
Sikorsky Challenge	
Висновки	123
Перелік посилань	124
Додатки	131

					<i>МВ-9101мн.МД000.000 ПЗ</i>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Вакуленко С.Ю.			<b>Пояснювальна записка</b>	Літ.	Арк.	Акрюшів
Перевір.		Струтинський В.Б.					8	145
Реценз.						<i>КПІ ім. І.Сікорського, ММІ</i>		
Н. Контр.								
Затверд.								

## Вступ

Метою роботи є розробка системи маніпуляторів, призначеної для наземного роботизованого комплексу. Це є актуальною науково-технічною задачею. Основна сфера використання комплексу – робота на дистанції з небезпечними об'єктами, такими як міни, вибухівка, токсичні та радіоактивні об'єкти тощо.

В теперішній час для працівників Державної служби України з надзвичайних ситуацій та Збройних сил України є актуальною задачею отримати на озброєння наземний роботизований комплекс, однією з функцій якого буде пошук та нейтралізація вибухонебезпечних об'єктів різного походження. Для вирішення даної задачі найкраще підійде наземний мобільний робот з системою антропоморфних маніпуляторів. На даний момент відсутні прийняті на озброєння та широке використання роботів даного типу, розглядається до покупки дорогі іноземні роботи.

Для виконання проекту та досягнення поставленої мети поставлені та вирішені задачі: провести аналіз існуючих конструкцій та вузлів, розробити схемне рішення наземного роботизованого комплексу, розробити окремі вузлів (зокрема – циклоїдний редуктор), провести необхідні розрахунків та перевірки, створити технічну документацію, створити математичну модель системи маніпуляторів, розробити інноваційне технічне рішення (та отримати патент на винахід та корисну модель), представити розробки на конкурсі стартапів Sikorsky Challenge.

## **1. Огляд актуальних технічних рішень**

### **1.1. Об'єкти, над якими проводитимуть роботи маніпулятори**

В даному розділу проведений аналіз та класифікація ряду об'єктів, роботу над якими буде проводити саперний наземний роботизований комплекс. Основними джерелами вибухонебезпечних об'єктів є: замінування в населених пунктах в результаті терористичних актів, залишки різних крупних боєприпасів в ґрунті, заміновані ділянки місцевості як результат бойових дій в окремих районах Луганської та Донецької областей, небезпечні інциденти на складах боєприпасів та ін.

Наприклад, за інформацією Головного управління ДСНС України у м. Київ, працівниками служби за період січень-серпень 2018р. було вилучено та нейтралізовано 1251 одиницю вибухонебезпечних об'єктів, що залишилися в ґрунті з часів Другої світової війни [1].

За даними Міністерства оборони України, на Донбасі через ураження мінами постраждали 833 цивільні особи; загалом приблизно 16 тисяч км<sup>2</sup> території Луганської та Донецької областей несуть мінну небезпеку [2].

При інцидентах на складах боєприпасів, наприклад вибухах або пожарах, найчастіше за все створюється зона, наповнена боєприпасами, що є пошкодженими та не розірвалися. Зокрема, після погашення пожежі арсеналу біля м. Ічня 10 жовтня 2018р. рятувальниками було вилучено 3641 вибухонебезпечний об'єкт з території 39 населених пунктів навколо епіцентру [3].

З метою класифікації розділимо на групи вибухонебезпечні об'єкти, в нейтралізації яких може бути використаний даний наземний роботизований комплекс.

Наземна міна - вибуховий пристрій, що може бути встановлений на поверхні землі, біля поверхні або під землею. За призначенням бувають протипіхотні та протитранспортні. Протипіхотні міни - боєприпаси, які

використовують для ураження людей або груп людей вибухом та уламками (рис. 1.1).



а)



б)

Рис. 1.1. Протипіхотні міни марки ПМН-1 (а) та ОЗМ-72 (б)

Протипіхотні міни зазвичай пофарбовані в зелений, коричневий або інші кольори, що легко зливаються з поверхнею землі. Деякі протипіхотні міни можуть при спрацюванні підстрибувати на висоту 60см – 1м та вибухати там. Міни можуть бути встановлені так, що навіть сапери не зможуть нейтралізувати їх детонатори. Часто міни мають самоліквідатор, що детонує боєприпас через певний час або при певних значеннях навколишньої температури, вологості.

Протитранспортні міни - боєприпаси, що використовують для знищення або виведення зі строю танків, бронетранспортерів, автомобілів та ін. Часто бувають встановлені в парі з протипіхотними мінами над ними або під ними. Протитанкова міна в зборі має корпус та підривач (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Протитанкова міна марки ТМ-57

Протитранспортні міни можуть бути встановлені без можливості деактивації, тобто сапери не зможуть нейтралізувати детонатор міни. Як і протипіхотні міни, іноді оснащені самоліквідатором.

Окрім мін, загрозу становлять також інші боєприпаси різного походження. Найбільш часта категорія – це боєприпаси, що не розірвалися або були покинуті. Дані боєприпаси були використані за призначенням, але з певних причин не спрацювали, до того ж не спрацював або був відсутній самоліквідатор. Основна небезпека при роботі з ними полягає в тому, що вони можуть здетонувати у випадковий момент від найменшого зовнішнього впливу. До даної категорії входять снаряди для артилерії та мінометів, авіаційні бомби, запали, касетні боєприпаси та їх частини, ракети та патрони. Зазвичай, територія масивних бойових дій буває усяяна такими боєприпасами, що не розірвалися.



Мінометний снаряд - снаряд каплевидної форми з оперенням для стрільби з міномета (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Типові артилерійські міни

Даний снаряд, що не розірвався, частково занурений в ґрунт, а його хвостова частина знаходиться назовні. Боєприпас може вибухнути від доторку або найменшого коливання ґрунту, що бувають викликані машиною, людиною або твариною, що рухаються біля нього.

Артилерійський снаряд – снаряд, призначений для стрільби зі стаціонарного або мобільного артилерійського озброєння. Артилерійські боєприпаси, що не вибухнули, несуть велику небезпеку, тому що їх детонатор вже знаходиться в бойовому положенні (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Фугасний артилерійський снаряд, що лежить на ґрунті

Авіабомби - дуже небезпечні боєприпаси, тому що містять великий об'єм вибухівки, мають великий радіус ураження уламками та чутливі детонатори. Ще до цього часу в землі знаходять авіаційні бомби часів Другої світової війни (рис. 1.5).

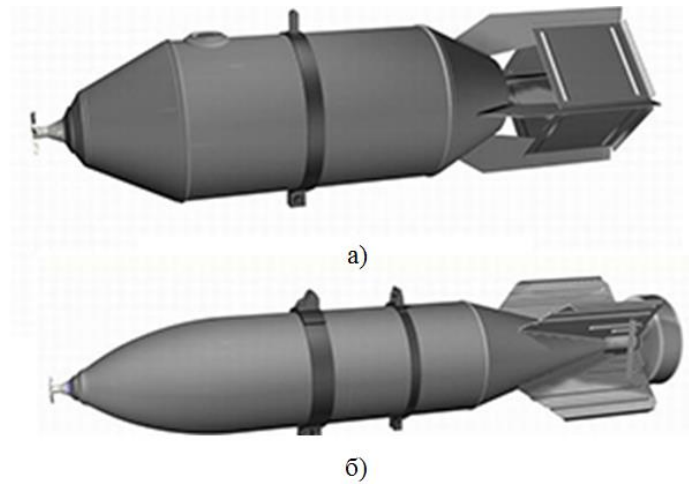


Рис. 1.5. Авіабомби марок ФАБ-500 (а) та ФАБ-250 (б)

Авіаційні бомби використовують для ураження військових та промислових об'єктів, населених пунктів та місць скупчення військ фугасним впливом та уламками, що рухаються з великою швидкістю. Як правило, бомба має два та більше детонаторів, приведених в бойове положенні та які є чутливими до зовнішнього впливу.

Касетні боєприпаси – складаються з «касетних елементів»: невеликих мін, бомб або інших уражуючи елементів у вигляді голок, шариків та ін. Ці касетні елементи бувають розкидані на великій території хаотично, є погано помітними через маленький розмір. Іноді боєприпаси мають самоліквідатор та вибухають через деякий час (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Один із зарядів касетного боєприпасу

Ручні гранати – боєприпаси малого розміру, що використовуються піхотою для ураження супротивників уламками та ударною хвилею (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Ручна граната моделі Ф-1

Запали та детонатори – це складові елементи боєприпасів, котрі можуть зустрічатися окремо від них та несуть невелику загрозу вибуху (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Запали артилерійських снарядів

Патрони - боєприпаси для стрільби зі стрілецької зброї, які використовують, щоб травмувати або вбити супротивника. Не зважаючи на малий розмір, куля може травмувати або вбити людину, зберігаючи свою кінетичну енергію, на відстані до 2 кілометрів. Категорично забороняється розбирати, наносити удари по патронам або кидати у вогонь – бо неможливо передбачити, в якому напрямі при детонації полетить куля (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Гвинтівкові патрони

Ракети – великі за габаритами та небезпечні боєприпаси, які містять значну кількість вибухівки, мають великий радіус ураження та чутливі детонатори. Частіше за все ракета, що не розірвалася, занурена глибоко в землю, а її хвостова частина знаходиться назовні (рис. 1.10).





а)



б)

Рис. 1.10. Ракета залпової системи «Ураган» (а),  
ручний гранатомет РПГ-7 та ракети для нього (б)

Ракети часто трубчастої форми та великі за розміром (до декількох метрів в дожину). Можуть вибухнути від невеликого коливання ґрунту, викликаних машиною, твариною або людиною, що рухаються біля неї.

Покинуті боєприпаси - це боєприпаси в нормальному стані, які учасники конфлікту залишили на позиціях після бойових дій. Покинутими можуть виявитися навіть великі тайники зі зброєю або склади боєприпасів (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Приклад залишених в хаотичному стані артилерійських снарядів

Саморобні вибухові пристрої – виготовлені в кустарних умовах терористами пристрої, що становлять велику небезпеку, оскільки можуть мати будь-яку форму (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Приклад саморобного вибухового пристрою

Ключові ознаки саморобного вибухового пристрою:

- Повсякденні речі, такі як чемодани, пакети, коробки – залишені в громадських місцях без нагляду;
- Можлива зовнішня схожість на боєприпаси;
- Дроти, мотузки, скотч, що стирчать з предмету;
- Наявність в приладі акумуляторів, антени, часового або електронного таймера, мобільного телефону та ін.;

- Підозрілі звуки, що видає прилад: цокання годинника, писк, сигнали через проміжки часу та ін.;
- Різкий запах хімічних матеріалів;
- Розташування в дверях, вікнах, на деревах, площах та закріплення за допомогою скотчу, проволочки, шнурів та ін.

Міна-пастка – невеликий вибуховий пристрій, замаскований під безпечний на вигляд предмет, наприклад коробку, іграшку, сигаретну пачку, телевізор тощо. Пристрій спрацьовує несподівано, коли людина його торкається. Частіше за все встановлюється в будівлях серед предметів повсякденного вжитку (рис. 1.13) [4].



Рис. 1.13. Міна-пастка, в якій вибухівка замаскована під коробку цукерок

## 1.2. Найбільші виклики при побудові сучасних роботів

В даному розділі описані головні виклики сучасності, що стоять перед конструкторами роботів по всьому світу в продовж наступних 5-10 років [5, 6, 7, 8].

Проводяться спроби використання та виготовлення нових матеріалів, що будуть багатофункціональними. Такі експериментальні зразки мають забезпечувати рух механізму, відчуття навколишнього середовища, зберігання та збір енергії для ефективної роботи, адаптування та самовідновлення тощо. Для отримання даних матеріалів потрібне поєднання методик виготовлення на мікро- та макрорівні та проведення великої

кількості досліджень. Прикладами таких розробок є штучні м'язи, гнучкі роботи, створення композитних деталей (деталь складається з шарів та вкраплень м'яких та твердих, струмопровідних та діелектричних матеріалів) та ін.

Природа завжди давала натхнення для конструкторів, тому що багато інженерних задач вже були вирішені окремими живими організмами. Тому проводяться розробки біоінспірованих роботів та біогібридних роботів, що мають своїми складовими частинами живі організми, як наприклад натреновані бактерії. Це дозволить реалізувати ефективні та надійні приводи для роботів із вбудованими сенсорами, самовідновленням та ін.

Через збільшення попиту від дронів, електрокарів та відновлюваних джерел енергії на отримання та використання енергії – виникає потреба реалізувати отримання енергії машинами з навколишнього середовища (енергія світла, вібрацій, механічна тощо), ефективного зберігання електроенергії в акумуляторах нових типів (паливні елементи та суперконденсатори на заміну нікель-металевим та літій-іонним акумуляторам), перетворення та доставка енергії до приводів з мінімальними втратами (навіть без використання дротів), енергоефективність приводів за рахунок конструкції та систем керування.

Альтернативою для традиційних роботів, що виконують вузький ряд задач, також пропонують використання роїв менших примітивних роботів, що можуть з'єднуватися в різноманітні конфігурації. Дані малі роботи повинні бути скоординовані системою штучного інтелекту, що збиратиме та аналізуватиме покази сенсорів від окремих представників рою та видавати їм команди. Близькими напрямками розробки можуть бути зграї роботів, що не матимуть централізованого керування, та роботи, структура яких не буде гомогенною.

Найчастіше за все мобільних роботів розробляють для роботи в місцях, де не зможе пройти людина, таких як зони стихійного або техногенного лиха,



водні глибини, космос та ін. Для оперування в даних складних умовах роботи повинні мати можливості до адаптування, дослідження та навігації в середовищах, що не мають мапи, дуже неупорядковані або навіть ворожі. Дані функції потребують надання системам керування певної автономії та вміння постійно навчатися в процесі виконання операцій, мати можливість розуміти та виконувати команди високого рівня від операторів, а конструкція робочих органів має бути переналагоджуваною та ремонтпридатною.

Для керування роботами також можуть бути використані нейрокомп'ютерні інтерфейси, що зараз активно розробляються в медичній сфері для відновлення функцій втрачених кінцівок, слуху та бачення у людей з інвалідністю. Дані розробки дуже спростять як отримання інформації з керованого робота, так і відправку керуючого сигналу на маніпулятори за рахунок прибирання пристроїв-посередників з функціями вводу-виводу інформації.

Додатковою вимогою є соціальні взаємодії роботів з операторами та сторонніми людьми. Наприклад, аудіосистеми для спілкування та попередження людей про небезпеку; дизайн робота не має викликати страху та не має нести небезпеку роботою своїх вузлів. При тривалій успішній роботі може виникати прив'язаність операторів та персоніфікації ними роботів.

Окремою проблемою є занадто сильна опора на автоматизацію та роботизацію. При полегшенні та безпечності роботи в небезпечних середовищах різного сорту оператори можуть втрачати зв'язок з реальністю, виконувати зазвичай ризиковані вчинки, втрачати свої навички як спеціаліст. Обов'язково має бути побудована достатня система захисту електронного обладнання від взлому та зовнішнього несанкціонованого впливу, а також міри безпеки для екстреного виключення роботів, що вийшли зі строю та почали нести небезпеку людям навколо.

### 1.3. Патентний пошук за темою проекту

Для полегшення пошуку та систематизації інформації при роботі над проектом та патентом на винахід та корисну модель були обрані визначені індекси УДК та МПК, що близькі за тематикою.

- УДК - Універсальна десяткова класифікація (Universal Decimal Classification) – індекс, що був розроблений Консорціумом УДК для упорядковування створеної людьми інформації.

Проект Наземний роботизований комплекс, оснащений системою маніпуляторів, належить до категорії «Інженерна справа» -> «Військова техніка» -> «Військово-інженерне обладнання та роботи по інженерному забезпеченню» -> «Знешкодження боєприпасів, що не розірвалися, знищення старих. Знешкодження бомб» УДК 623.67 [9, 10].

- МПК - Міжнародна патентна класифікація (International Patent Classification) – система, що була введена Страсбурзькою угодою для класифікації патентів та корисних моделей.

Проект належить до груп F41H 11/00 «Організація оборони. Захисні пристрої. Засоби знешкодження та знаходження наземних мін» та B25J 5/00 «Маніпулятори, встановлені на колеса або шасі». Були обрані дві категорії для пошуку пристроїв: зі східним призначення (пошук вибухівки та розмінування) та зі східною конструкцією (маніпулятори, встановлені на самохідному шасі) [11, 12].

Результати патентно-інформаційного пошуку:

- Спосіб розмінування місцевості від вибухонебезпечних предметів, патент UA 81356. Дана корисна модель створена для опису роботи алгоритму виконання операцій по розмінуванню, підвищення ефективності процедури в різних умовах, внесення інформації в єдиний інформаційний простір. Підвищення ефективності роботи робота-сапера досягається за рахунок того, що визначають за алгоритмом тип вибухонебезпечного предмету з бази даних, обирають оптимальний спосіб нейтралізації для даного пристрою.

Після успішного розмінування, вводять потрібну інформацію в єдине інформаційне поле, що дозволяє вести облік замінованих та розмінованих ділянок в т.ч. для інших споживачів [13].

- Мобільний робот, патент RU 2487007 С1. Даний мобільний робот має платформу, що встановлене на засобі пересування, прилад для виявлення перешкод на шляху, маніпулятор та систему керування. Маніпулятор виконаний у вигляді ланок, з'єднаних шарнірами з керованими приводами. На кінці маніпулятора встановлений прилад для виявлення перешкод. Можливе призначення робота – для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, пошуку вибухонебезпечних пристроїв (рис. 1.14).

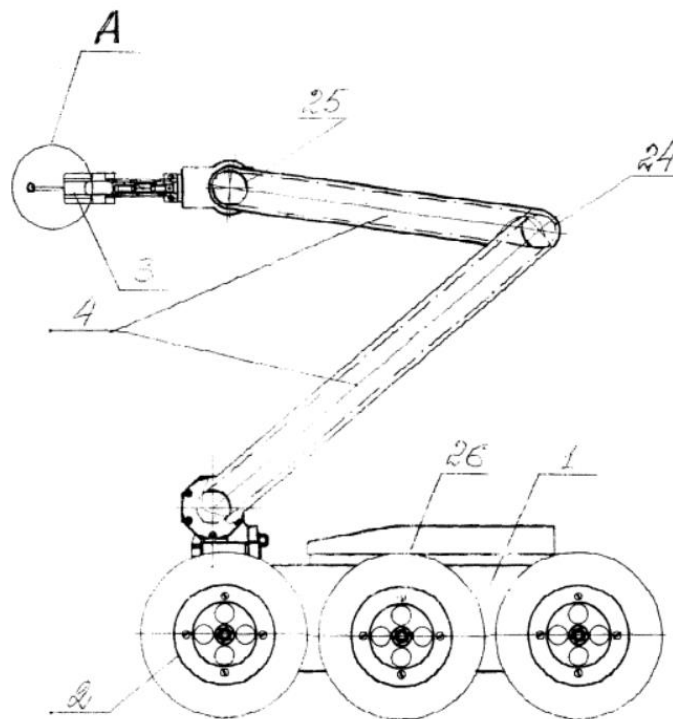


Рис. 1.14. Загальний вид мобільного робота

В даному винаході вирішувалася задача підвищення точності виявлення перешкод. Для цього був розроблений відповідний пристрій, що містить на кінці маніпулятора щуп з позиційно-чутливого датчика, що складається з наконечника, а також джерела випромінювання, фотоприймача та об'єктива, що є оптично зв'язаними між собою. (рис. 1.15).

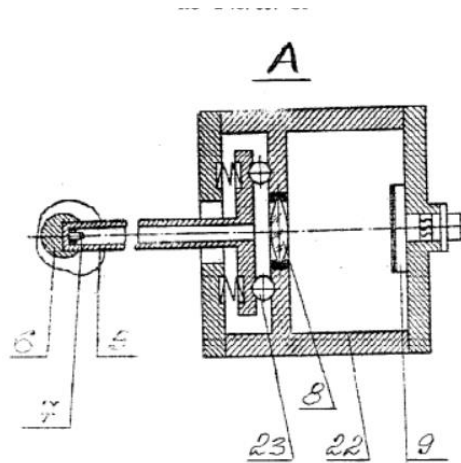


Рис. 1.15. Конструкція щупа

Інформація про наявність перешкод з оптичного датчика поступає в систему керування, що управляє режимом руху транспортного засобу та руху приладу для визначення перешкод [14].

- Збірний мобільний робот, патент RU 174140 U1. Даний робот має платформу, два приводних колеса, два колісних вала з поворотними колесами, два електродвигуни, блок електричного живлення, бортовий комп'ютер, блоки різноманітних датчиків, корпус (здатний до реконфігурування) (рис. 1.16).

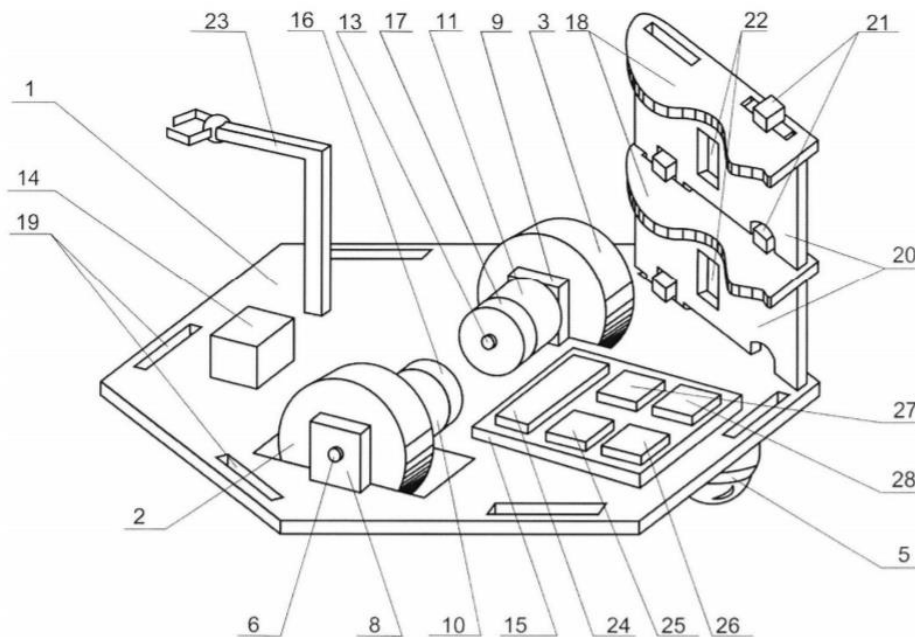
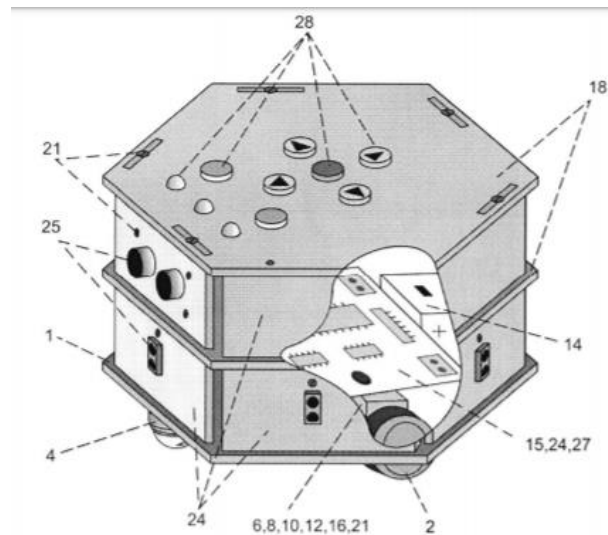
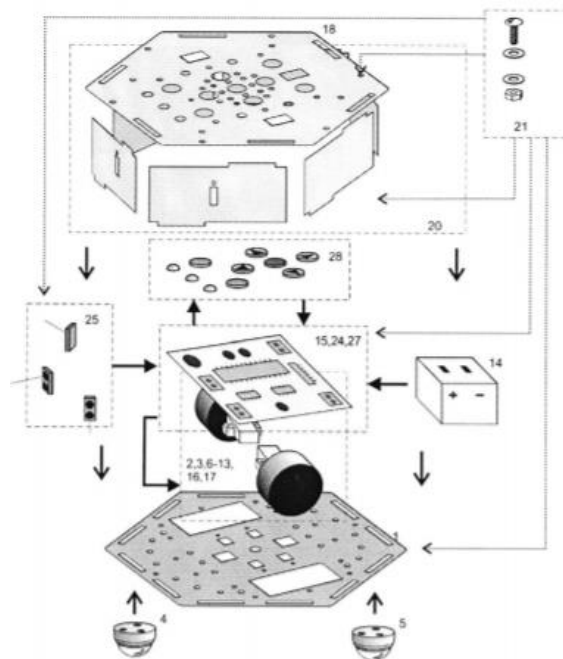


Рис. 1.16. Конструкція збірного мобільного робота

В корпусі зроблений ряд технологічних отворів, що використовуються для кріплення обладнання, такого як блок програмування, датчик відстані, оптичних датчиків та камер, блоків навігації та комунікації тощо (рис. 1.17) [15].



а)



б)

Рис. 1.17. Вид комплексу з двох вертикально з'єднаних модулів (а)  
та одиничний модуль у розібраному стані (б)

- Мобільний робототехнічний комплекс, патент RU 2241594. Даний комплекс з дистанційним керуванням розроблений для роботи в екстремальних умовах. Робот складається з антропоморфного маніпулятора, що встановлений на корпусі самохідного шасі; електронного блоку автоматики та телемеханіки, поста для дистанційного керування (рис. 1.18).

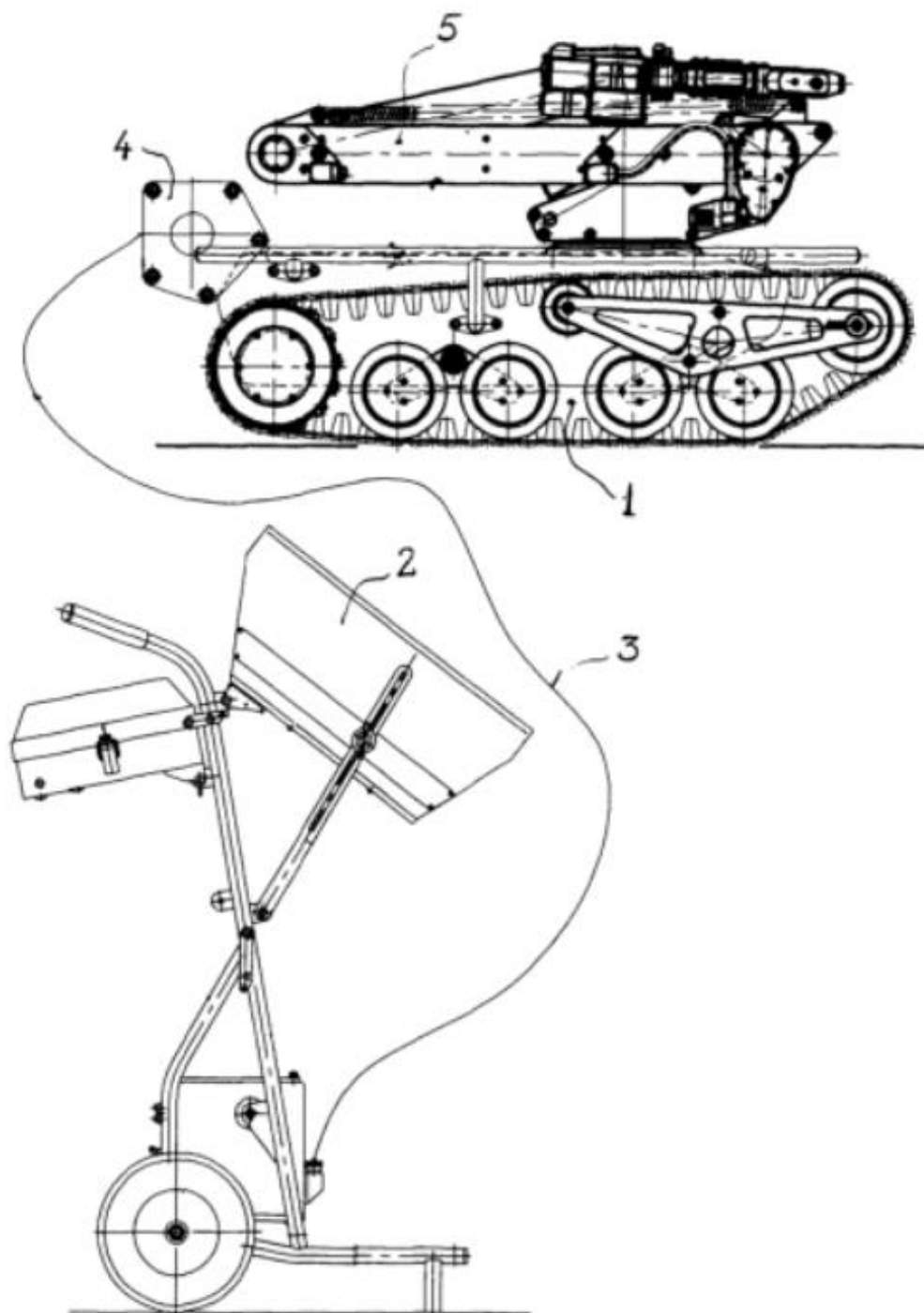


Рис. 1.18. Загальний вигляд мобільного робототехнічного комплексу

Важливою перевагою комплексу є конструкція маніпулятора, що навіть при максимальному вильоті руки вперед має вантажопідйомність, що перевищує власну вагу комплексу. Це досягнуто тим, що конструкція плеча виконана представляє собою жорстку просторову раму, що містить також поздовжні щоки та поперечні стяжки (рис. 1.19).

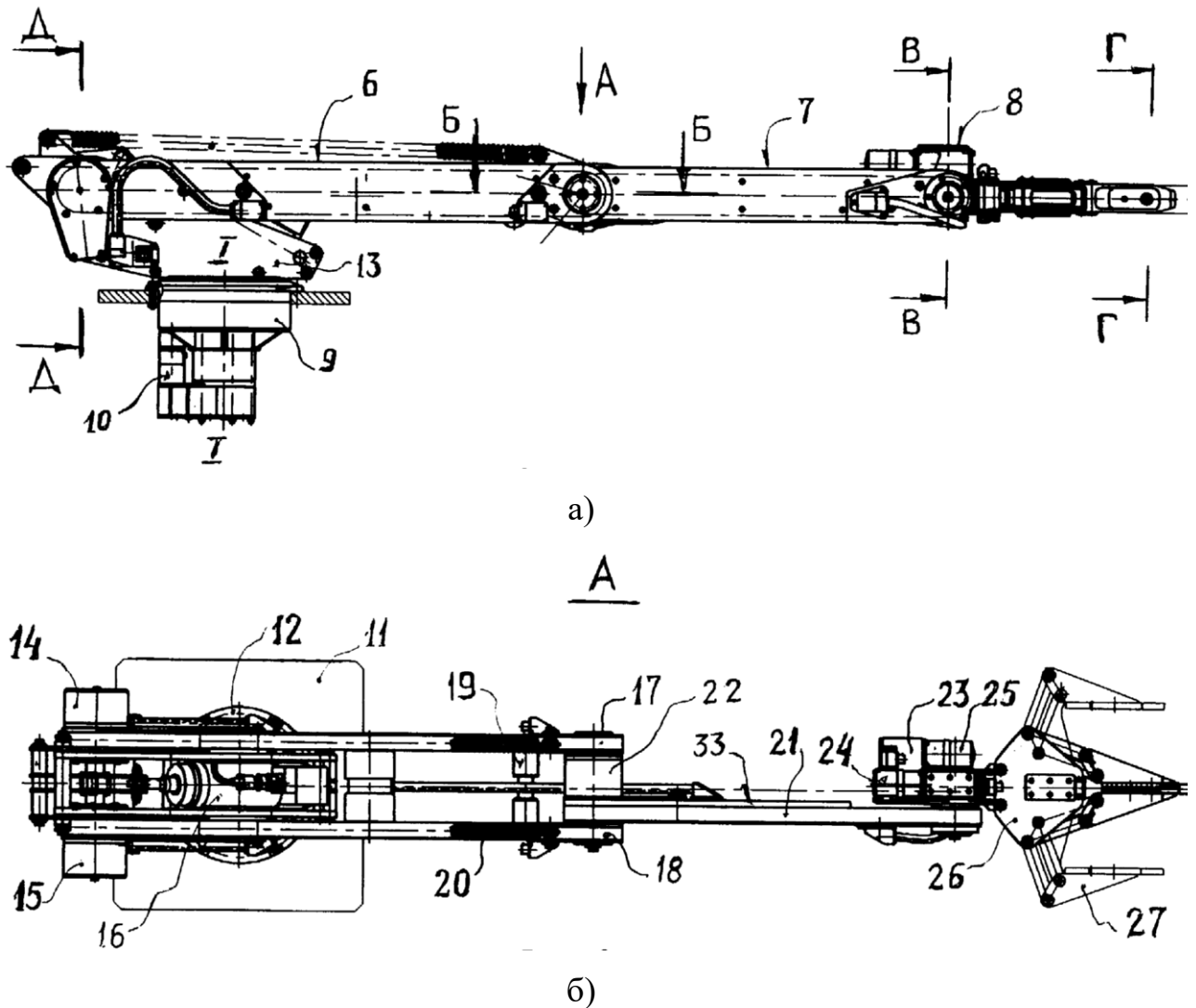


Рис. 1.19. Маніпулятор мобільного робототехнічного комплексу:  
вид збоку (а) та вид зверху (б)

Також для забезпечення великої вантажопідйомності в головній частині встановлений активний шарнір диференціального типу та розвантажувальні пружини (рис. 1.20).

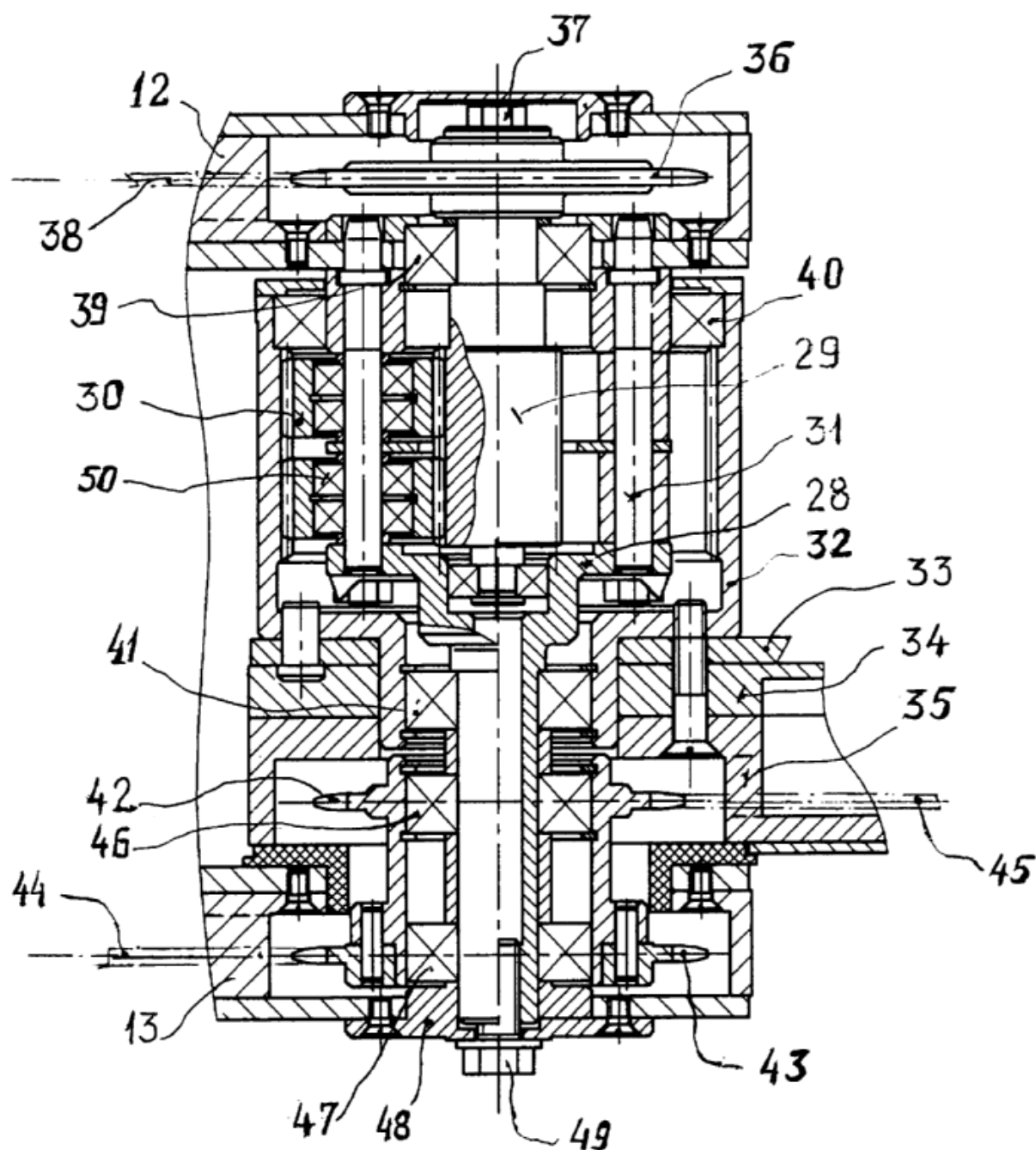


Рис. 1.20. Диференціальний шарнір в розрізі

В маніпуляторі керовані приводи передпліччя та кистей встановлені на платформу опорно-поворотного пристрою. Ведучі зірочки приводів виступають одночасно корпусами для водил планетарних редукторів. Рух схвату та антропоморфного маніпулятора задається з поста керування (рис. 1.21) [16].



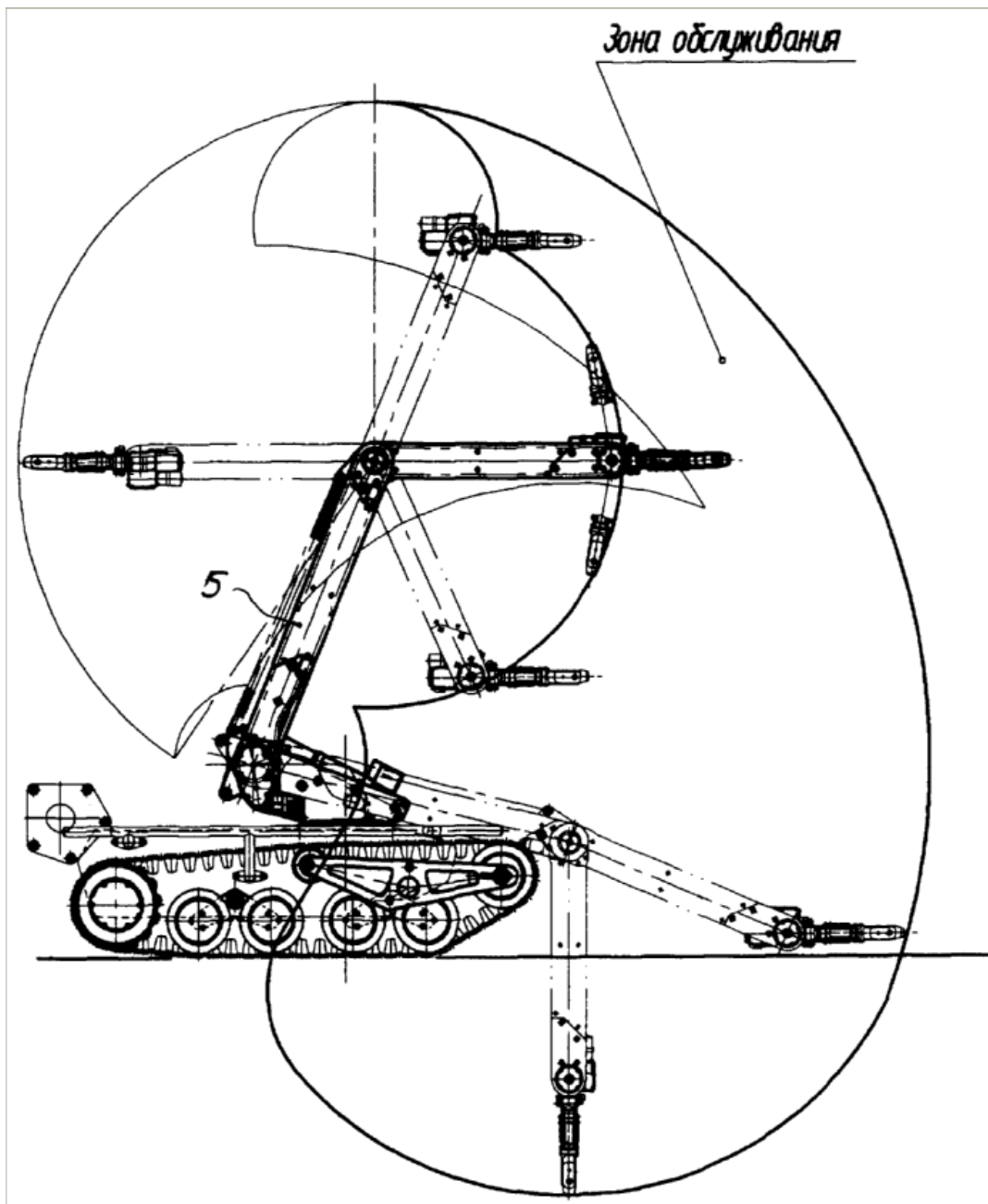


Рис. 1.21. Робочий простір  
мобільного роботизованого комплексу

- Рухомий пристрій для ударного знищення вибухонебезпечних предметів уламковими елементами, патент UA 130521. Дана корисна модель описує пристрій для дистанційного розмінування певної площі землі шляхом використання кінетичної енергії уламкових елементів, що запуснені за допомогою стисненого повітря. Додатковою ціллю було зменшити вартість розмінування.

Даний мобільний робот обладнаний компресором, ресивером, системою трубопроводу, дозатором; контейнером транспортування ударних елементів та системою виштовхування ударних елементів (рис. 1.22).

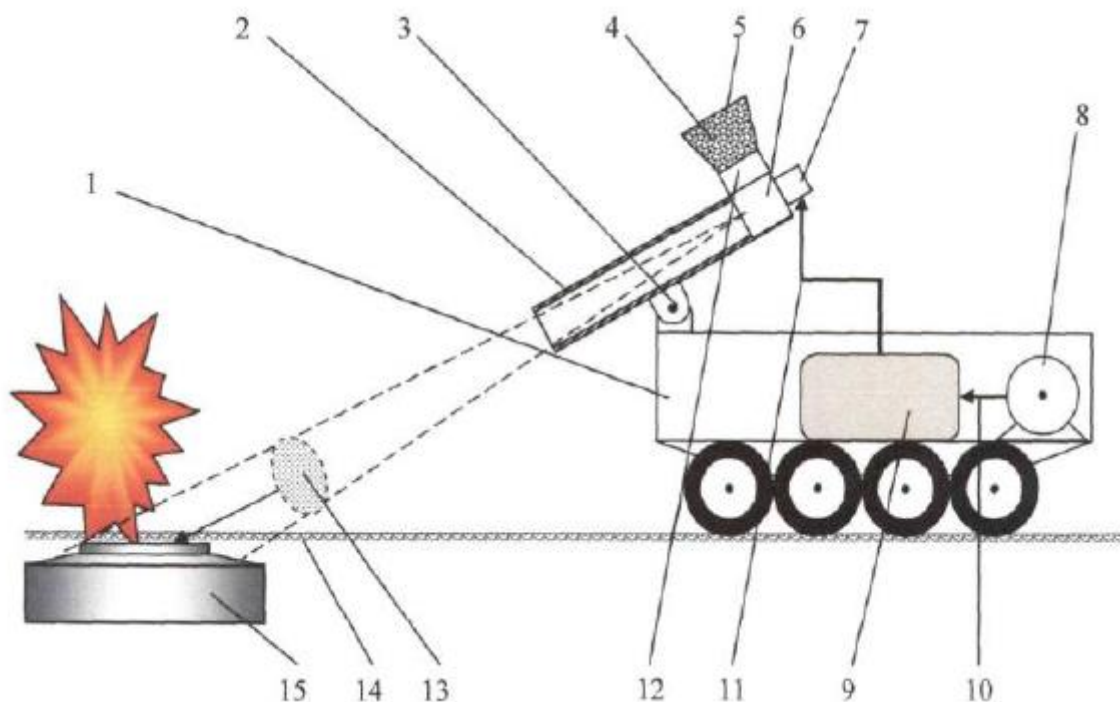


Рис. 1.22. Нейтралізація міни рухомим пристроєм  
для ударного знищення вибухівки

Описаний рухомий пристрій для ударного знищення вибухівки дозволить підвищити ефективність розмінування ділянки місцевості навіть при русі комплексу та зменшити вартість нейтралізації вибухових пристроїв шляхом їх передчасного спрацювання або шляхом механічного пошкодження механізмів їх підричника [17].

- Дістанційно- і самокерований агрегат бойової автономної модульної платформи високої прохідності для прихованого транспортування військових вантажів, патент UA 115207 (рис. 1.23).

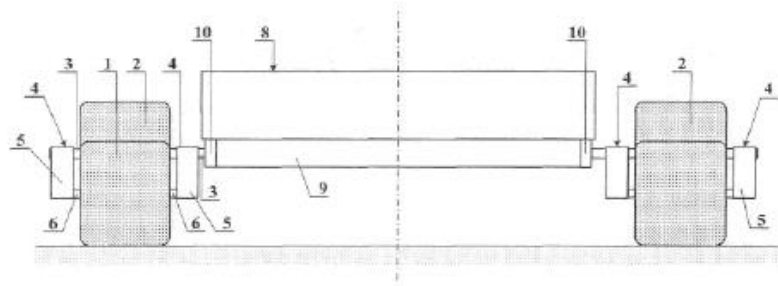


Fig. 3

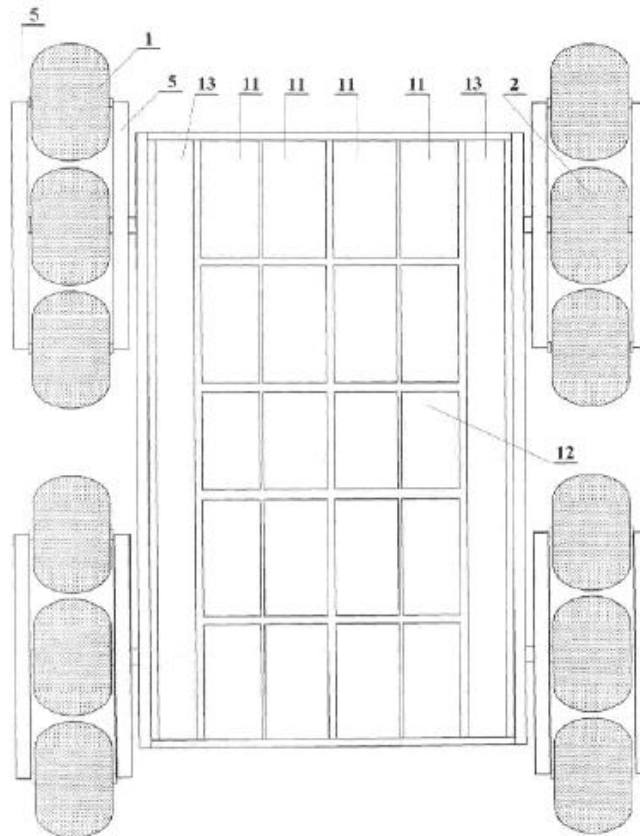


Fig. 4

Рис. 1.23. Бойова автономна модульна платформа високої прохідності

Найважливішими недоліками існуючих наземних роботів, що мають бути подолані розробленим комплексом є: труднощі подолання природних і штучних перешкод до 1м у висоту, причинами чого є малі діаметри приводних коліс платформи; відсутність в конструкції елементів, що створюють амортизаційний ефект, що покращує умови транспортування спеціальних вантажів, що є чутливими до коливань і тряски; необхідність встановлення додаткових електродвигунів повороту агрегату (рис. 1.24).

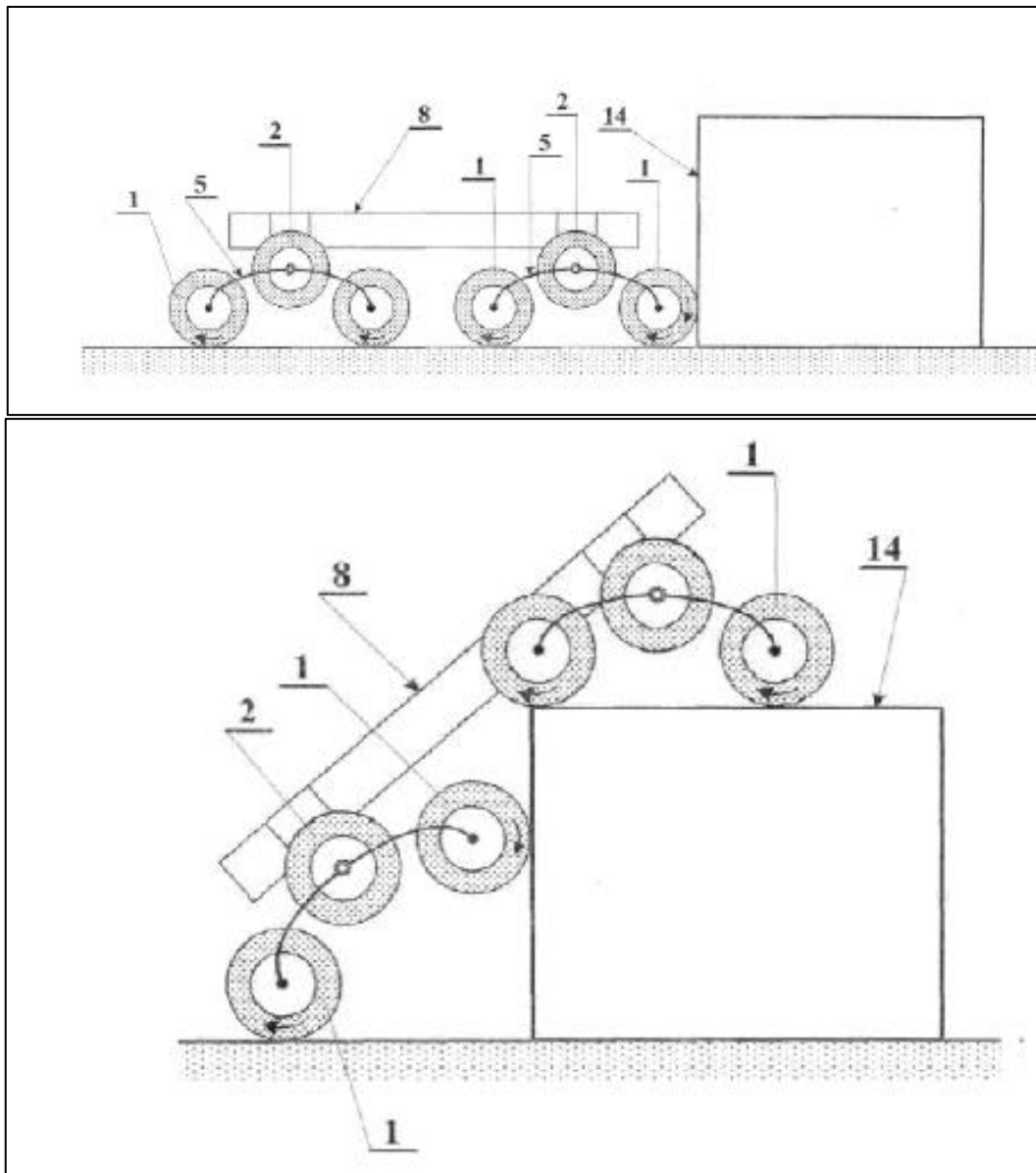


Рис. 1.24. Подолання високих перешкод платформою-агрегатом

Даний винахід є наземним військовим робототехнічним агрегатом, призначенням якого є надійне, приховане, дистанційно- або самокероване транспортування військових вантажів, що забезпечить повне матеріальне забезпечення та ефективне функціонування військових підрозділів на різних за небезпечністю обстрілу зонах бойових дій [18].

#### **1.4. Огляд існуючих мобільних роботів**

В даному розділі проведено огляд сучасних мобільних роботів різних країн виробництва та такі, що використовуються для нейтралізації вибухонебезпечних об'єктів. Даний процес може бути структурно розбитий на два етапи: виявлення та знищення.

Перший етап – виявлення та ідентифікація – є найскладнішим етапом. Через відносно велику поширеність доступу до компонентів вибухівки, інформації про конструкцію та практику використання саморобних вибухових пристроїв, існування радикально налаштованих особистостей та групувань – небезпечний об'єкт може бути складно влаштований та надійно замаскований в умовах міста під різні побутові об'єкти. При отриманні інформації або підозри про замінування типовим методом пошуку вибухівки є: використання індукційного металошукача та довгих щупів, огляд місцевості спеціалістом в спеціальному саперному костюмі або натренованими на аромат вибухівки собак. Дані методи неминуче призводять до деякого числа пропущених пристроїв, а що більш важливо – жертвам людей та собак, що додатково є цінними та тренованими спеціалістами.

Через зазначені причини, в даній сфері має великий сенс перехід на дистанційне оперування та безлюдні технології. Використання наземних роботів виключає прямий контакт спеціаліста по розмінуванню з вибухонебезпечним об'єктом та ряд інших переваг.

Для виконання операцій пошуку об'єктів роботизовані комплекси мають бути оснащені мультисенсорними системами, а саме камерами видимого, інфрачервоного та ультрафіолетового спектрів, датчиками, щупами, локаторами. В даному проекті робот буде оснащений однією обороною камерою та двома камерами на маніпуляторах. Дана конфігурація забезпечує загальний огляд локації та два локальний види на роботу механізмів на кінці маніпуляторів.

В даний момент американським агентством DARPA ведуться розробки по виведенню генетично модифікованих бактерій, що можуть бути використані для пошуку бомб. Ідея полягає в тому, що два штами бактерій будуть працювати в парі. Перший штам, що буде розміщений в ґрунті, при контакті з цільовими речовинами (вибухівкою, компонентами або компонентами розпаду вибухівки) почне виділяти сигнальні молекули. Дані молекули будуть підійматися вище до поверхні та ініціювати хімічну реакцію у другого штаму бактерій, результатом якої буде флуоресцентне свічення або інший помітний для людини сигнал. Потенціально, можуть бути створені мобільні тести, які можна буде підносити маніпулятором мобільного робота до потенціально небезпечних об'єктів та за наявності сигналу судити про близькість або відсутність хімічних сполук, характерних для вибухівки різних типів [19].

Після локалізації вибухонебезпечного об'єкта переходять до процедури знищення даного об'єкту. В найпростішому варіанті, коли вибухівка знаходиться на безлюдній території, об'єкт підривають прямо на місці. Для цього мобільний робот має покласти шашку динаміту з дистанційним запалом, від'їхати від об'єкту на безпечну відстань та здетонувати заряд.

Якщо об'єкт знаходиться в умовах населеного пункту, де детонація може нанести шкоду людям, майну та цілісності будинків – проводять евакуацію людей в певному радіусі та подальший ряд заходів. Саперами може бути проведена спроба виявити та знешкодити детонатори, запальники та електросхеми, що повинні ініціювати вибух. Дана спроба виконується за допомогою системи камер, сенсорів та маніпуляторів мобільного робота. Якщо спроба не дала результатів, небезпечний об'єкт беруть захватами маніпуляторів, розміщують в спеціальний контейнер та переносять у віддалене від людей та майна місце, після чого – знищують об'єкт динамітною шашкою, як на першому кроці.

Проаналізувавши дані кроки по нейтралізації небезпечних об'єктів, можна прийти до висновку, що наземні саперні роботи мають бути оснащені антропоморфними маніпуляторами або системами маніпуляторів – що дадуть можливість як високоточної роботи з дрібними об'єктами, так і силові характеристики для перенесення вантажу на певну відстань. З огляду на це, в проекті буде використана система з двох маніпуляторів, що дає ширші можливості, ніж одиничний маніпулятор [20].

Перед проектуванням був проведений аналіз конструкцій широко використовуваних саперних роботів, їх маніпуляторів та систем шасі [21].

Розглянуті наступні роботи-сапери іноземного виробництва:

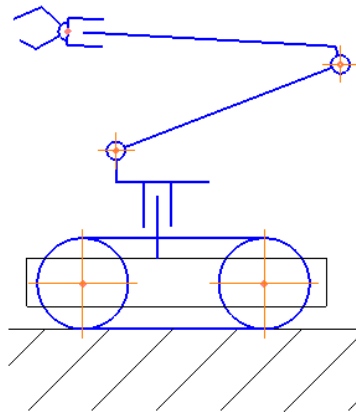
- Dragon Runner – невеликий робот з дистанційним керуванням, розроблений компанією «QinetiQ» за замовленням Пентагону та знаходиться на озброєнні з 2003р. Був широко використовуваний в операціях в Афганістані, коли військові угруповання Талібану використовували вибухові пристрої кустарного виробництва проти військ Коаліції (рис. 1.25).



а)



б)



в)

Рис. 1.25. Мобільний робот Dragon Runner  
в польових умовах (а) та у складеному стані (б),  
схема шасі та маніпулятора (в)

На роботі встановлений маніпулятор, що може хватати та переміщувати невеликі об'єкти вагою до 4,5кг, копати землю. Робот оснащений шістьма відеокамерами з мікрофонами. Інфрачервона система нічного бачення дає можливість використовувати Dragon Runner навіть в повній темноті. Робот також може виконувати операції по розвідці,



автоматизованому спостереженню та патрулюванню території (здатен виявляти рух в радіусі дев'яти метрів навколо себе).

Однією з переваг даного робота є компактність та надійність конструкції. Одна людина може нести Dragon Runner на собі, перекидати робота через огорожу, скидати з транспорту або з третього поверху без серйозних ушкоджень. Ці характеристики роблять Dragon Runner хорошим розвідувальним роботом для використання безпосередньо в зоні бойових дій. Завдяки гусеничному шасі робот має гарну прохідність та маневреність на різних поверхнях. Можлива модернізація для реалізації переміщення сходами.

Основні технічні характеристики:

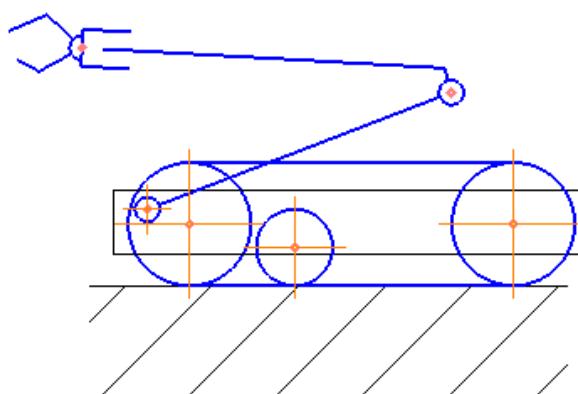
- максимальна швидкість руху: 10км/годину;
  - маса: 6,4 кг;
  - висота: 13 см;
  - довжина: 38 см;
  - ширина: 30 см [22, 23].
- TALON – легкий керований дистанційно військовий робот, що знаходиться на озброєнні армії США з 2001р. та розроблений компанією «Foster-Miller», що є підрозділом «QinetiQ North America». Робот призначений для роботи з вибухо-, біологічно- та хімічно небезпечними об'єктами; оборони та розвідки (рис. 1.26).



а)



б)



в)

Рис. 1.26. Мобільний робот TALON  
в польових умовах (а) та вид на центр управління (б),  
схема шасі та маніпулятора (в)

Завдяки модульному дизайну робот TALON може бути оснащений додатково широким спектром пристроїв. Робот має високі показники швидкості руху та може бути використаний в будь-яких природних середовищах.

Довжина корпусу робота складає 86,4 см, ширина - 57,2 см, у висота зі складеним маніпулятором 27,9 см, кліренс – 7см. Вантажопідйомність маніпулятора складає до 9,07 кг, на корпусі може бути перевезений вантаж до 45 кг, а якщо вантаж тягнути по землі – до 77,11 кг.

В базовій комплектації TALON оснащений маніпулятором, здатним обертатися на 360°, схват, динамік-гучномовець та мікрофон. Для адаптації до виконуваної задачі можуть бути розміщені датчики хімікатів, радіації або температури; GPS-трекер, глушилки сигналів та ін.. Також маніпулятор може бути замінений на інший більш довгий маніпулятор або ряд озброєнь.

Для спостереження за полем бою або розпізнання загроз робот оснащений сімома відеокамерами. Додатково встановлюють камери інфрачервоного спектру, камери нічного виду та ліхтарі. Оператор комплексу виконує роботу з пульту керування, що підтримує радіо- або оптоволоконний зв'язок з роботом. Час автономної роботи – до трьох годин завдяки акумуляторам ємністю 300Wh. На рівній дорозі може бути досягнута максимальна швидкість 8.37 км/годину. Робот може долати сходи до 43°, бічний нахил до 45°, конструкційні та снігові загорождення [24].

- Andros MarkV-A1 – наземний робот, розроблений компанією Northrop Grumman. Він є одним з представників лінійки роботизованих комплексів Remotec ANDROS. Знаходиться на озброєнні з 2004 року у саперних та спеціальних підрозділів поліції США (рис. 1.27) [25].

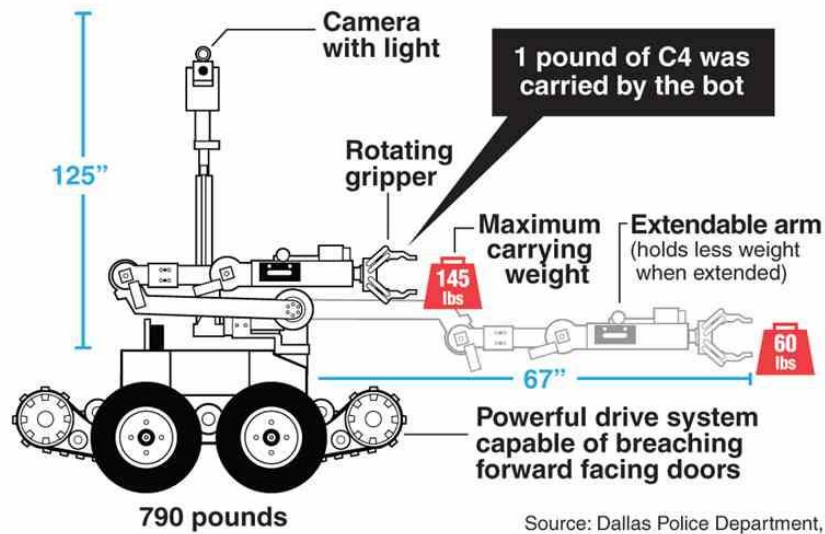


a)

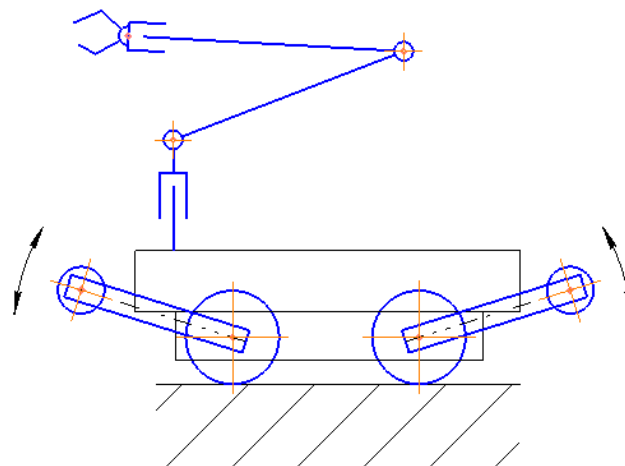
# Dallas bomb-bot

The robot used against the Dallas shooter, was remote-controlled by police officers. Here's a look at the bomb-bot:

## Remotec Andros Mark V-A1



б)



в)

Рис. 1.27. Мобільний робот Andros MarkV-A1  
загальний вид (а) і технічні характеристики (б),  
схема шасі та маніпулятора (в)

Дана модель робота була використана Департаментом поліції міста Даллас, щоб вбити терориста, що захватив приміщення та вбив 5 поліцейських 7 липня 2016р. Через неможливість безпечно затримати

порушника, поліцією було прийнято рішення доставити заряд С4 на роботі в будівлю та здетонувати заряд поруч з бойовиком.

Робот MarkV має відеокамеру з підсвіткою, що знаходиться на 620-мм мачті; три камери в різних частинах робота, маніпулятор із встановленим механічним схватом. Маніпулятор може витягуватися вперед на відстань 2,5 м та працювати з небезпечними матеріалами. Присутня аудіосистема, що складається з динаміку та мікрофону, що мають захист від впливу вологи. Робот має модульний принцип складання, тож додатково можуть бути встановлені датчики, блок лазерного наведення, помпова рушниця або гранатомет, циркулярна пила та ін. Керування здійснюється з пульта за допомогою оптоволоконного або електричного кабелю або за радіозв'язком.

Вага MarkV складає в стандартній комплектації 340кг. Довжина 1,2 м, ширина 1 м, висота 2 м, кліренс 228мм. Максимальна швидкість біля 6.5км/годину. Робот може долати ухил до 45° та може підійматися та спускатися сходами. Через конструкцію швидкозмінних коліс, шасі робота може бути змінене з колісного на гусеничне, що додає універсальності машині [26].

- KAPLAN EOD – робот, розроблений в Туреччині для знешкодження дистанційної нейтралізації вибухівки. Перевагами комплексу є потужність, зносостійкість та простота керування (рис. 1.28) [27].

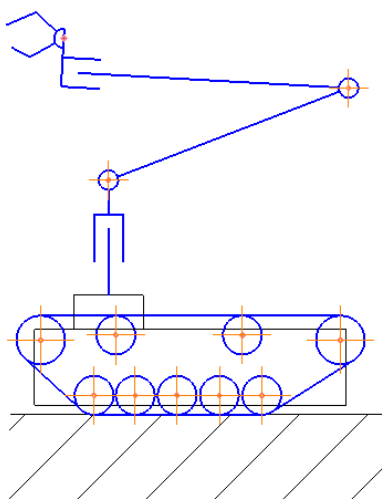


а)





б)



в)

Рис. 1.28. Мобільний робот KAPLAN EOD

зі складеним маніпулятором (а) та при роботі з небезпечним об'єктом (б),  
схема шасі та маніпулятора (в)

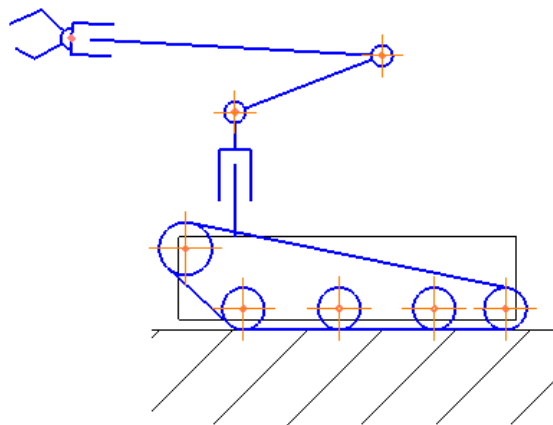
KAPLAN EOD обладнаний рукою-маніпулятором та дає можливість оперативникам обстеження та знешкодження підозрілих об'єктів. Дальність радіозв'язку між пультом та роботом може складати до 500м. Платформа шасі показує високу мобільність на різних поверхнях. Система камер дозволяє саперам бачити об'єкт та оточення робота у високій якості в

реальному часі на безпечній відстані з пульта керування. Також доступний ряд автоматизованих операцій для зменшення навантаження на сапера, що сприяє зменшенню стресового навантаження на нього [28].

- Digital Vanguard ROV – багатоцільовий робот, розроблений в Канаді компанією MED-ENG для роботи з небезпечними матеріалами, спостереження та розвідувально-тактичних операцій. Робот може працювати у важкодоступних та стіснених просторах завдяки низькому профілю та маневреності. (рис. 1.29).



а)



б)

Рис. 1.29. Мобільний робот Digital Vanguard ROV  
Загальний вид (а), схема шасі та маніпулятора (б)

Маніпулятор має телескопічну структуру та може бути обладнаний навісним обладнанням: додатковими камерами, руйнівниками, компактними рентгенівськими сканерами, детекторами хімічних сполук та радіації, різноманітним електронними приборами.

В стандартній комплектації наземний робот має гусеничне шасі, містить декілька модулів зв'язку (2G, Bluetooth, радіо), набір механічних інструментів для роботи. Приводи використовують черв'ячні редуктори. Маніпулятор має шість ступенів вільності. Робот оснащений відеокамерами з оптичним зумом. Вага складає 56кг, розмір 45x104x56 см, матеріал – авіаційний алюміній [29].

- AVENGER ROV – тактичний робот, розроблений в Канаді компанією MED-ENG та призначений для знешкодження вибухонебезпечних об'єктів підрозділами військових або поліції (рис. 1.30).

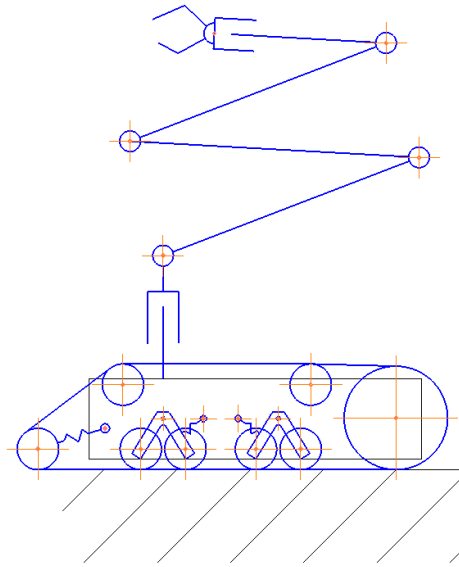


а)



б)





в)

Рис. 1.30. Мобільний робот AVENGER ROV: загальний вид (а),  
проникнення руки-маніпулятором в салон замінованого автомобіля (б),  
схема шасі та маніпулятора (в)

Маніпулятор даного робота має 7 ступенів вільності. Він володіє здатністю проникати схватом під, в та на автомобіль для обстеження підозрілих пристроїв. Модульна система кріплень дозволяє встановлювати компактні рентгенівські системи, руйнівники, датчики та ін.

Конструкція редукторів та гусениць робота AVENGER дозволяють розвивати велику швидкість на простій та пересіченій місцевості. Одна з секцій гусениць може змінювати за командою геометрію для підйому сходами. Комплекс має три спеціалізовані камери. Є система освітлення для оперування в умовах темряви та завалів. На роботі встановлений бортовий комп'ютер, що займається обробкою інформації з камер, датчиків та керуючих сигналів з командної консолі, на яку спеціалісту з розмінування надається аудіо та відео інформація в режимі реального часу. Також для маніпулятора є ряд наперед заготовлених програм. Габарити дозволяють перевозити робота навіть в звичайних автомобільних транспортних засобах [30].

### 1.5. Оцінка рухових можливостей дворуких роботів

На етапі проектування системи маніпуляторів важливо оцінити ефективність використання їх експлуатації. Відома система, запропонована професором Павленко І.І. Визначені за даною методикою коефіцієнти дозволяють обґрунтувати кінематичні параметри роботів, забезпечити виконання заданих переміщень та операційних рухів [31].

Найбільш загальним показником вважається коефіцієнт рухових можливостей  $K_p$ , що дорівнює добутку коефіцієнта переміщень  $K_{\Pi}$  на коефіцієнт сервісу  $C$ . Даний коефіцієнт оцінює здатності роботів по переміщенню та переорієнтуванню захватів.

Наведені показники можуть бути визначені для незалежних та узгоджених рухах рук. Незалежні рухи оцінюють аналогічно, як для одноруких роботів.

Узгоджені рухи двох рук оцінюють за сумісними та відносними зміщеннями кінцевих точок (захватів) по лініях, площинах та об'ємах. Дані рухи розглядають при різних відстанях між кінцями маніпуляторів та різних напрямках руху. Достатньо повну оцінку можна отримати при спів падінні центрів захватів маніпуляторів, коли відстань між центрами дорівнює нулю або коли захвати виконують переміщення по спільній траєкторії. На першому етапі визначають коефіцієнт переміщень  $K_{\Pi}$ .

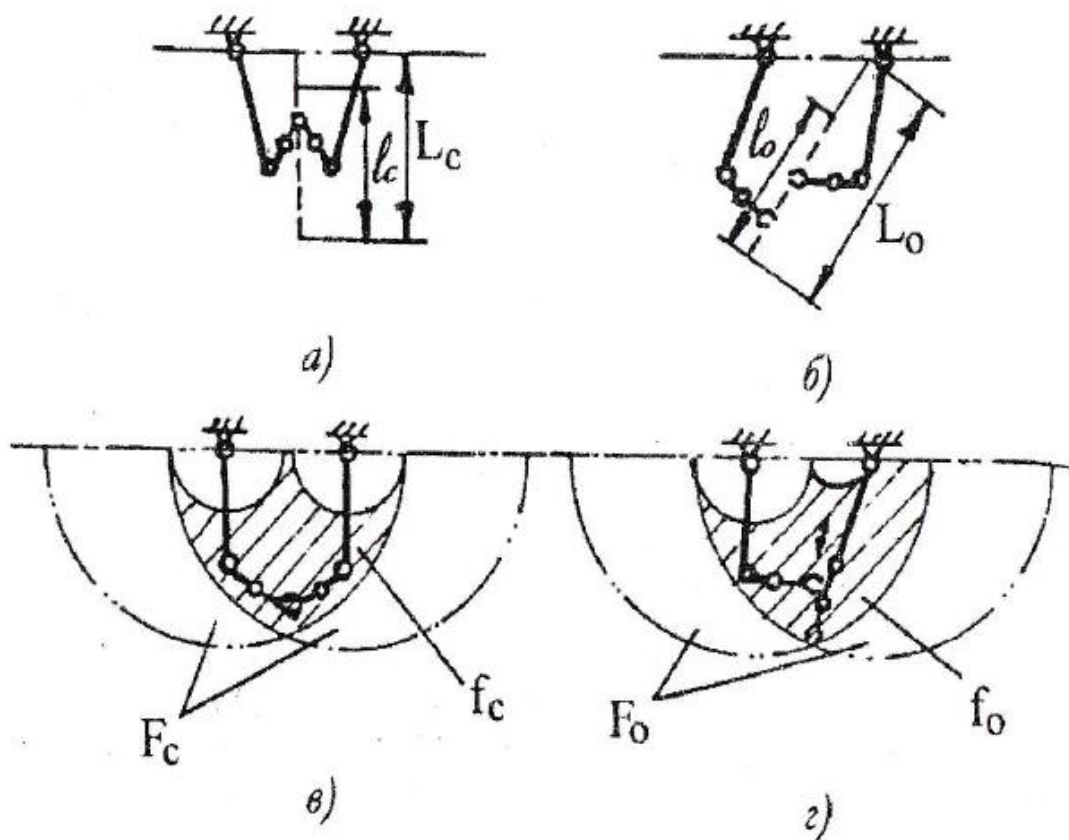


Рис. 1.31. Схеми переміщень рук робота

При сумісних переміщеннях кінців маніпуляторів визначають коефіцієнт сумісних переміщень кінців маніпуляторів по лінії  $K_{\text{ПЛ}}$  (рис. 1.31,а)

$$K_{\text{ПЛ}} = \frac{l_c}{L_c},$$

де  $l_c$ ,  $L_c$  – величини сумісного переміщення захватів, що є: перша – практично реалізуємою, друга – теоретично можливою.

В цьому та наступних прикладах рухи ланок обмежені кутом  $180^\circ$ . При переміщенні однієї руки відносно іншої вздовж певної лінії коефіцієнт відносних переміщень кінців маніпуляторів по лінії  $K'_{\text{ПЛ}}$  (рис. 1.31, б) дорівнює

$$K'_{\text{ПЛ}} = \frac{l_B}{L_B},$$

де  $l_B, L_B$  – величини переміщення кінця однієї руки відносно кінця іншої, що є: перша – практично реалізуємою, друга – теоретично можливою.

При сумісних переміщеннях кінців захватів по площині визначають коефіцієнт сумісних переміщень по площині (рис. 1.31, в)

$$K_{\text{пп}} = \frac{f_C}{F_C},$$

де  $f_C$  – величина зони, в якій можливі сумісні переміщення захватів робота.

$F_C$  – величина повної зони, в межах якої можуть рухатися маніпулятори.

При переміщенні одного маніпулятора відносно іншого в площині коефіцієнт відносних переміщень кінців маніпулятора в площині  $K'_{\text{пп}}$  (рис. 1.31, г) дорівнює

$$K'_{\text{пп}} = \frac{f_B}{F_B},$$

де  $f_B$  – величина зони, в якій можливе переміщення однієї руки відносно іншої.

$F_B$  – величина повної зони, в межах якої можуть рухатися маніпулятори при виконанні даних переміщень.

При сумісному руху захватів у просторі визначають коефіцієнт сумісних переміщень кінців маніпуляторів в об'ємі  $K_{\text{по}}$

$$K_{\text{по}} = \frac{v_C}{V_C},$$

де  $v_C$  – об'єм, в якому можливе сумісне переміщення захватів робота.

$V_C$  – величина повного об'єму, в межах якого можуть рухатися маніпулятори.

При відносному переміщенні однієї руки в об'ємі коефіцієнт відносних переміщень кінців маніпуляторів в об'ємі дорівнює

$$K'_{\text{по}} = \frac{v_B}{V_B},$$

де  $v_B$  – об'єм, в якому можливе переміщення однієї руки робота відносно іншої.

$V_B$  – величина повного об'єму, в межах якого можуть рухатися маніпулятори при виконанні даних переміщень.

Другим етапом визначають коефіцієнт сервісу  $C$ . Даний показник являє собою відношення площини або об'єму робочої зони, в межах якої можливий сумісний або незалежний рух двох маніпуляторів, до відповідної зони руху маніпуляторів при виконанні ними даних переміщень. В складних випадках потрібно використовувати зони сумісних переміщень в проєкціях на певні площини, що є важливими (виробнича площа, координатні площини і т.п.).

Оцінку переміщень також можна проводити по відношенню до ідеальної схеми робота, під якою розуміють схему з нескінченим числом ступенів рухомості та ланками такої ж довжини – тобто робоча зона або об'єм якого представляє собою кулю (сферу) для кожної руки робота.

Для різних точок робочої зони визначають загальний сервіс орієнтуючих рухів  $C = C_0 \cdot C_{\Pi}$ , де  $C_0$  – осьовий сервіс,  $C_{\Pi}$  – сервіс площини захвату. Орієнтуючі можливості визначають кількома варіантами: за середніми сумарними значеннями сервісу обох маніпуляторів в обраних положеннях; по величині повторюваного сервісу – величині сервісу, в межах якого обидва маніпулятора можуть займати певне положення осі або площини захвату тощо.

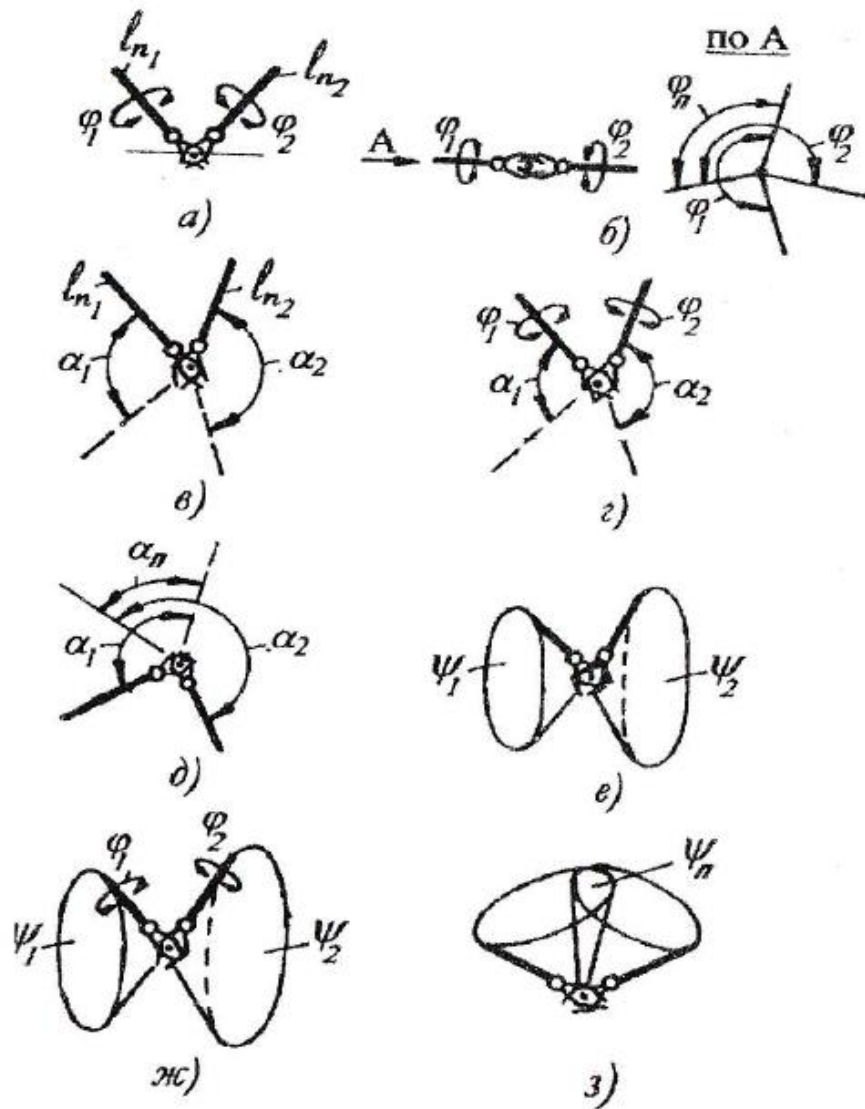


Рис. 1.32. Схеми орієнтуючих рухів рук робота

В подальшому орієнтуючі рухи розглянуті при співпадінні кінців маніпуляторів. За умови, що ланки маніпуляторів не можуть змінювати просторового положення (рис. 1.32, а), то осьовий сервіс дорівнює нулю для обох рук, а середній сервіс площини захватів в даній точці дорівнює

$$\overline{C_{\Pi}} = \frac{1}{2} (C_{\Pi 1} + C_{\Pi 2}) = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{4\pi},$$

де  $C_{\Pi 1}, C_{\Pi 2}$  – сервіси площин захватів для кожної руки;

$\varphi_1, \varphi_2$  – кути повороту площин захватів рук.

При вказаних обмеженнях та співпадинні осей захватів (рис. 1.32, б) буде відбуватися перекриття сервісу площин захватів та сервіс дорівнюватиме

$$C_{\Pi} = \frac{\varphi_{\Pi}}{2\pi},$$

де  $\varphi_{\Pi}$  – кут повороту площин захватів обох маніпуляторів.

Якщо зняти обмеження на переміщення ланок маніпуляторів робота – осьовий сервіс можна визначити при переміщенні останніх ланок  $l_n$  у площинах та в об'ємі. Середній сумарний осьовий сервіс для випадку, коли ланки рухаються у площинах (рис. 1.32, в), дорівнює

$$\overline{C}_0 = \frac{1}{2}(C_{01} + C_{02}) = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{4\pi},$$

де  $C_{01}, C_{02}$  – осьові сервіси площин захватів для кожної;

$\alpha_1, \alpha_2$  – кути повороту захватів рук відносно точки.

При переміщенні ланок у площинах відносно точки, середнє значення сумарного сервісу дорівнюватиме

$$\overline{C}_{\Pi} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\alpha_1} \int_{(\alpha_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\alpha_1 + \frac{1}{\alpha_2} \int_{(\alpha_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\alpha_2 \right),$$

де  $C_{\Pi 1}, C_{\Pi 2}$  – сервіси площин захватів для кожної руки в межах зміни орієнтації їх вісей.

Загальний сервіс дорівнюватиме

$$\overline{C} = \overline{C}_0 \cdot \overline{C}_{\Pi}.$$

Якщо в межах кутів повороту для захватів орієнтація площин є постійною, тоді

$$\overline{C} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{16\pi^2}.$$

При переміщенні ланок в одній площині відносно даної точки перекриття осьового сервісу дорівнюватиме

$$C_0 = \frac{\alpha_{\Pi}}{2\pi},$$

де  $\alpha_{\Pi}$  – кут повороту осей захватів обох маніпуляторів.

При переміщенні ланок в об'ємі відносно точки (рис. 1.32, е) визначають середнє значення осьового сервісу

$$\overline{C_0} = \frac{\psi_1 + \psi_2}{8\pi},$$

де  $\psi_1, \psi_2$  – тілесні кути, в межах яких може змінюватися орієнтація осей захватів рук.

В межах тілесних кутів середнє значення сервісу площин захватів визначають як

$$\overline{C_{\Pi}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\psi_1} \int_{(\psi_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\psi_1 + \frac{1}{\psi_2} \int_{(\psi_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\psi_2 \right).$$

Якщо в межах тілесних кутів орієнтуючі рухи площин захватів постійні – загальний сервіс рук дорівнює

$$\overline{C} = \frac{(\psi_1 + \psi_2) \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)}{32\pi^2}.$$

Величина перекриття осьового сервісу дорівнюватиме

$$C_0 = \frac{\psi_{\Pi}}{4\pi},$$

де  $\psi_{\Pi}$  – тілесний кут повороту осей захватів обох маніпуляторів.

Подібним чином визначають можливості орієнтації дворуких роботів при русі їх захватів за лініями та площинами.



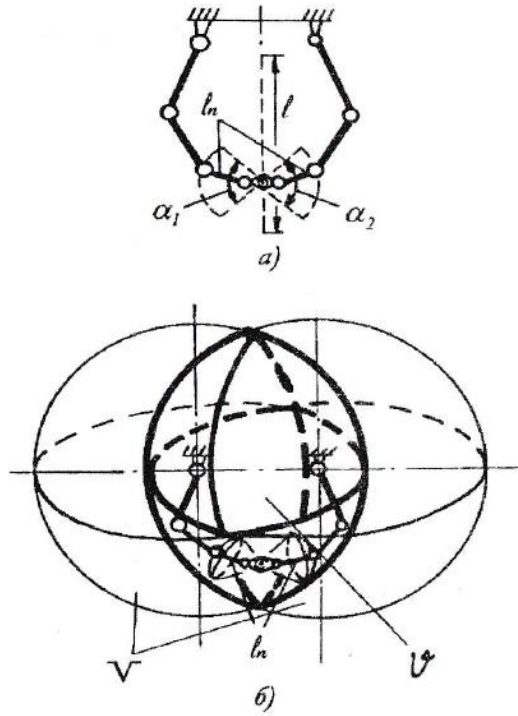


Рис. 1.33. Схеми орієнтуючих рухів рук робота при русі захватів по лінії та в об'ємі

При спільному русі центрів захватів по лінії  $l$  (рис. 1.33, а) та обертанні ланок  $l_n$  у площинах відносно точок на цій лінії, сумарний середній сервіс дорівнюватиме

$$\overline{C_0} = \frac{1}{2}(\overline{C_{01}} + \overline{C_{02}}) = \frac{1}{2} \left( \int_{(l)} C_{01} \cdot dl + \int_{(l)} C_{02} \cdot dl \right).$$

При цих умовах середнє сумарне значення сервісу для площин захватів дорівнюватиме

$$\begin{aligned} \overline{C_{\Pi}} &= \frac{1}{2}(\overline{C_{\Pi 1}} + \overline{C_{\Pi 2}}) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\Omega_1} \int_{(\Omega_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\Omega_1 + \frac{1}{\Omega_2} \int_{(\Omega_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\Omega_2 \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\Omega_1} \int_{(l)} dl \int_{(\alpha_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\alpha_1 + \frac{1}{\Omega_2} \int_{(l)} dl \int_{(\alpha_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\alpha_2 \right), \end{aligned}$$

де  $\Omega_1, \Omega_2$  – міри областей, що досліджують для двох рук робота.

При переміщенні ланок в об'ємі вдовж певної лінії значення сервісу

$$\overline{C_0} = \frac{1}{2l} \left( \int_{(l)} C_{01} \cdot dl + \int_{(l)} C_{02} \cdot dl \right).$$

В цьому випадку існує відмінність, що

$$\overline{C_{01}} = \frac{\psi_1}{4\pi}; \overline{C_{02}} = \frac{\psi_2}{4\pi}.$$

Тоді середнє значення сервісу площин захватів дорівнює

$$\overline{C_{\Pi}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\Omega_1} \int_{(l)} dl \int_{(\psi_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\psi_1 + \frac{1}{\Omega_2} \int_{(l)} dl \int_{(\psi_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\psi_2 \right).$$

При русі кінців маніпуляторів по площині (f) і ланок у площинах середнє значення сумарного осьового сервісу дорівнює

$$\overline{C_0} = \frac{1}{2f} \left( \int_{(f)} C_{01} \cdot df + \int_{(f)} C_{02} \cdot df \right).$$

Середній сумарний сервіс площин захватів дорівнюватиме

$$\overline{C_{\Pi}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\Omega_1} \int_{(f)} df \int_{(\alpha_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\alpha_1 + \frac{1}{\Omega_2} \int_{(f)} df \int_{(\alpha_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\alpha_2 \right).$$

При русі захватів в площині f, а ланок в об'ємі

$$\overline{C_0} = \frac{1}{2f} \left( \int_{(f)} C_{01} \cdot df + \int_{(f)} C_{02} \cdot df \right).$$

Проте треба врахувати те, що

$$\overline{C_{01}} = \frac{\psi_1}{4\pi}; \overline{C_{02}} = \frac{\psi_2}{4\pi}.$$

Тоді середнє значення сервісу площин захвату дорівнює

$$\overline{C_{\Pi}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\Omega_1} \int_{(f)} df \int_{(\psi_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\psi_1 + \frac{1}{\Omega_2} \int_{(f)} df \int_{(\psi_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\psi_2 \right).$$

Значення середнього сумарного значення сервісу осей та площин захватів, при переміщенні їх в об'ємі v, а ланок у площинах, визначаються

$$\overline{C_0} = \frac{1}{2v} \left( \int_{(v)} C_{01} \cdot dv + \int_{(v)} C_{02} \cdot dv \right),$$

$$\overline{C_{\Pi}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\Omega_1} \int_{(v)} dv \int_{(\alpha_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\alpha_1 + \frac{1}{\Omega_2} \int_{(v)} dv \int_{(\alpha_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\alpha_2 \right).$$

Підсумковою оцінкою орієнтуючих можливостей робота дається при переміщенні їх захватів та ланок в об'ємі (рис. 1.33, б).

$$\overline{C_0} = \frac{1}{2v} \left( \int_{(v)} C_{01} \cdot dv + \int_{(v)} C_{02} \cdot dv \right),$$

$$\overline{C_{\Pi}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\Omega_1} \int_{(v)} dv \int_{(\psi_1)} C_{\Pi 1} \cdot d\psi_1 + \frac{1}{\Omega_2} \int_{(v)} dv \int_{(\psi_2)} C_{\Pi 2} \cdot d\psi_2 \right).$$

Таким чином, показник рухомих можливостей  $C$  дозволяє оцінити ефективність використання займаною роботом зони та орієнтуючі можливості в границях займаної області. Ці дані дозволяють оцінювати раціональність схеми робота та корегувати його кінематичні та геометричні параметри. Методика може бути використана для багаторуких роботів та механізмів з паралельною кінематикою. Хоча певні елементи методики можуть будуть використані при проектуванні системи двох маніпуляторів, є більш доцільним створити математичну модель системи. Це дозволить не тільки оцінити систему в статиці, а й в динаміці.

## 2. Проектування циклоїдного редуктора

### 2.1. Принцип роботи циклоїдного редуктора

В даному розділі буде проведений аналіз принципу роботи циклоїдного редуктора, його переваг та недоліків. В суглобах руки-маніпулятора найчастіше знаходяться крокові двигуни або серводвигуни та певного виду редуктор для зменшення частоти обертання, збільшення крутного моменту на виході та контролю інерції при високій динаміці руху. Для досягнення конкурентоспроможних показників роботи маніпуляторів мобільного робота потрібно використати сучасні технічні та технологічні розробки. На конкурсі оборонних технологій Sikorsky Challenge, в якому наша команда приймала участь, одним із колективів був представлений проект Двоступеневого збалансованого циклоїдного редуктора. Завдяки ряду переваг над традиційно використовуваними редукторами, нами було прийнято рішення про проектування циклоїдного редуктора для подальшого використання в приводах маніпулятора.

Циклоїдний редуктор — це механізм, що має фіксоване передаточне відношення, понижує частоту обертання вихідного вала. Циклоїдні редуктори можуть мати великі передаточні відношення при компактності в діаметрі та ширині. Найчастіше редуктор кріпитися безпосередньо до валу та корпусу керованого електродвигуна, утворюючи з ними єдиний блок, що зручно збирати та монтувати (рис. 2.1) [32].

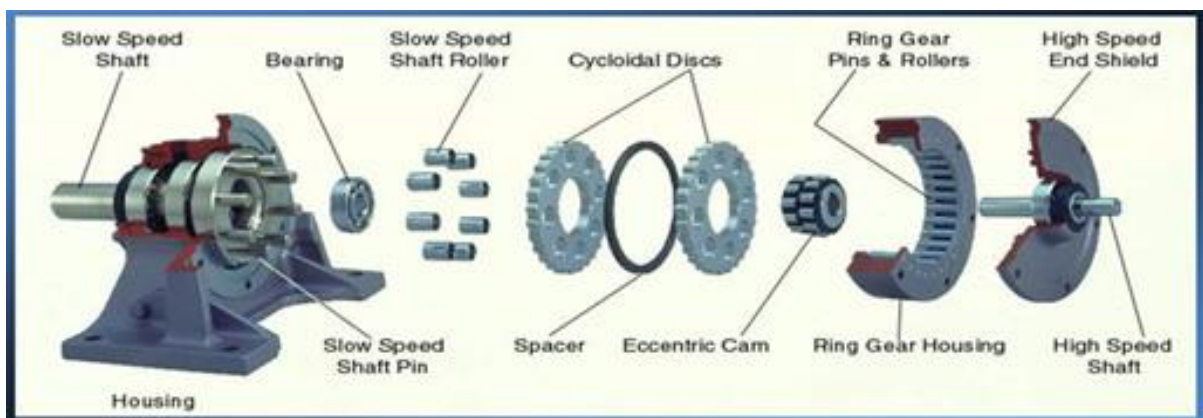


Рис. 2.1. Схема циклоїдного редуктора в розборі

Світові компанії, що виготовляють циклоїдні редуктори серійно: STM Team, SITI, Varmec, Nord, Bonfiglioli, Bauer, Motovario, Varvel, Nabtesco та ін. [33].

Перевагами циклоїдних передач виступають:

- незворотність та безлюфтовість, що дає високу кінематичну точність та є важливим для робототехніки та індустріальної автоматизації;
- можливість реалізувати широкий діапазон передатних чисел навіть в одній ступені (3...191);
- плавність ходу та низький рівень вібрацій / шуму – надійність та довгий строк служби завдяки цьому (до 50 000 ч);
- низький рівень зношування зубців завдяки формі епіциклоїди;
- відсутня необхідність в постійному змащенні;
- компактний плоский дизайн при високій навантажувальній здатності, стійкість до ударних навантажень завдяки тому, що половина зубців знаходяться в зачепленні;
- невеликі показники інерційності завдяки конструкційним особливостям, що дає низький сумарний момент інерції приводу;
- можливість використовувати меншу кількість зубців без підрізання зубців, що має місце у звичайних зубчатих кілець. Теоретично, можуть бути виготовлені колеса з трьома або двома зубами;
- простота збирання механізму;
- допустимість для певного спектру застосувань друкувати абсолютну більшість деталей на 3D-принтері з пластику; покупними деталями будуть виступати підшипники декількох типорозмірів, болти та гайки. Це робить виготовлення пластикового редуктора доволі недорогим та доступним навіть в умовах дому або невеликої майстерні. Проте потрібно зауважити, що геометрична точність друку та усадка пластику після охолодження до кімнатної температури – на практиці можуть приводити як до блокування механізму через натяг, так і до виникнення люфтиння через зазори.

Недоліками циклоїдних передач виступають:

- більш високі вимоги до точності виготовлення та складні геометричні форми. Відхилення в геометрії ведуть до зміни передаточного відношення;
- циклоїдна пластина розміщена та рухається ексцентрично, що призводить до вібрацій та скорочення строку служби. Для нівелювання статичного дисбалансу встановлюють другу циклоїдну пластину, повернуту відносно першої пластини на півоберта. При високих швидкостях обертання встановлюють три пластини (одна велика в центрі та дві маленькі по боках та що рухаються опозитно до великої) – це дозволяє нівелювати статичний та динамічний дисбаланс.
- дещо менший коефіцієнт корисної дії (85%), порівняно з багатоступеневою зубчастою передачею (95%) та планетарними передачами (90%).
- висока вартість передачі при порівнянні з іншими типами передач (внаслідок вимог до точності та великих навантажень підшипників) [34].

Найближчим конкурентом для циклоїдних редукторів перед задачею забезпечення великих передаточних відношень при компактному дизайні – є планетарні редуктори.

Перевагами планетарних редукторів виступають: висока щільність обертового моменту, розподіл навантаження поміж планетарними зубчастими колесами, плавність роботи, висока ефективність, низька інерційність, малий люфт, доступність та низька вартість.

Недоліками планетарних редукторів виступають: високі габарити за довжиною при високих передатних числах через додавання другої та третьої ступенів, наявність люфту, знос зубчастих коліс та шум.

Тож, інженер при виборі з цих двох видів редукторів для приводів маніпулятора має розглянути вимоги до: позиціонування (наявність люфту), передатного числа, геометричних розмірів [35].

Основними частинами редуктора є корпус, вхідний вал, циклоїдні пластини, вихідний вал. Обертання від приводу передається на вхідний вал через муфту або в інший спосіб. На вхідному валу ексцентрично встановлені та вільно обертаються дві циклоїдні пластини. Вони розміщені опозитно один до одної (різниця в півоберта) для нівелювання статичного дисбалансу. Циклоїдні пластини обкочуються зовнішнім контуром по встановленим в корпусі по колу ряду роликів. Також пластини мають ряд отворів по колу, по яким обкочуються стрижні, встановлені в вихідний вал (диск). Далі з вихідного валу перетворений обертальний рух передається на робочий орган за допомогою жорсткого монтажу на диск, муфти або в інший спосіб. Напрямок обертання вихідного вала протилежний до руху вхідного вала. Рисунок 2.2 показує рух деталей в циклоїдній передачі та його подібність до руху деталей в планетарній передачі.

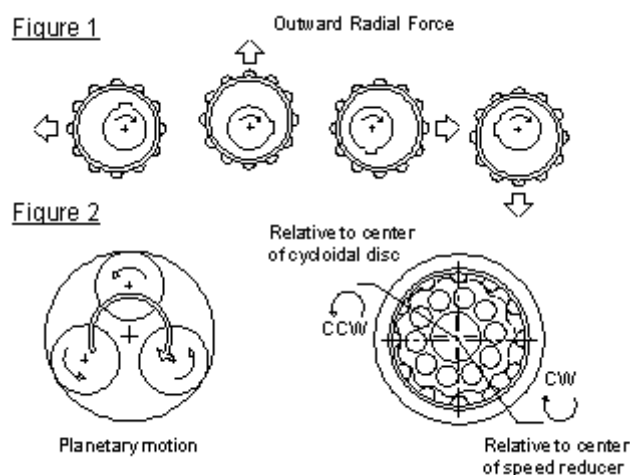


Рис. 2.2. Схема перетворення обертального руху в циклоїдному редукторі

В корпусі встановлено більше роликів (зовнішнє кільце), ніж зубців на циклоїдній пластині. Ця різниця примушує циклоїдну пластину обертатися швидше в порівнянні з аналогічним рухом при відсутності зовнішнього кільця. За рахунок збільшеної частоти обертання циклоїдної пластини

вихідний вал через систему стрижнів знімає відносно рівномірний рух обертання при русі хитання циклоїдної пластини [36].

Передаточне відношення для циклоїдного редуктора може бути обраховане за формулою:

$$i = \frac{L}{P - L},$$

де  $L$  – кількість виступів (lobes) на циклоїдній пластині,  $P = L + 1$  – кількість роликів (pins), що встановлені в корпусі.

Потенціально можуть бути досягнуті значення ККД одноступеневої циклоїдної передачі — 95 %, двоступеневої — 90 %. При цьому, передаточне відношення одноступеневого циклоїдного редуктора досягає значень 119:1, двоступеневого — 7569:1, трьохступеневого — до 1 000 000:1.

## 2.2. Проектування циклоїдного редуктора

В даному розділі описані основні етапи проектування циклоїдного редуктора. Проектування проведене з використанням рекомендацій декількох джерел інформації як з теоретичних, так і практичних аспектів [37, 38, 39].

Вхідні дані обрані з конструктивних міркувань для обраної сфери застосування редуктора:

Табл.2.1

Величина	Значення
Передаточне відношення	$i = 15$
Радіус кола, на якому в корпусі встановлені ролики	$R = 40$ мм
Ексцентриситет між вхідним валом та циклоїдною пластиною	$E = 1$ мм
Радіус роликів	$Rr = 4$ мм
Кількість роликів	$N = i + 1 = 16$



Зовнішній контур циклоїдної пластини має доволі складну форму. В найпростішому варіанті профіль отримують за допомогою еквідистанти до циклоїди, що отримана обкочування кола радіусом  $\delta = \frac{Rr}{i}$  по базовому колу радіусом  $R$  (рис. 2.3, [40]).

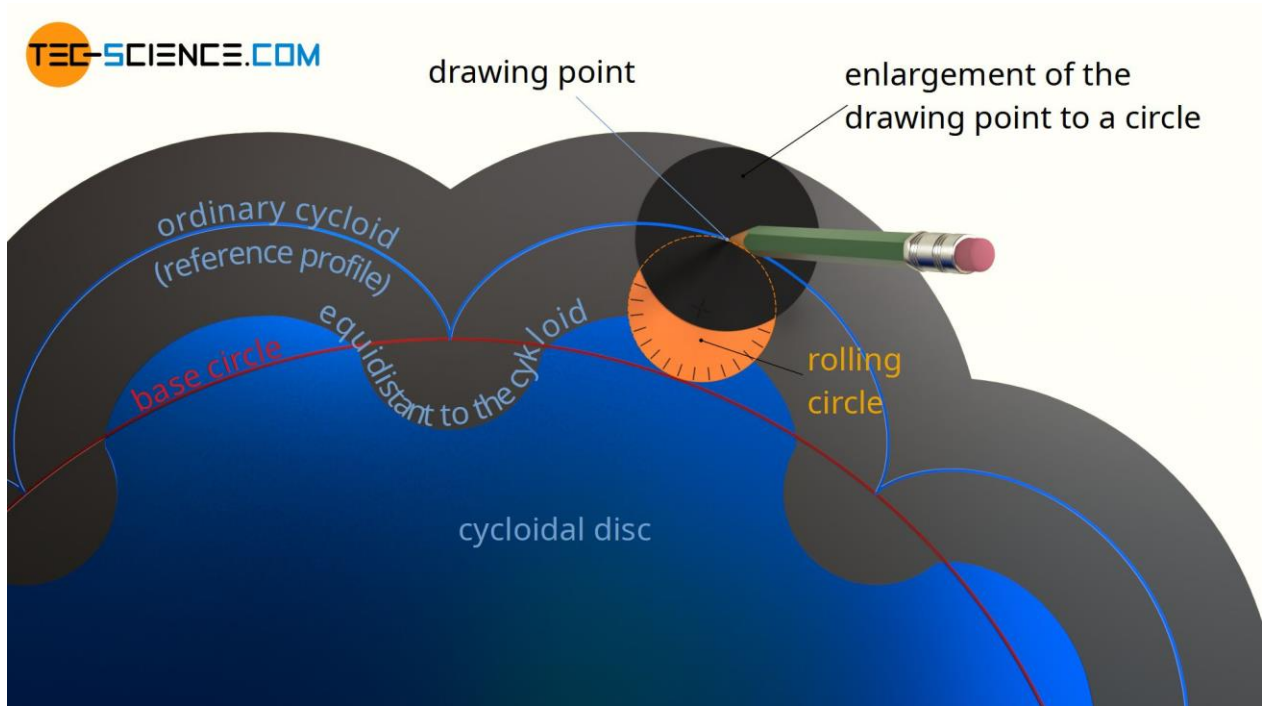


Рис. 2.3. Побудова звичайної циклоїди та профілю циклоїдної пластини (червоною лінією показане базове коло, синьою – циклоїда)

В даний момент найчастіше використовують інший тип профілю – вкорочена циклоїда (contracted cycloid). Даний профіль отримується аналогічно обкочуванням малого кола по базовому колу, проте точки на малому колі обрані не на максимальному радіусі (рис. 2.4). Така форма дає можливість зменшити ексцентричність пластини, що призводить до значних силах дисбалансу на високих швидкостях та нерівномірного руху; зменшення радіусу та кількості внутрішніх отворів та зменшення товщини пластини; профіль стає більш гладким та без різких переходів (рис. 2.5).

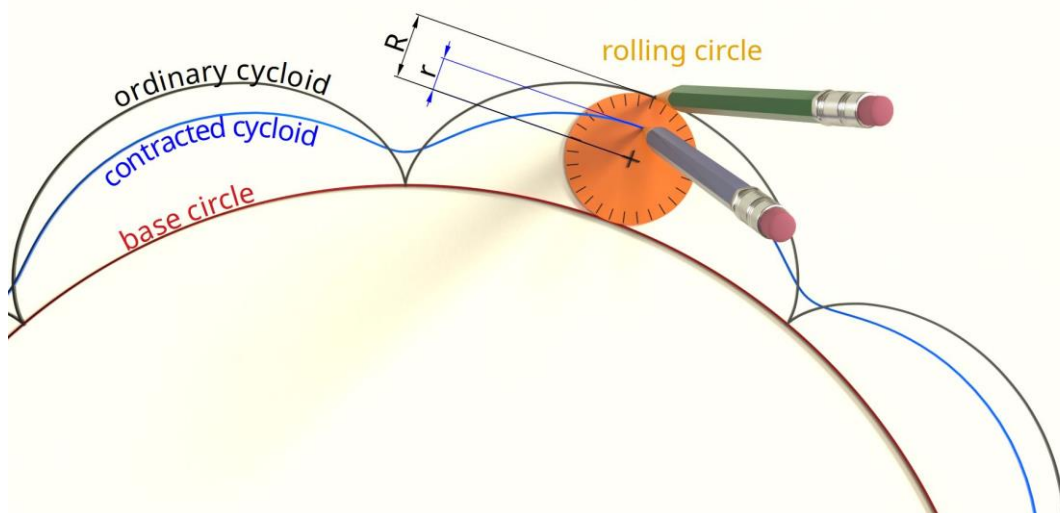


Рис. 2.4. Побудова вкороченої циклоїди та профілю циклоїдної пластини  
(червоною лінією показане базове коло, синьою – циклоїда)

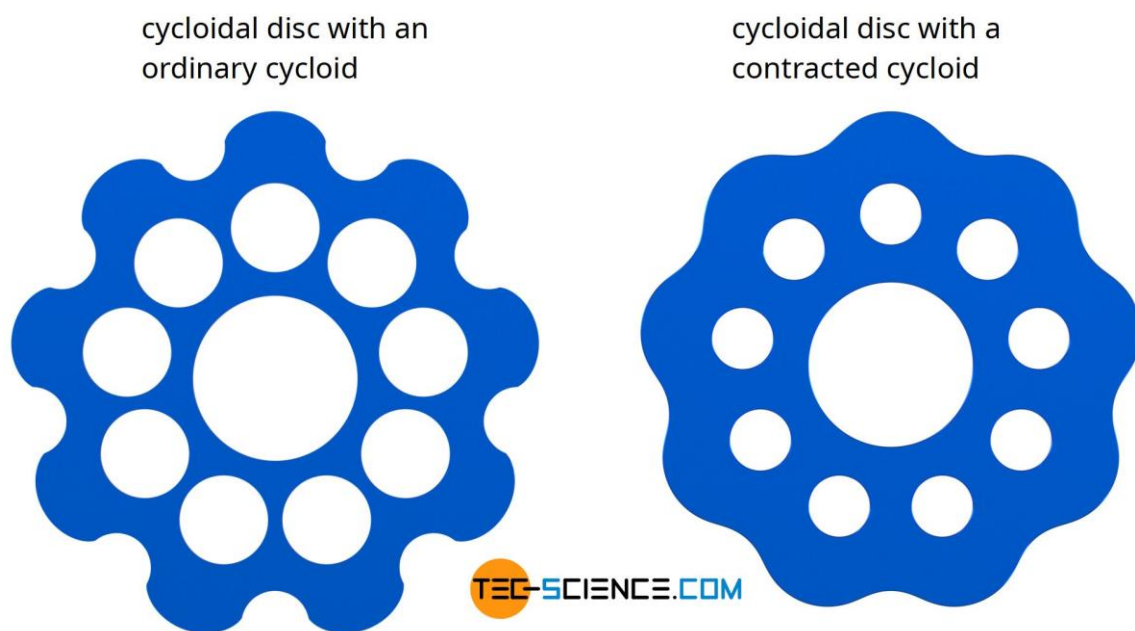


Рис. 2.5. Різниця в профілях циклоїдних пластин  
(зліва – отримана зі звичайної циклоїди, справа – з вкороченої циклоїди)

В сучасних CAD системах можна оминати описаний вище відносно складний етап формування профілю за допомогою використання стандартної опції – побудови в ескізі кривої, функція якої задана заданою параметрично. Рівняння, що описують форму ротора:

$$X = R * \cos(\theta) - Rr * \cos(\theta - \psi) - E * \cos(N * \theta)$$

$$Y = -R * \sin(\theta) + Rr * \sin(\theta - \psi) + E * \sin(N * \theta),$$

$$\text{де } \psi = -\tan^{-1} \left[ \frac{\sin((1 - N)\theta)}{(R/EN) - \cos((1 - N)\theta)} \right], (0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ).$$

Після перетворення системи рівнянь, отримано систему, що описує зовнішню форму циклоїдної пластини та має чотири геометричних параметри на вході ( $R, E, Rr, N$ ) та параметр  $\theta$  або  $t$ , що змінюється від нуля до 360 градусів:

$$X = (R * \cos(t)) - (Rr * \cos(t + \arctan(\sin((1 - N) * t) / ((R / (EN)) - \cos((1 - N) * t)))) - (E * \cos(N * t));$$

$$Y = (-R * \sin(t)) + (Rr * \sin(t + \arctan(\sin((1 - N) * t) / ((R / (EN)) - \cos((1 - N) * t)))) + (E * \sin(N * t)).$$

Підставимо обрані на початку геометричні параметри та спростимо рівняння:

$$X = (40 * \cos(t)) - (4 * \cos(t + \arctan(\sin((1 - 16) * t) / ((40 / (1 * 16)) - \cos((1 - 16) * t)))) - (1 * \cos(16 * t));$$

$$Y = (-40 * \sin(t)) + (4 * \sin(t + \arctan(\sin((1 - 11) * t) / ((40 / (1 * 16)) - \cos((1 - 16) * t)))) + (1 * \sin(16 * t)).$$

$$X = (40 * \cos(t)) - (4 * \cos(t + \arctan(\sin(-15 * t) / (2.5 - \cos(-15 * t)))) - (1 * \cos(16 * t));$$

$$Y = (-40 * \sin(t)) + (4 * \sin(t + \arctan(\sin(-15 * t) / (2.5 - \cos(-15 * t)))) + (1 * \sin(16 * t)).$$

Додатково через особливість синтаксису Autodesk Inventor, в якій проводиться моделювання, назву функції *arctan* замінюємо на *atan*. В деяких системах, наприклад Solidworks неможливо побудувати весь контур одразу ( $0^\circ \leq t \leq 360^\circ$ ). Можливо побудувати половину профілю ( $0^\circ \leq t \leq 180^\circ$ ) та віддзеркалити відносно осі X, проте тоді виникають артефакти на

кінцях кривої. Варіантом рішення є побудова кривої зі зміною параметра в межах  $(-10^\circ \leq t \leq 190^\circ)$ , відрізання зайвих “хвостів” та подальше віддзеркалення півпрофілю відносно осі X.

Коли отриманий профіль циклоїдної пластини, потрібно додати отвори: в центрі та зміщений по горизонталі на величину ексцентриситету отвір, в який буде вставлений вхідний вал; масив по колу отворів, діаметр яких дорівнює діаметру вихідних стрижнів додати  $2 * E$ . Додатково бажано побудувати ескіз, де будуть показані профіль першої пластини, профіль другої пластини (повернутий на півоберту), розташування роликів з корпусу та стрижнів з вихідного валу. Це дозволить візуально перевірити правильність побудови геометрії всіх контактуючих деталей (рис. 2.6).

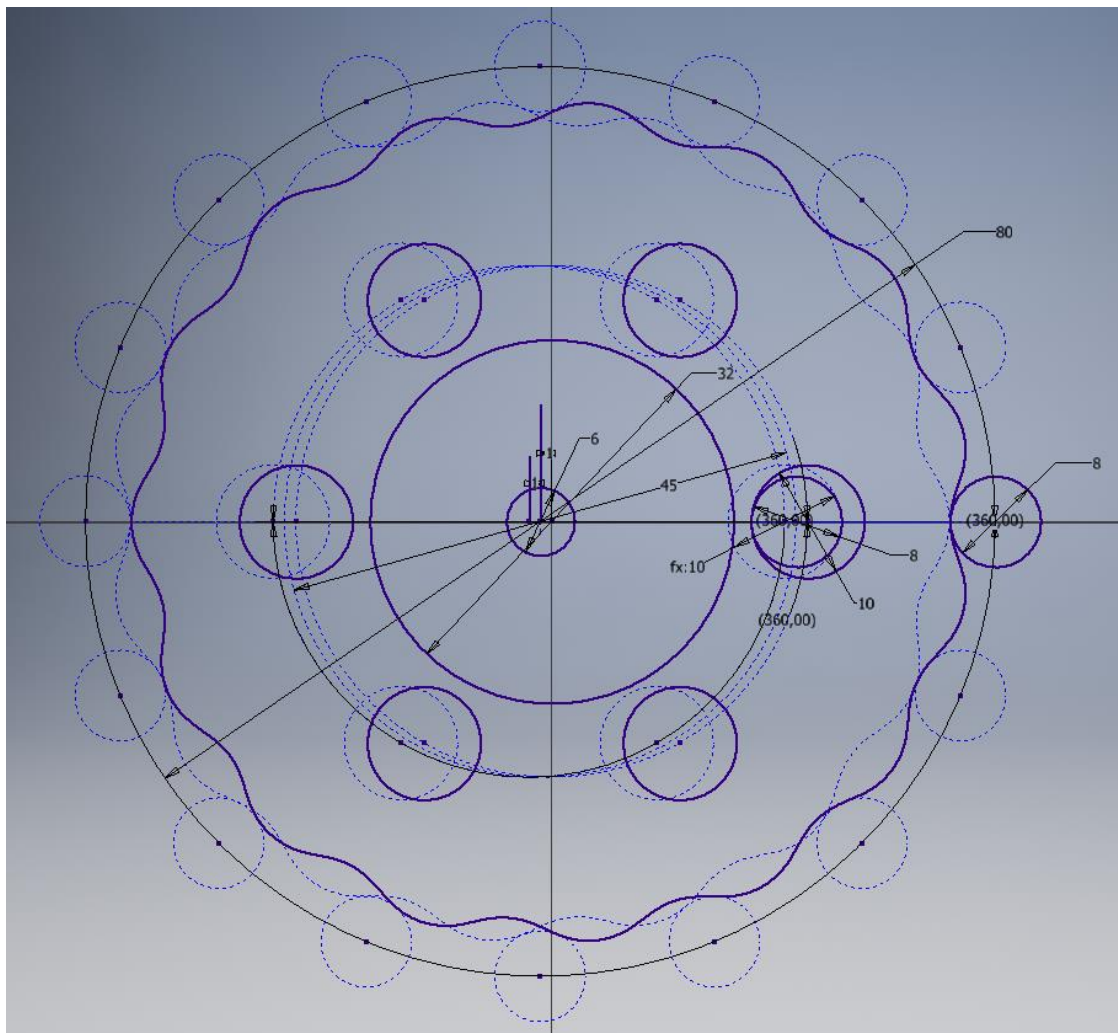


Рис. 2.6. Перевірка на ескізі геометрії двох циклоїдних пластин

Вхідний вал зроблений у вигляді трьох з'єднаних між собою деталей, що дає можливість встановити на одному валу дві ексцентрично розташовані пластини. Розміри підшипників, окремих деталей обиралися з конструктивних міркувань. Складальне креслення наведена на рис. 2.7, специфікація в додатку 4. В майбутньому з метою оптимізації масо-габаритних параметрів доречно провести вибір підшипників та уточнити геометрію деталей. Дані розрахунки потребують оцінки значень статичних та циклічних навантажень на кожну відповідальну поверхню.

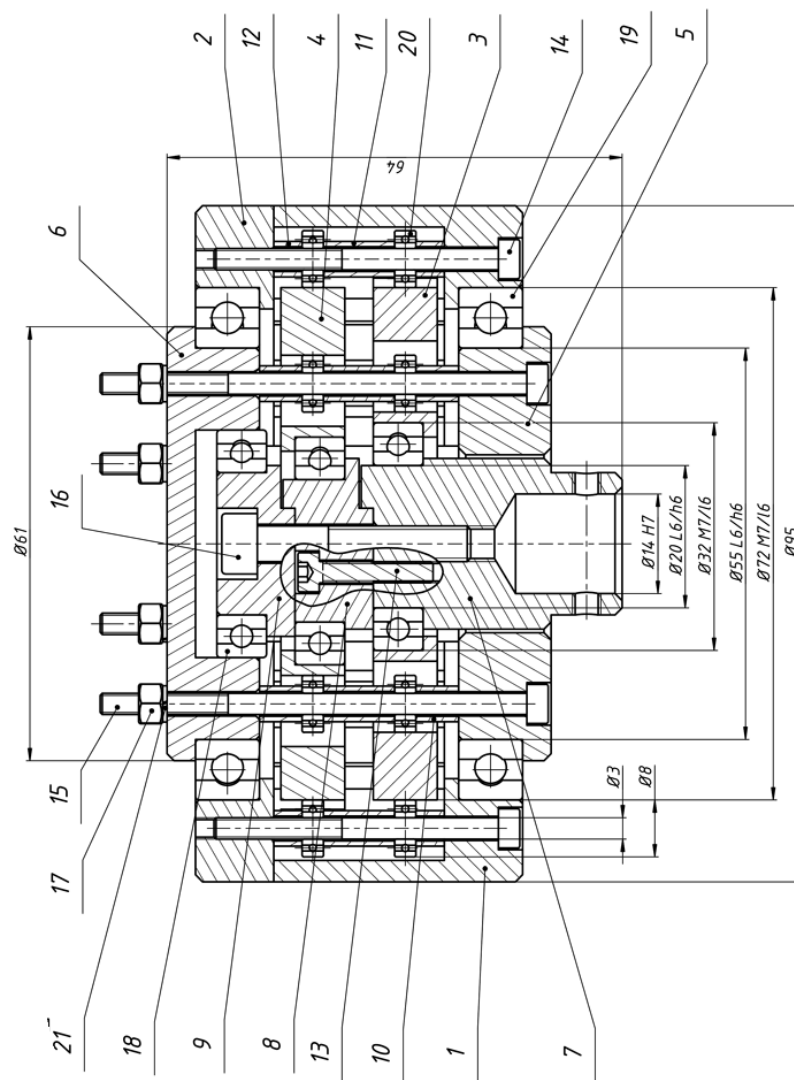


Рис. 2.7. Складальне креслення спроектованого циклоїдного редуктора

### 2.3. Аналіз напружень редуктора та окремих деталей

В даному розділі проведений аналіз напружень методом скінченних елементів збірки редуктора та окремих деталей в середовищі Autodesk Inventor з метою перевірки запасу міцності, виявлення ослаблених деталей, величин зміщення та ін.

В першу чергу, проведемо орієнтовний аналіз напружень збірки циклоїдного редуктора в статичному стані. З математичної моделі, що буде описана в наступній главі, беремо момент обертання на вихідному валу редуктора рівним  $M = 420$  Нм. Тоді даний момент розподіляється на шість болтів, що стягують вихідний вал та ряд деталей. Момент, що прикладений в збірці до кожного з болтів дорівнює  $M_b = \frac{M}{6} = \frac{420}{6} = 70$  Нм. Момент, що прикладений в збірці до вхідного валу, дорівнює  $M_v = \frac{M}{i} = \frac{420}{15} = 28$  Нм. В моделі на корпус накладена опора «Защемлення» (рис. 2.8).

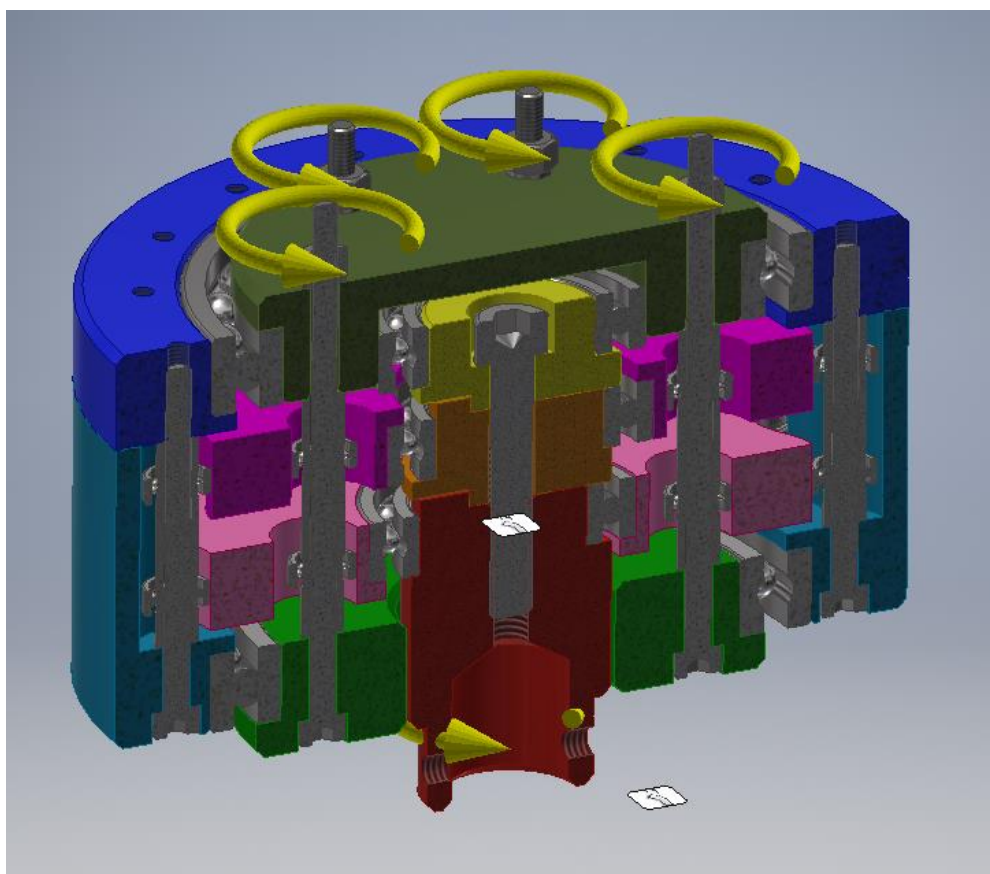


Рис. 2.8. Схема навантаження та опор для аналізу напружень



Були внесені зміни в геометрію сіток, що побудовані для деталей, з метою підвищення або зниження деталізації, де це необхідно. Автоматично створені програмою контакти були просортовані за групами для більш правильної характеризування взаємодії поверхонь тіл.

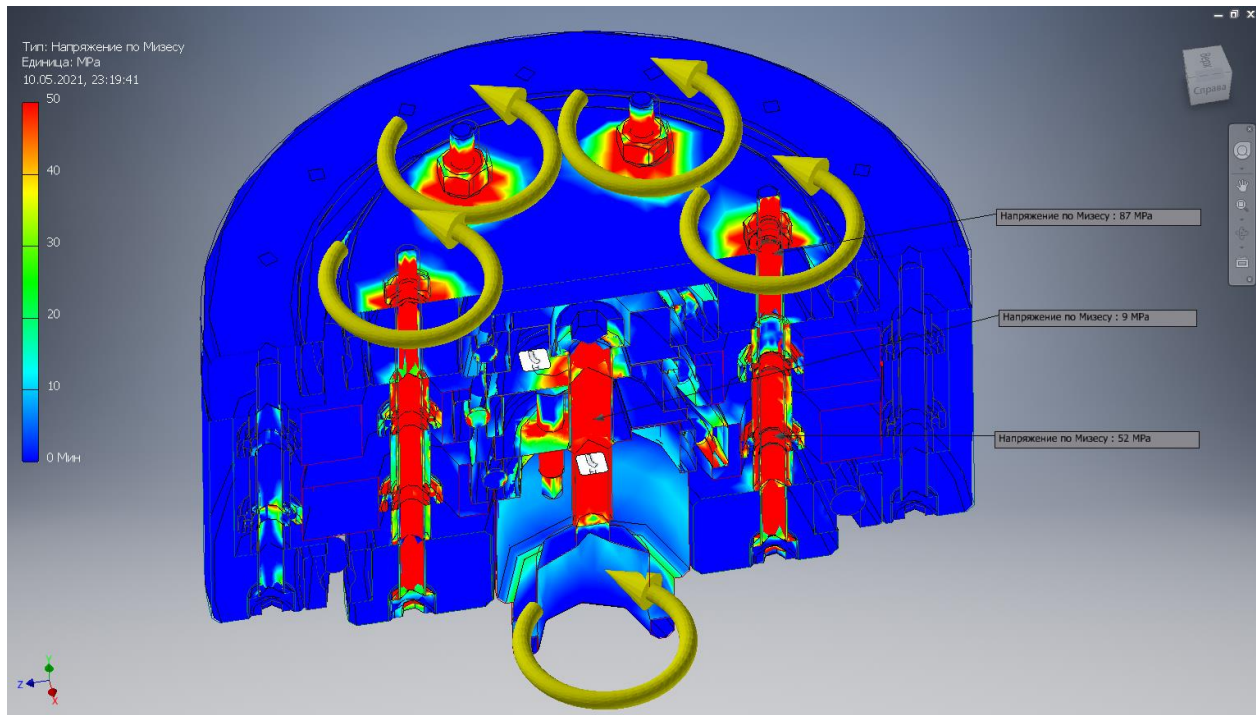
1. «Гаряча посадка з ковзанням» - для контактів валів з циліндричними поверхнями кілець підшипників.

2. «Розділення» - для контактів торцевих поверхонь деталей.

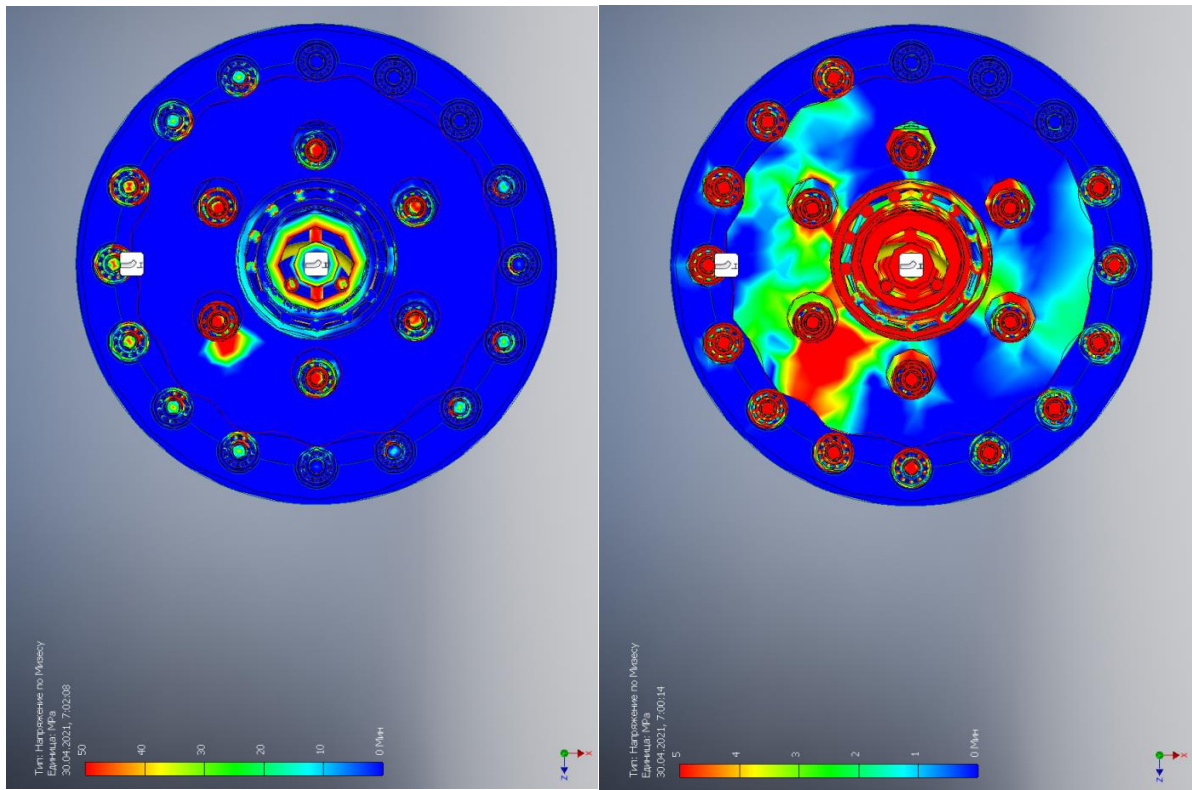
3. «Зв'язані» - для контактів тіл, що жорстко з'єднані, наприклад різьбою.

4. «Ковзання без розділення» - для контактів пазів кілець та кульок підшипників.

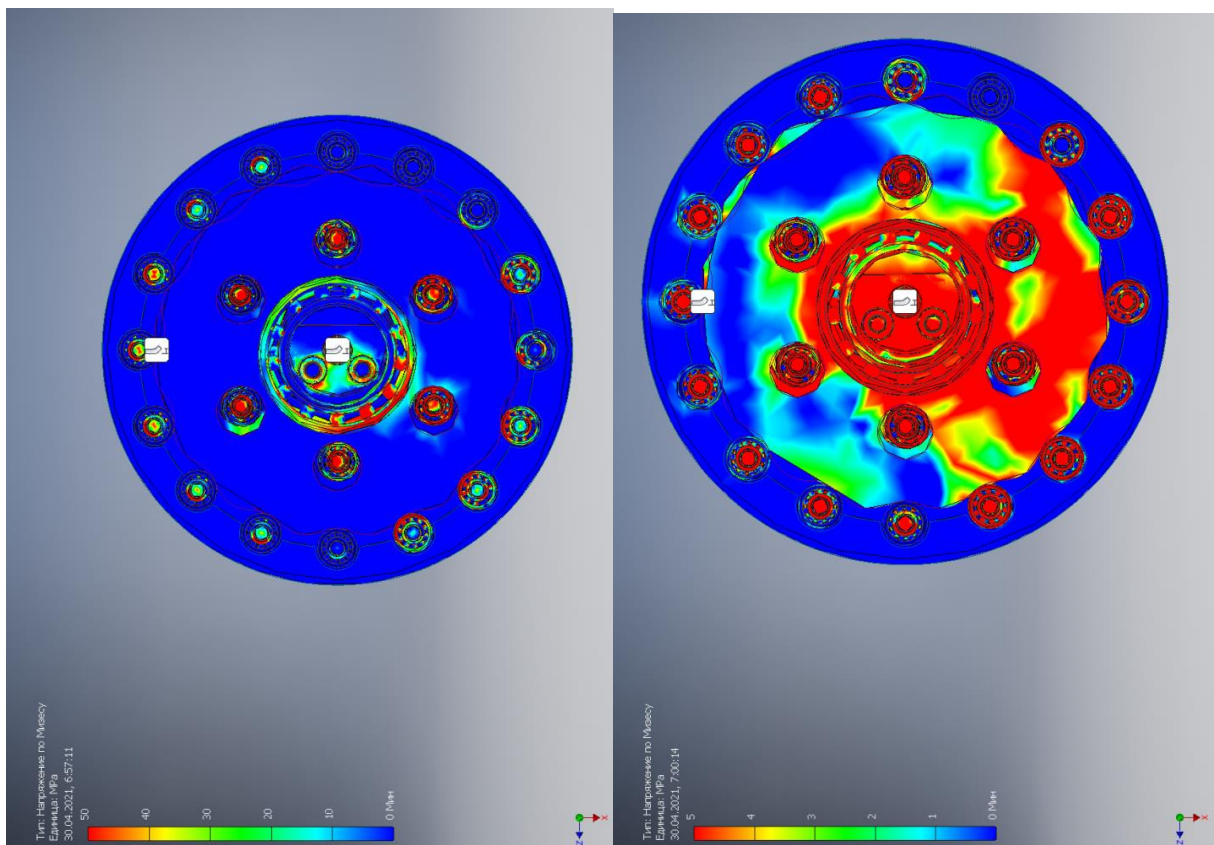
Результати моделювання наведені на рис. 2.9 та 2.10.



а) напруження в збірці



б) напруження на нижній циклоїдній пластині (різні верхні значення шкали)



в) напруження на верхній циклоїдній пластині (різні верхні значення шкали)

Рис. 2.9. Картина розподілу напружень за Мізесом



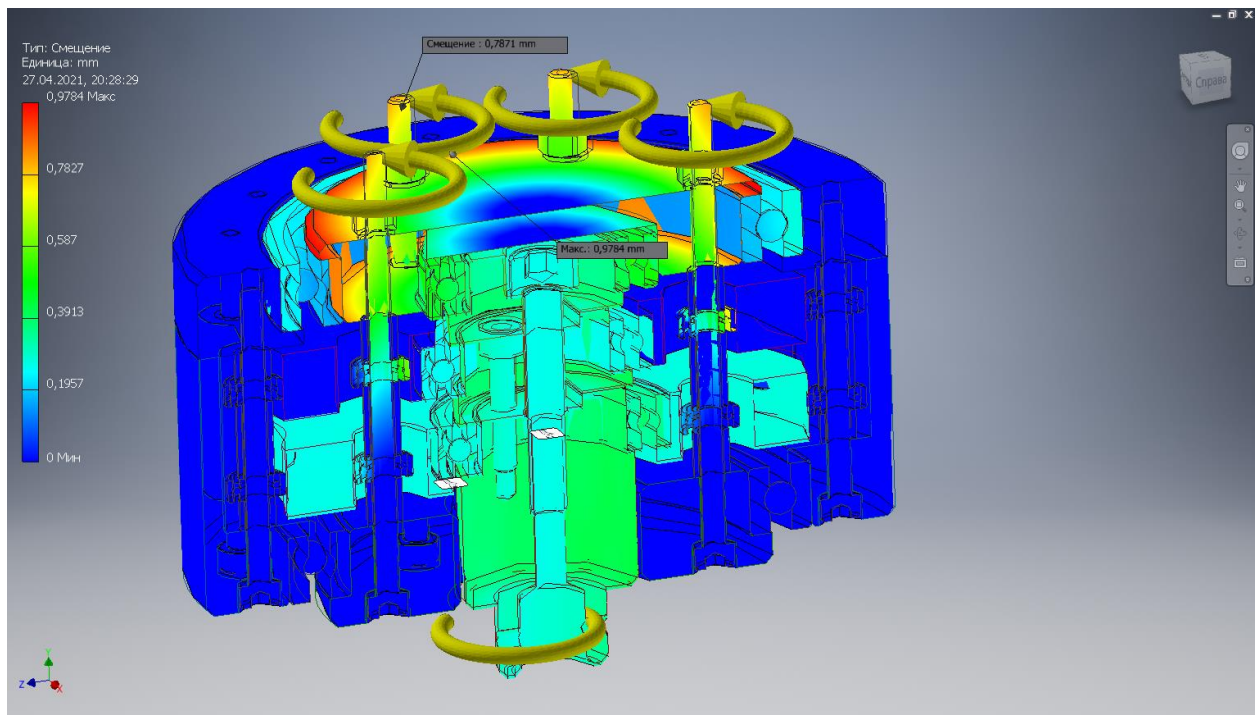


Рис. 2.10. Зміщення точок

Моделювання показує достатній запас міцності для деталей циклоїдного редуктора. В майбутньому потрібно провести подібне дослідження конструкції з точки зору динамічних навантажень та втомної міцності, тому що ряд деталей зазнають навантажень, що часто змінюють величину та напрям. В залежності від результатів дослідження на втому можуть бути збільшені діаметри болтів, що встановлені на вихідному валу. Також проведене дослідження може бути використане в подальшому для оптимізації товщини певних деталей при збереженні характеристик міцності з запасом на допустимому рівні.

Другою частиною дослідження є аналіз напружень в циклоїдній пластині за методикою, описаною в роботі [41].

В теоретичному випадку, всі зубці циклоїдної пластини знаходяться в зачепленні з роликами зовнішнього кільця; половина з них приймає участь у передачі навантаження. На практиці такого не відбувається через існування зазорів, що потрібні для полегшення складання, компенсації неточностей

виготовлення, кращих умов для змащування та ін. Зі збільшенням зазорів зменшується кількість зубців, що передають навантаження. В загальному випадку крутний момент на зовнішньому кільці дорівнює сумі моментів контактних сил (рис. 2.11, 2.12):

$$T_2 = \sum_{i=1}^n F_{Ni} \cdot r_i,$$

де  $F_{Ni}$  – сила в точці контакту роликів та зубців пластини,  $r_i$  – відстань по нормалі від центру обертання вхідного вала до вектору контактної сили.

Відстані  $r_i$  можуть бути теоретично обраховані за формулою:

$$r_i = r_a \cdot \sin(\alpha_i - z \cdot \theta),$$

де  $r_a$  – радіус базового кола циклоїди;  $\alpha_i$  – кут, що контактна сила  $F_{Ni}$  утворює з горизонтальною віссю;  $z$  – кількість зубців циклоїдної пластини;  $\theta$  – поточний кут повороту циклоїдної пластини.

Контактні сили можуть бути приблизно обраховані за співвідношенням між собою:

$$\frac{F_{Ni}}{F_{Nk}} = \frac{r_i}{r_k}.$$

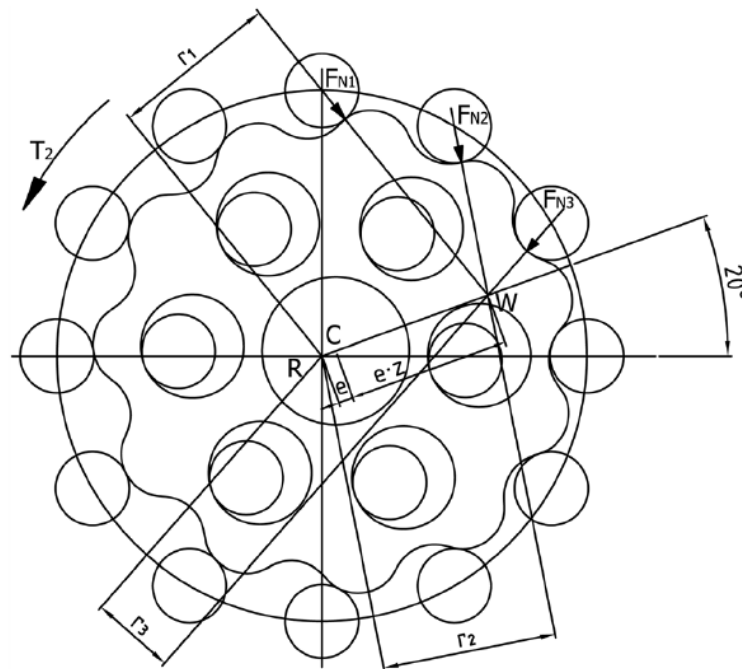


Рис. 2.11. Схема для обрахування контактних сил

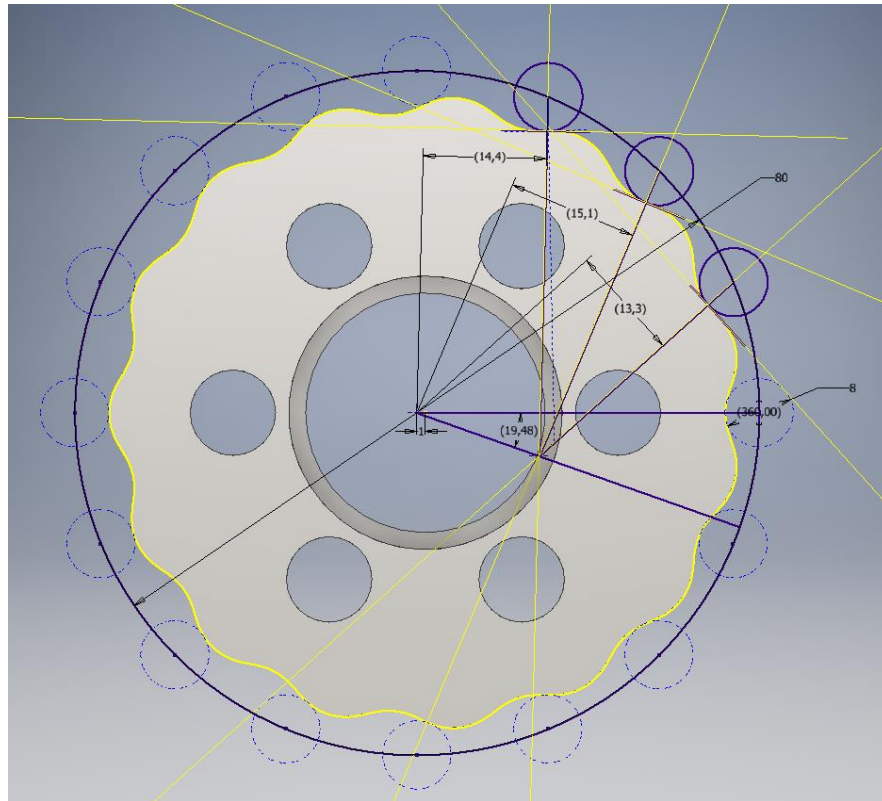


Рис. 2.12. Знаходження відстаней  $r_i$  для циклоїдної пластини

Знайшовши відстані  $r_1 = 14,4$  мм,  $r_2 = 15,1$  мм,  $r_3 = 13,2$  мм – можемо обрахувати сили в точках контакту. З роботи не було очевидним, звідки взята величина  $T_2$  – крутного моменту на зовнішньому кільці, тому для попередніх розрахунків була взята величина моменту на входному валу та збільшена по пропорції діаметрів зовнішнього кільця та входного вала:

$$T_2 = \frac{420 \text{ Нм}}{15} \cdot \frac{80}{14} = 160 \text{ Нм} = 160000 \text{ Нмм.}$$

Для випадку, коли в зачепленні знаходяться лише три зубці, сили в точках контакту дорівнюють:

$$F_{N1} = \frac{T_2 \cdot r_1}{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2} = \frac{160000 \cdot 14,4}{14,4^2 + 15,1^2 + 13,3^2} = \frac{160000 \cdot 14,4}{612,3} = 3763 \text{ Н;}$$

$$F_{N2} = F_{N1} \cdot \frac{r_2}{r_1} = 3763 \cdot \frac{15,1}{14,4} = 3945 \text{ Н;}$$

$$F_{N3} = F_{N1} \cdot \frac{r_3}{r_1} = 3763 \cdot \frac{13,3}{14,4} = 3476 \text{ Н.}$$

Можуть також бути додатково обраховані два крайніх випадки – коли в зачепленні з роликами зовнішнього кільця знаходяться два або один зуб циклоїдної пластини.

При моделюванні в середовищі Autodesk Inventor до циклоїдної пластини прикладені сили  $F_{N1}$ ,  $F_{N2}$ ,  $F_{N3}$  під відповідними кутами. Опори типу «Защемлення» встановлені на центральний отвір та два найближчих отвори, що передають навантаження на болти вихідного диску (рис. 2.13).

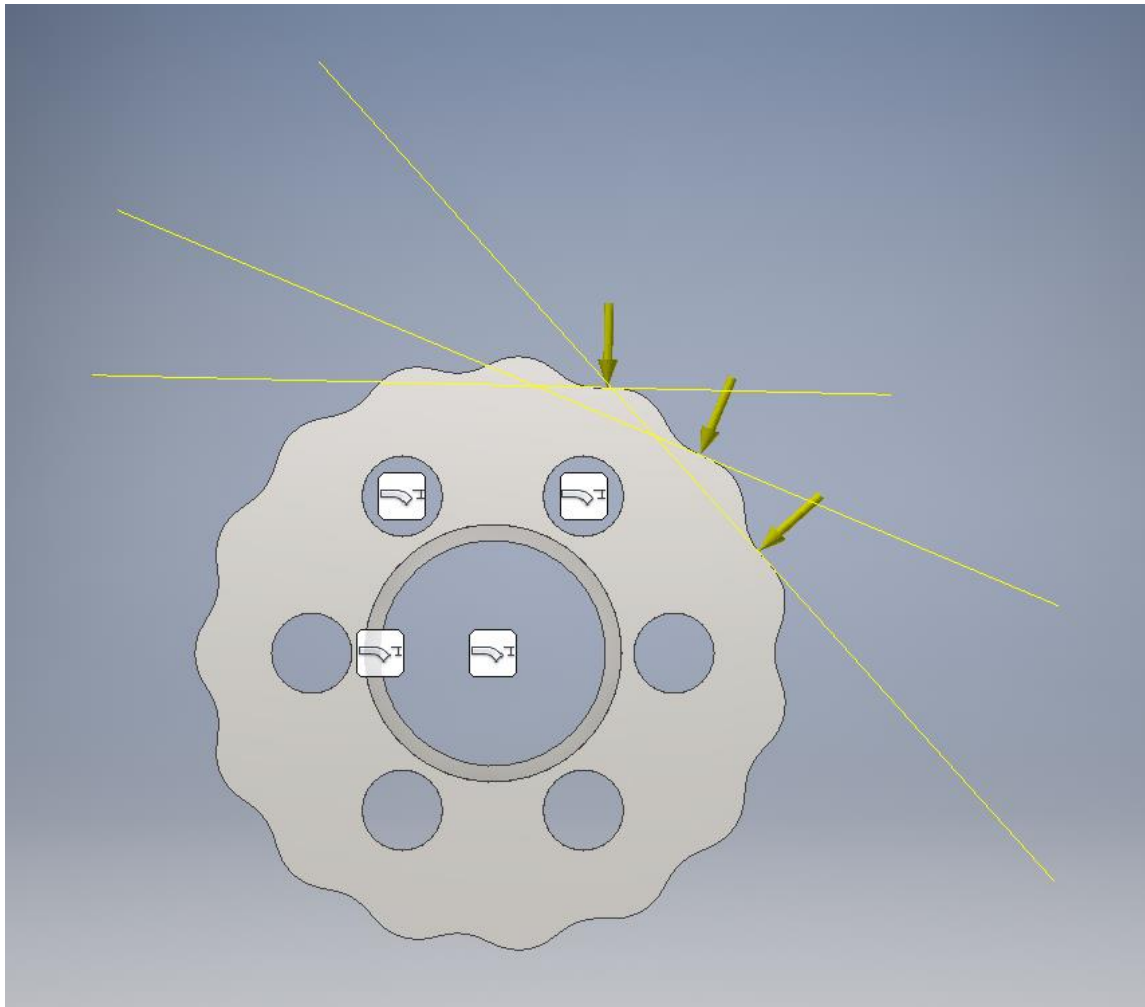
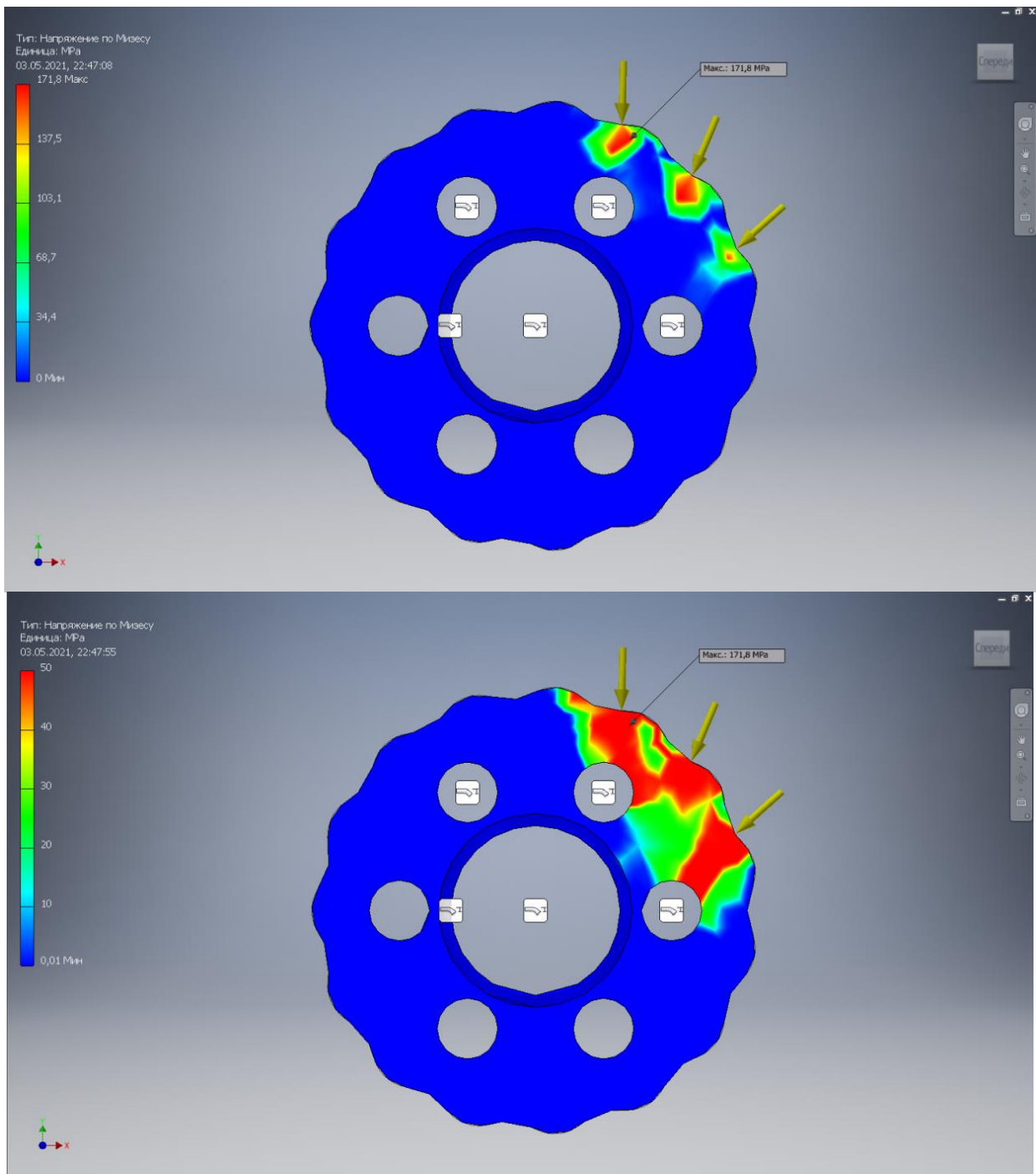
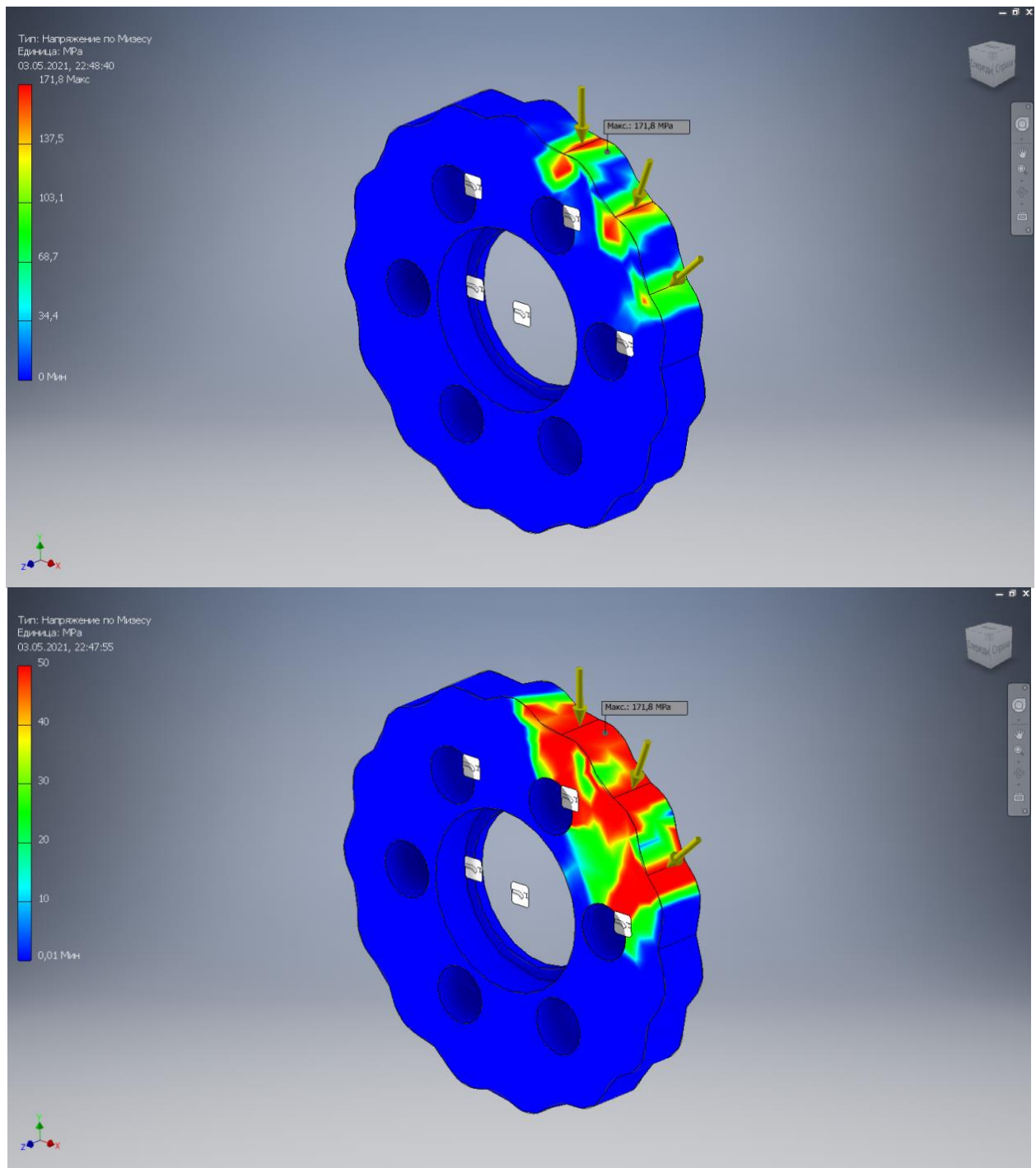


Рис. 2.13. Схема навантаження циклоїдної пластини

Результати моделювання наведені на рис. 2.14 та 2.15. Напруження знаходяться в межах норми.



а) напруження в пластині, вид збоку  
(різні верхні значення шкали)



б) напруження в пластині, кутовий вид  
(різні верхні значення шкали)

Рис. 2.14. Розподіл напружень за Мізесом в циклоїдній пластині



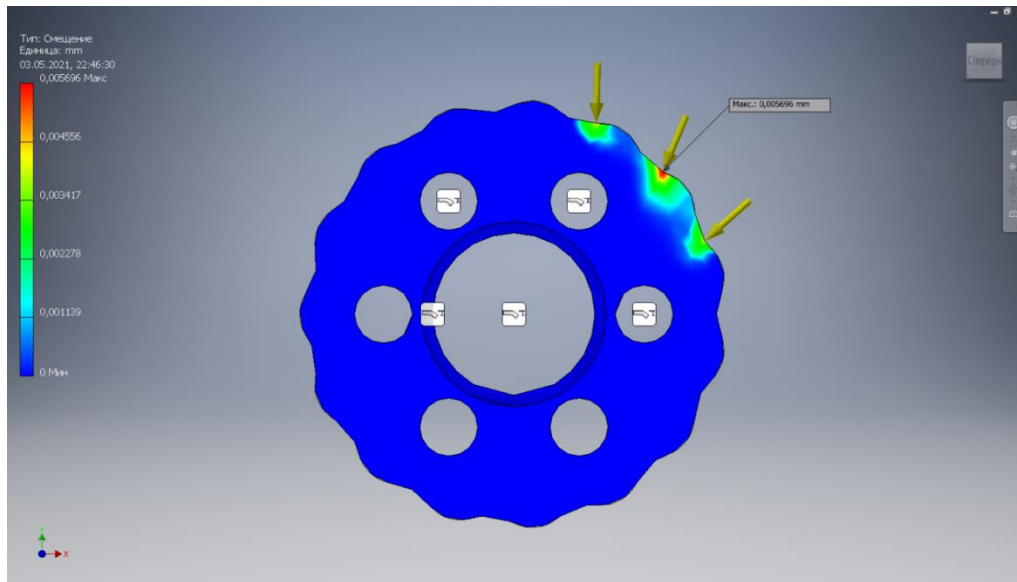


Рис. 2.15. Зміщення точок в циклоїдній пластині

Також існує методика дослідження циклоїдного редуктора в динаміці [42]. На рис. 2.16 зображена динамічна модель, в якій всі деталі редуктора поєднані відповідними пружними та демпфуючими зв'язками.

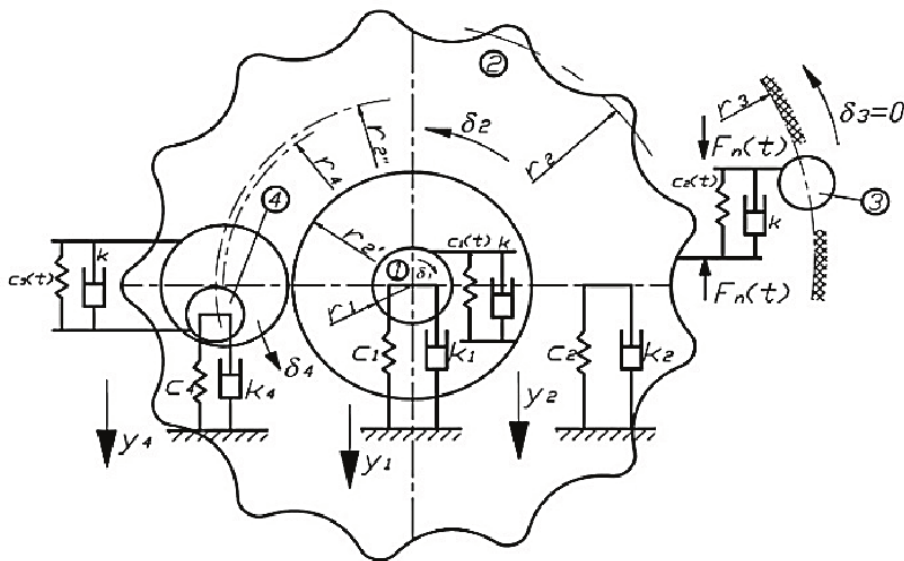


Рис. 2.16. Динамічна модель редуктора

За результатами робіт, описаних в даній главі, були зібрані теоретичні відомості по роботі та проектуванню циклоїдних редукторів; був спроектований циклоїдний редуктор, що був додатково перевірений двома методиками при типовому навантаженні.

### 3. Проектування наземного роботизованого комплексу

#### 3.1. Схемне рішення та принцип роботи комплексу

В даному розділі описана розробка схемного рішення наземного роботизованого комплексу, оснащеного системою маніпуляторів. Об'єднання двох та більше маніпуляторів значно підвищують можливості роботизованого комплексу по взаємодії з різними об'єктами. Завдяки цьому розробка систем маніпуляторів є актуальною технічною задачею [43].

В даному проекті на шасі мобільного роботизованого комплексу будуть встановлені два маніпулятори, в порівнянні з традиційним одиничним маніпулятором (рис. 3.1).

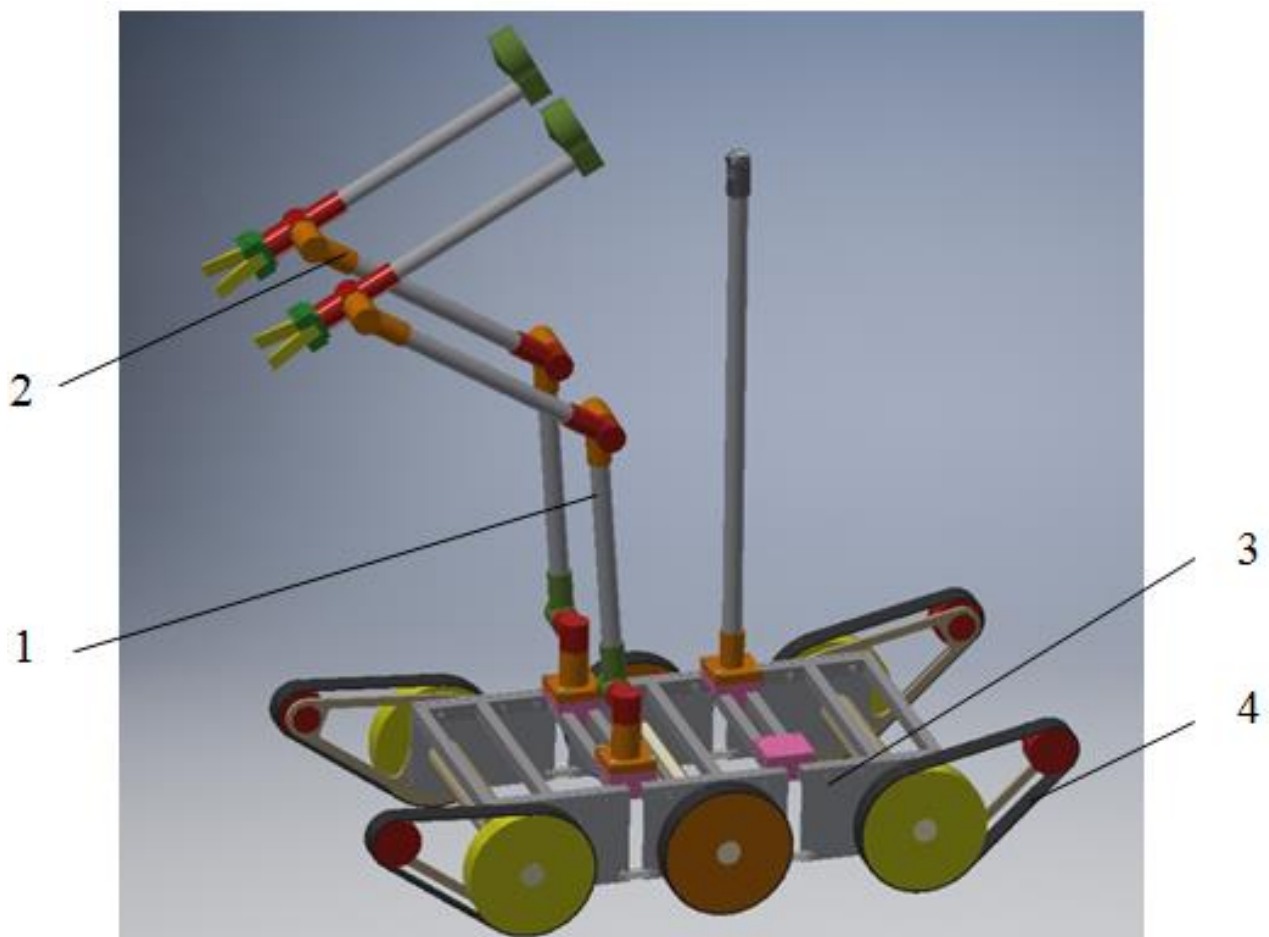


Рис. 3.1. Тривимірна модель наземного роботизованого комплексу, оснащеного системою маніпуляторів

При установці двох маніпуляторів розширюється робочий простір, зменшуються «мертві зони», в яких робота робота-руки неможлива або



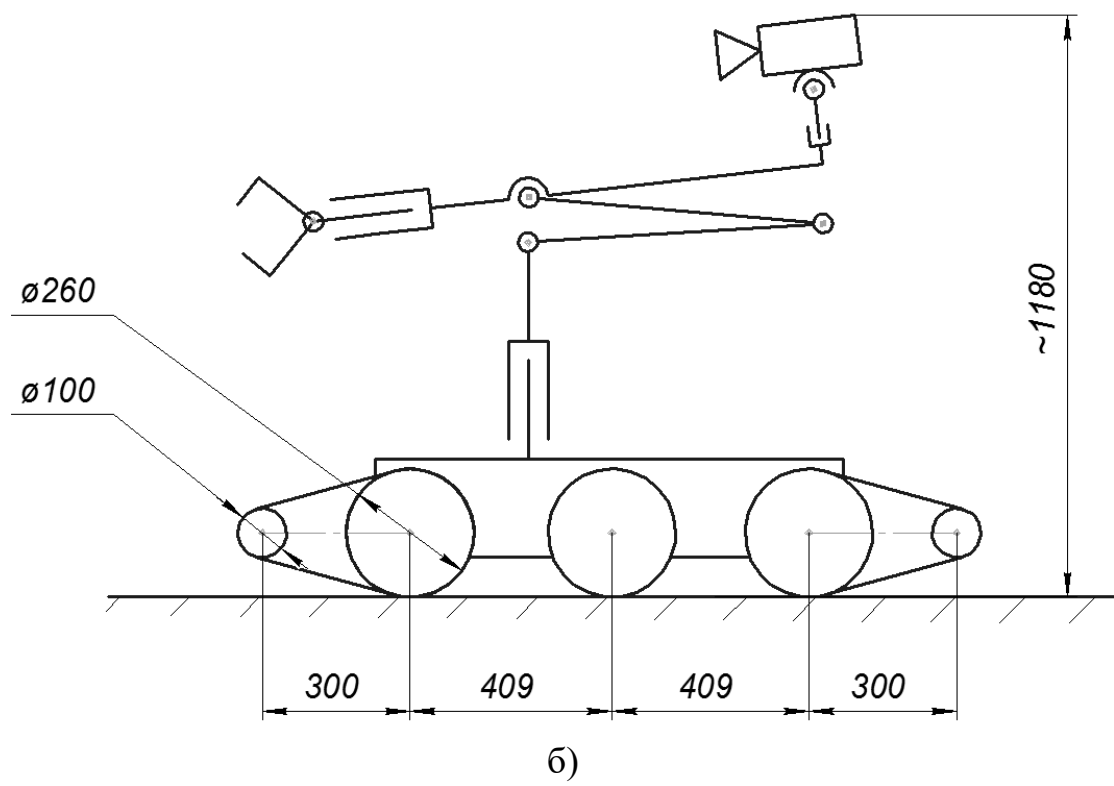
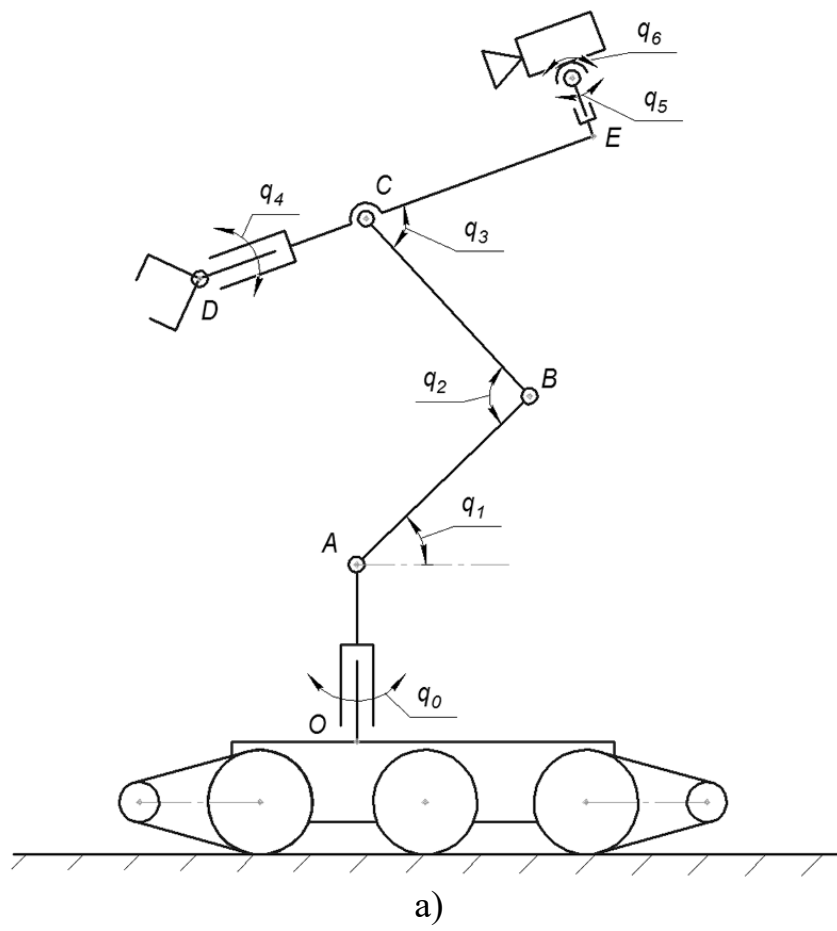
ускладнена. В порівнянні з одиничним маніпулятором, система двох маніпуляторів може утворювати замкнуту схему, що підвищує як вантажопідйомність, так і точність позиціонування. На кожному маніпуляторі опозитно до схвату встановлені відеокамери, що дають можливість оператору за пультом керування скласти повне уявлення про положення об'єкту маніпулювання та середовища навколо.

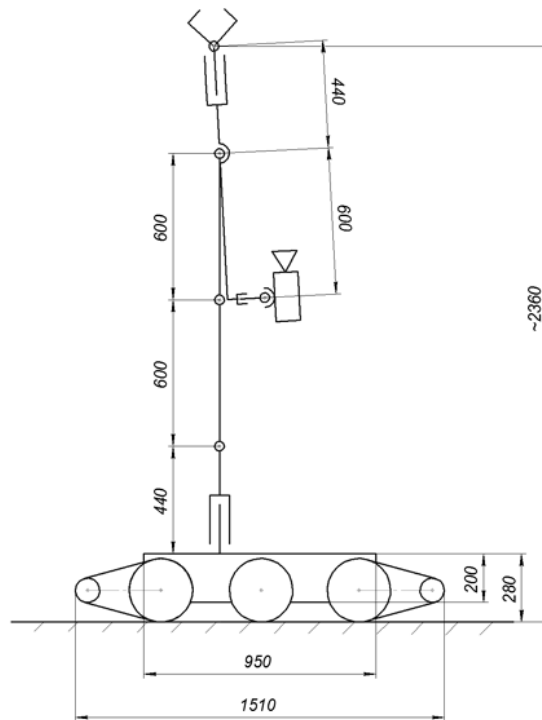
Конструктивно, роботизований комплекс складається з колісно-гусеничному шасі 3 з фліперами (пристроями підвищення прохідності) 2, на яке симетрично встановлені два маніпулятори 1 та 2. Кожен маніпулятор складається з ланок, з'єднаних шарнірами-суглобами, в яких встановлені керовані приводи обертального руху – що загалом забезпечує п'ять ступенів вільності. Камери, встановлені опозитно до схвату на штанзі, мають по дві ступені вільності.

### **3.2. Кінематика системи двох маніпуляторів**

В даному розділі буде проведений опис та аналіз кінематики окремого маніпулятора та системи з двох маніпуляторів.

Обраною схемою маніпулятора є планарний шарнірний механізм, встановлений на поворотному шарнірі, що кріпиться до платформи шасі. Маніпулятор має кутову систему координат – кожна ланка зв'язана з сусідніми керованими кутовими координатами  $q_0, \dots, q_4$  (рис. 3.2) [44].





в)

Рис. 3.2. Кінематична схема одиничного маніпулятора (а), розміри комплексу з маніпулятором у складеному стані (б) та при найбільшому витягуванні вверх схвату (в)

Конструкція руки-маніпулятора забезпечує п'ять ступенів вільності для роботи захвату та дві ступені вільності для повороту відеокамери. Управління та зміна керованих координат проводитиметься з пульта дистанційного керування в даних межах (табл. 3.1).

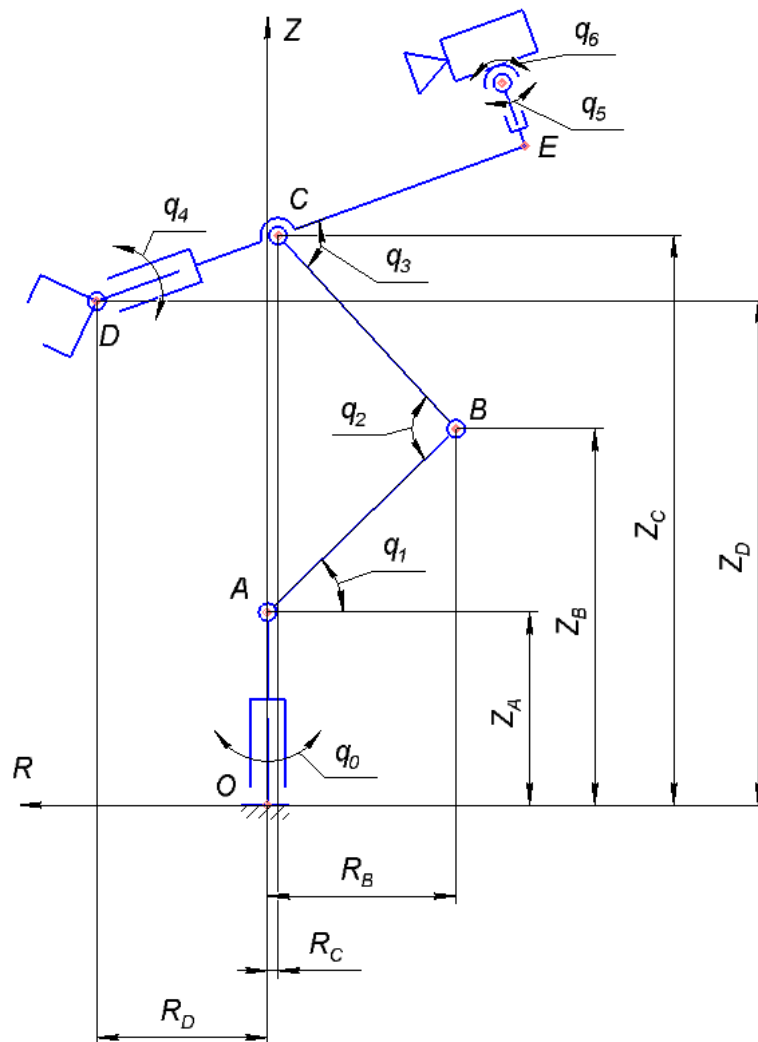
Таблиця 3.1.

#### Характеристика керованих координат

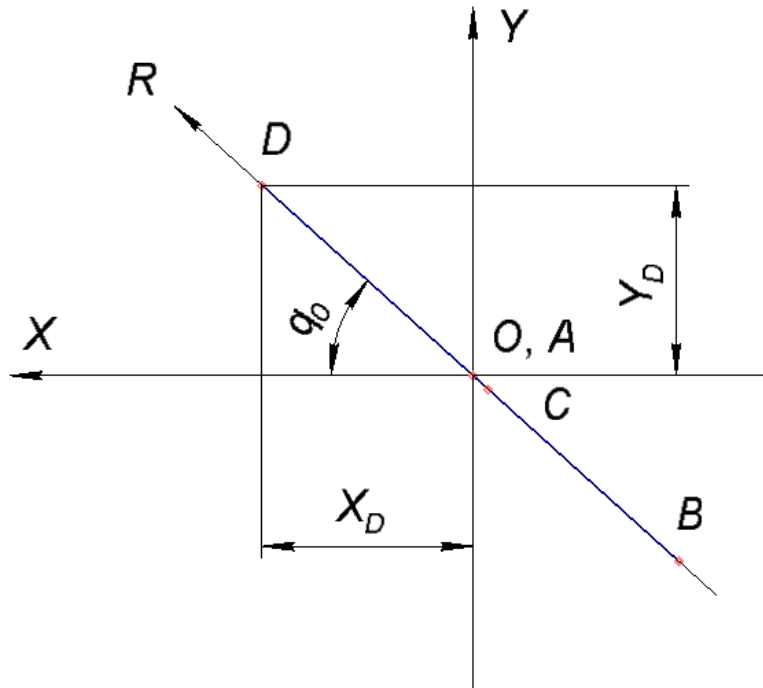
Назва керованої координати	Діапазон значень, °	Максимальна кутова швидкість, °/сек
$q_0$	-180..+180	30
$q_1$	0..180	40
$q_2$	0..360	40
$q_3$	0..180	40
$q_4$	0..360	40

$q_5$	0..360	50
$q_6$	-90..+90	50

Проведемо аналіз кінематики, а саме с точки зору макропереміщень та мікропереміщень. Для знаходження макропереміщень вичислимо координати бази схвату маніпулятора відносно точки кріплення роботизовано руки. Введемо систему координат XYZ з центром в точці O, що зв'язана з платформою шасі. Механізм знаходиться в допоміжній площині ROZ, що повернута від площини XOY на кут  $q_0$ . Суглоби механізму послідовно позначені буквами A, B, C, D. Визначимо проекції цих точок на осі R та Z, а потім проекцію відрізка OD на осі X та Y (рис. 3.3) [45].



a)



б)

Рис.3.3. Координати шарнірів маніпулятора в площині ROZ (а) та розміщення даної площини відносно осей X та Y

Визначимо проекції шарнірів на вісь R:

$$R_A = 0;$$

$$R_B = -AB \cdot \cos q_1;$$

$$R_C = R_B + BC \cdot \cos(q_2 - q_1);$$

$$R_D = R_C + CD \cdot \cos(q_3 - q_2 + q_1).$$

Визначимо проекції шарнірів на вісь Z:

$$Z_A = OA;$$

$$Z_B = Z_A + AB \cdot \sin q_1;$$

$$Z_C = Z_B + BC \cdot \sin(q_2 - q_1);$$

$$Z_D = Z_C - CD \cdot \sin(q_3 - q_2 + q_1).$$

Визначимо проекцію відрізка OD на вісь X:

$$X_D = \cos q_0 \cdot R_D$$

Визначимо проекції відрізка OD на вісь Y:

$$Y_D = \sin q_0 \cdot R_D$$

Таким чином, формули для знаходження лінійних координат точки D (де знаходиться кріплення схвата) відносно платформи шасі:

$$X_D = \cos q_0 (-AB \cdot \cos q_1 + BC \cdot \cos(q_2 - q_1) + CD \cdot \cos(q_3 - q_2 + q_1));$$

$$Y_D = \sin q_0 (-AB \cdot \cos q_1 + BC \cdot \cos(q_2 - q_1) + CD \cdot \cos(q_3 - q_2 + q_1));$$

$$Z_D = OA + AB \cdot \sin q_1 + BC \cdot \sin(q_2 - q_1) - CD \cdot \sin(q_3 - q_2 + q_1).$$

Швидкості та прискорення точки D визначаються як похідні координати:

$$V_{X_D} = \frac{d X_D}{dt}; V_{Y_D} = \frac{d Y_D}{dt}; V_{Z_D} = \frac{d Z_D}{dt};$$

$$a_{X_D} = \frac{d^2 X_D}{dt^2}; a_{Y_D} = \frac{d^2 Y_D}{dt^2}; a_{Z_D} = \frac{d^2 Z_D}{dt^2}.$$

Кутові координати точки D дорівнюють (якщо нехтувати кутом повороту  $q_4$ ):

$$\varphi_D = 180^\circ - \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(q_3 - q_2 + q_1)}{\sin q_0}\right);$$

$$\theta_D = -\arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(q_3 - q_2 + q_1)}{\cos q_0}\right);$$

$$\psi_D = q_0.$$

Для знаходження фактичних значень координат (пряма задача кінематики) треба задати закони зміни керованих координат. Типовими є лінійна, синусоїдальна залежність або сума декількох таких залежностей.

Для оцінки мікропереміщень (такі, що є порівняно малими, менше характерних розмірів на два-три порядки) використаємо метод, що включає матрицю Якобі.

В прямій задачі кінематики координати кінця маніпулятора знаходяться за функціональною залежністю від величин керованих координат:

$$(x_i) = f[(q_i)],$$

де  $(x_i)$  – вектор лінійних та кутових координат вершини маніпулятора;  
 $(q_i)$  – вектор керованих координат:

$$(x_i) = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}; (q_i) = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}.$$

Отримуємо формулу мікропереміщень за допущенням рівності диференціалів та малих приростів за допомогою диференціювання:

$$(\delta x_i) = (m_{ij}) \cdot (\delta q_j),$$

де  $(\delta x_i)$  – вектор приростів координат вершини маніпулятора;  $(\delta q_i)$  – вектор приростів у керованих координат,  $(m_{ij})$  – матриця Якобі ( $m_{ij} = \frac{\delta f_i}{\delta q_j}; i = 1..6; j = 1..5$ ):

$$(\delta x_i) = \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \\ \delta \varphi \\ \delta \theta \\ \delta \psi \end{bmatrix}; (\delta q_j) = \begin{bmatrix} \delta q_0 \\ \delta q_1 \\ \delta q_2 \\ \delta q_3 \\ \delta q_4 \end{bmatrix}; (m_{ij}) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} & m_{35} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} & m_{45} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} & m_{54} & m_{55} \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{65} \end{bmatrix}.$$

Значення членів матриці Якобі знаходимо за допомогою математичного пакету MathCAD. Задаємо залежність лінійних та кутових координат точки D від величин керованих координат:

$$X := \begin{bmatrix} \cos(q_0) \cdot (-AB \cdot \cos(q_1) + BC \cdot \cos(q_2 - q_1) + CD \cdot \cos(q_3 - q_2 + q_1)) \\ \sin(q_0) \cdot (-AB \cdot \cos(q_1) + BC \cdot \cos(q_2 - q_1) + CD \cdot \cos(q_3 - q_2 + q_1)) \\ OA + AB \cdot \sin(q_1) + BC \cdot \sin(q_2 - q_1) + -CD \cdot \sin(q_3 - q_2 + q_1) \\ 180 - \operatorname{atan}\left(\frac{\tan(q_3 - q_2 + q_1)}{\sin(q_0)}\right) \\ -\operatorname{atan}\left(\frac{\tan(q_3 - q_2 + q_1)}{\cos(q_0)}\right) \\ q_0 \end{bmatrix}$$

Задаємо формулу матриці Якобі як матрицю відповідних похідних:

$$\begin{pmatrix} \frac{d}{dq_0} X_0 & \frac{d}{dq_1} X_0 & \frac{d}{dq_2} X_0 & \frac{d}{dq_3} X_0 & \frac{d}{dq_4} X_0 \\ \frac{d}{dq_0} X_1 & \frac{d}{dq_1} X_1 & \frac{d}{dq_2} X_1 & \frac{d}{dq_3} X_1 & \frac{d}{dq_4} X_1 \\ \frac{d}{dq_0} X_2 & \frac{d}{dq_1} X_2 & \frac{d}{dq_2} X_2 & \frac{d}{dq_3} X_2 & \frac{d}{dq_4} X_2 \\ \frac{d}{dq_0} X_3 & \frac{d}{dq_1} X_3 & \frac{d}{dq_2} X_3 & \frac{d}{dq_3} X_3 & \frac{d}{dq_4} X_3 \\ \frac{d}{dq_0} X_4 & \frac{d}{dq_1} X_4 & \frac{d}{dq_2} X_4 & \frac{d}{dq_3} X_4 & \frac{d}{dq_4} X_4 \\ \frac{d}{dq_0} X_5 & \frac{d}{dq_1} X_5 & \frac{d}{dq_2} X_5 & \frac{d}{dq_3} X_5 & \frac{d}{dq_4} X_5 \end{pmatrix} \rightarrow$$

Отримуємо матрицю - результат розрахунків. Конкретні значення мікропереміщень можна знайти, підставивши закони зміни керованих координат:



$$\begin{bmatrix}
-\sin(q_0) \cdot (CD \cdot \cos(q_1 - q_2 + q_3) - AB \cdot \cos(q_1) + BC \cdot \cos(q_2 - q_1)) & \cos(q_0) \cdot (AB \cdot \sin(q_1 - q_2 + q_3) - CD \cdot \sin(q_1 - q_2 + q_3) + BC \cdot \sin(q_2 - q_1)) & \cos(q_0) \cdot (CD \cdot \sin(q_1 - q_2 + q_3) - BC \cdot \sin(q_2 - q_1)) & -CD \cdot \sin(q_1 - q_2 + q_3) \cdot \cos(q_0) & 0 \\
\cos(q_0) \cdot (CD \cdot \cos(q_1 - q_2 + q_3) - AB \cdot \cos(q_1) + BC \cdot \cos(q_2 - q_1)) & \sin(q_0) \cdot (AB \cdot \sin(q_1 - q_2 + q_3) - CD \cdot \sin(q_1 - q_2 + q_3) + BC \cdot \sin(q_2 - q_1)) & \sin(q_0) \cdot (CD \cdot \sin(q_1 - q_2 + q_3) - BC \cdot \sin(q_2 - q_1)) & -CD \cdot \sin(q_1 - q_2 + q_3) \cdot \sin(q_0) & 0 \\
0 & AB \cdot \cos(q_1 - q_2 + q_3) - CD \cdot \cos(q_1 - q_2 + q_3) - BC \cdot \cos(q_2 - q_1) & CD \cdot \cos(q_1 - q_2 + q_3) + BC \cdot \cos(q_2 - q_1) & -CD \cdot \cos(q_1 - q_2 + q_3) & 0 \\
\frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3) \cdot \cos(q_0)}{\sin(q_0) \cdot \left( \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2}{\sin(q_0)^2} + 1 \right)} & \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2 + 1}{\sin(q_0) \cdot \left( \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2}{\sin(q_0)^2} + 1 \right)} & \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2 + 1}{\sin(q_0) \cdot \left( \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2}{\sin(q_0)^2} + 1 \right)} & \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2 + 1}{\sin(q_0) \cdot \left( \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2}{\sin(q_0)^2} + 1 \right)} & 0 \\
\frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3) \cdot \sin(q_0)}{\cos(q_0) \cdot \left( \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2}{\cos(q_0)^2} + 1 \right)} & \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2 + 1}{\cos(q_0) \cdot \left( \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2}{\cos(q_0)^2} + 1 \right)} & \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2 + 1}{\cos(q_0) \cdot \left( \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2}{\cos(q_0)^2} + 1 \right)} & \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2 + 1}{\cos(q_0) \cdot \left( \frac{\tan(q_1 - q_2 + q_3)^2}{\cos(q_0)^2} + 1 \right)} & 0
\end{bmatrix}$$

Проведемо оцінку робочої зони системи маніпуляторів. Завдяки антропоморфній конструкції маніпуляторів робоча зона має достатньо великий об'єм, близький до півсфери за формою. Розглянемо робочий простір в проекціях на фронтальну, бокову та горизонтальну площини. Введемо позначення для подальших розрахунків:  $S_{\phi}$  – площа робочого простору у фронтальній проекції;  $S_{\Gamma}$  – площа в горизонтальній проекції;  $S_{\Pi}$  – площа в профільній проекції; додатково знаком позначаємо пересічення ( $\wedge$ ) або суму ( $\vee$ ) робочих просторів, індекс яких показує належність до першого або другого маніпулятора.

Проекція на фронтальну площину робочого простору (рис. 3.4) дорівнює:

$$S_{\phi 1} = S_{\phi 2} = 3.84 \text{ м}^2;$$

$$S_{\phi 1 \wedge 2} = 3.40 \text{ м}^2;$$

$$S_{\phi 1 \vee 2} = 4.32 \text{ м}^2.$$

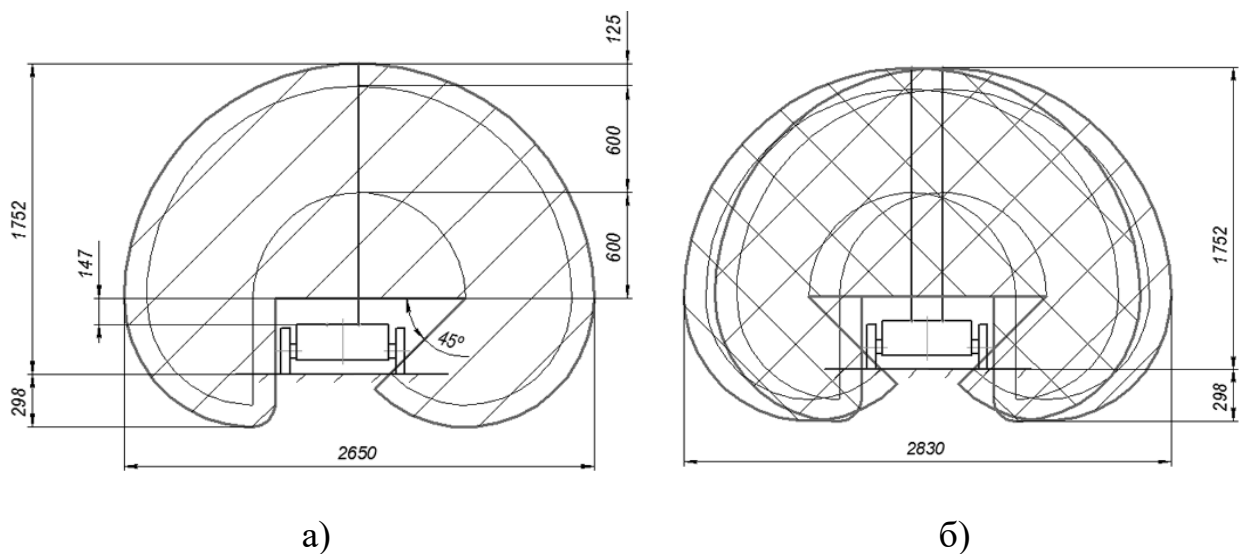


Рис. 3.4. Проекція робочого простору маніпулятора на фронтальну площину з одним маніпулятором (а) та з системою маніпуляторів (б)

Проекція на горизонтальну площину робочого простору (рис. 3.5) дорівнює:

$$S_{\Gamma 1} = S_{\Gamma 2} = 5.49 \text{ м}^2;$$

$$S_{\Gamma 1 \wedge 2} = 5.02 \text{ м}^2;$$

$$S_{\Gamma 1 \vee 2} = 5.98 \text{ м}^2.$$

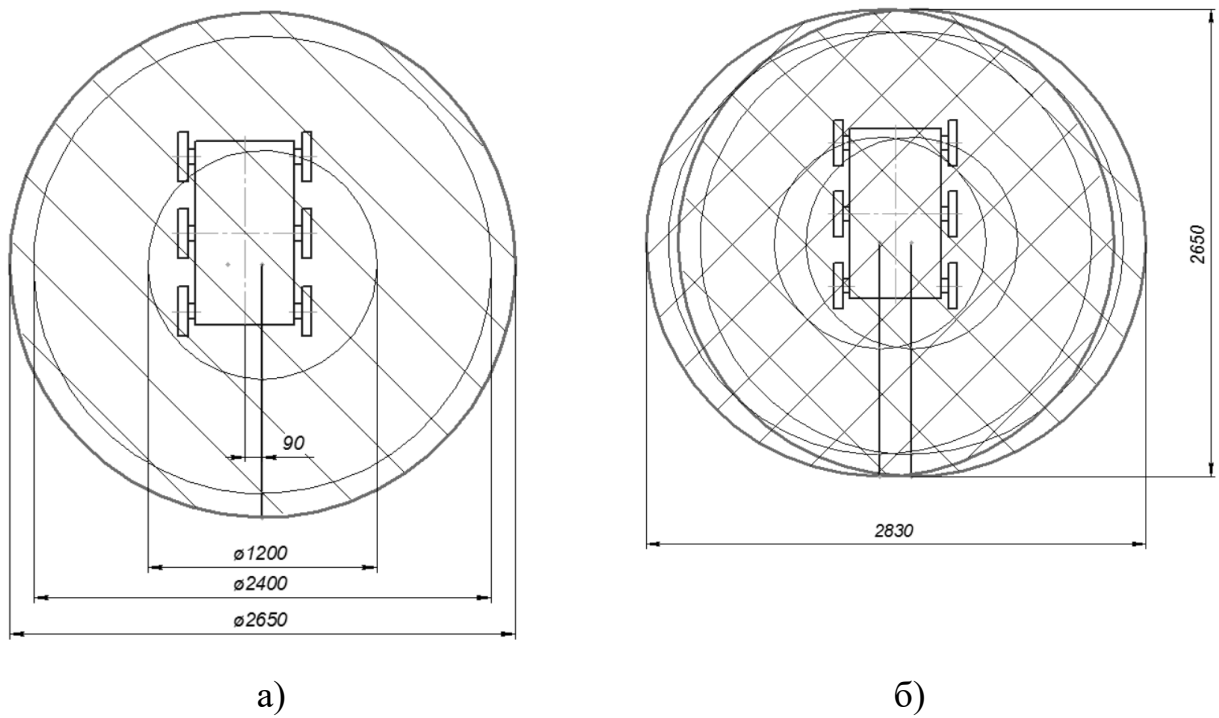


Рис. 3.5. Проекція робочого простору маніпулятора на горизонтальну площину з одним маніпулятором (а) та з системою маніпуляторів (б)

Проекція на профільну площину робочого простору (рис. 3.6) для обох маніпуляторів дорівнює:

$$S_{п1} = S_{п2} = 3.46 \text{ м}^2.$$

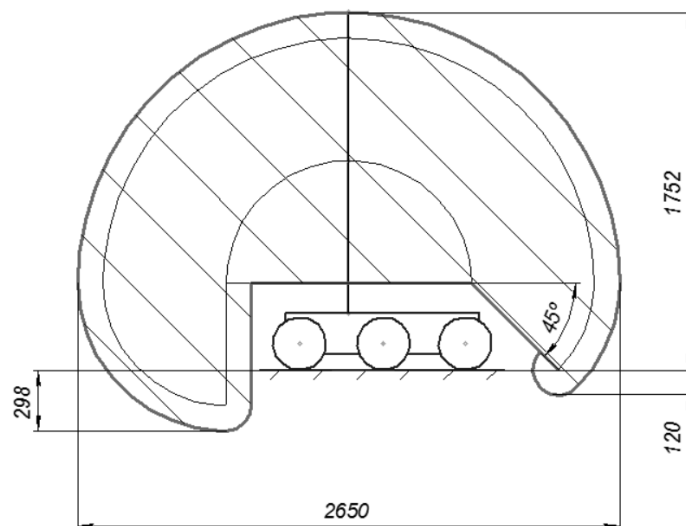


Рис. 3.6. Проекція робочого простору маніпулятора на профільну площину

Визначимо, на скільки відсотків був збільшений загальний робочий простору у фронтальній та горизонтальній площинах після додавання другого маніпулятора. Коефіцієнти складають:

$$k_{\phi} = \left( \frac{S_{\phi 1V2}}{S_{\phi 1}} - 1 \right) \cdot 100\% = \left( \frac{4.32}{3.84} - 1 \right) \cdot 100\% = 13\%;$$

$$k_{\Gamma} = \left( \frac{S_{\Gamma 1V2}}{S_{\Gamma 1}} - 1 \right) \cdot 100\% = \left( \frac{5.98}{5.49} - 1 \right) \cdot 100\% = 9\%.$$

Таким чином, установка другого маніпулятора при обраній в даному проекті компоновці збільшує робочий простір в проекціях на 13% у фронтальній площині та на 9% у горизонтальній площині; велика частина робочої зони є доступною для оперування одночасно обома маніпуляторами, що дає доступ до ширших функціональних можливостей.

### **3.3. Математична модель системи маніпуляторів**

Метою даного розділу є аналіз кінематики маніпуляторів мобільного роботизованого комплексу, що були розроблені в бакалаврському проекті. Аналіз дозволить визначити вимоги до приводів маніпуляторів та оптимізувати вагу окремих елементів конструкції для подальшого проектування твердотільних моделей та системи керування приводами.

З цією метою була створена математична модель окремого маніпулятора та системи двох маніпуляторів засобами бібліотеки SimMechanics математичного пакету Matlab Simulink 2014. Дане середовище має широкі можливості для моделювання фізики механічних систем різного рівня складності. Можлива реалізація систем з пружними та демпфуючими зв'язками, багатьма ступенями вільності; доступна візуалізація мехатронного вузла, вирішення прямої та зворотної задач кінематики, вивід графіків реакцій та крутного моменту у вузлах, передавальних функцій тощо [46].

Фізичне моделювання в середовищі SimMechanics полягає у використанні блоків тіл, що відображають геометричні та масові характеристики об'єктів, та блоків зв'язку, що відображають геометричні та

кінематичні відношення між ними. Після створення моделі можлива широка робота по оптимізації конструкції, параметрів системи – та аналізувати результати змін без необхідності створення та вирішення систем диференційних рівнянь. В комплексі з можливістю імпортувати механізм із збірки Solidworks CAD – дане середовище зберігає багато часу та ресурсів в процесі проектування та моделювання механічних систем.

На першому етапі була створена планарна модель окремого маніпулятора із системи маніпуляторів мобільного роботизованого комплексу, що розробляється за темою магістерської дисертації. Кінематична схема маніпуляторів наведена на рис. 3.7.

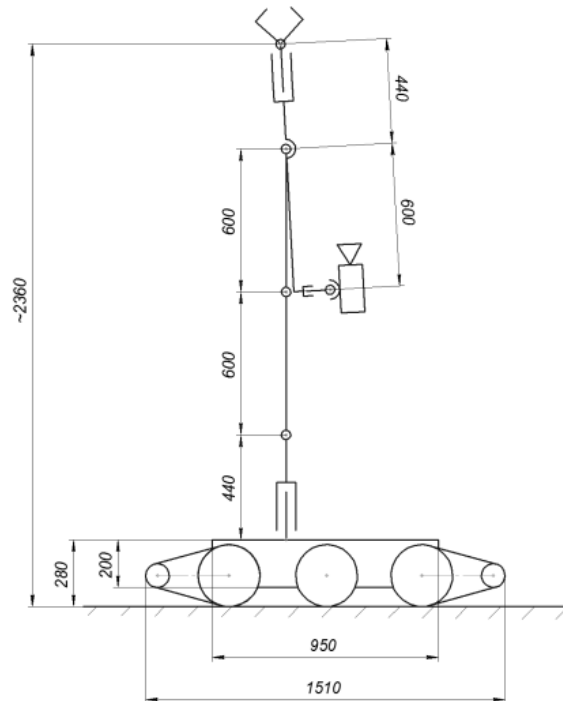


Рис. 3.7. Кінематика системи двох маніпуляторів

Із тривимірної моделі збірки робота в Autodesk Inventor визначені значення мас та моментів інерції зведених тіл ( $m_1 - m_4, m_8$ ), що прийматимуть участь у моделюванні кінематики (табл. 3.2). Маса крокових двигунів ( $m_5 - m_7, m_9$ ) взяті з конструктивних міркувань з запасом.

Маса предмету, що утримується в схваті,  $m_{10}$  буде послідовно взята з ряду (0,1,2,3,5,7,9) кг, в якому 0кг – відповідає руху маніпулятора з пустим схватом, 1кг корисного навантаження – відповідає гранаті або малому заряду пластикової вибухівки, 2кг – відповідає типовій протипіхотній міні (МОН-50), 9кг – відповідає типовій протитранспортній міні (ТМ-57).

Таблиця 3.2. Інерціальні параметри тіл

№ тіла	$m$ , кг	$I_x$ , кг · м <sup>2</sup>	$I_y$ , кг · м <sup>2</sup>	$I_z$ , кг · м <sup>2</sup>
1	6	0,027	0,017	0,018
2	3,14	0,013	0,011	0,024
3	3,14	0,013	0,011	0,024
4	4,14	0,013	0,011	0,024
5	5	0	0	0
6	5	0	0	0
7	5	0	0	0
8	4	0,008	0,020	0,023
9	5	0	0	0
10	(0,1,2,3,5,7,9)	0	0	0

Для симуляції механізму буде використані елементи бібліотеки Matlab Simulink, а саме Simscape/SimMechanics/First\_Generation, що дають можливість симулювати системи механічно зв'язаних тіл. Процес розробки моделі складається з даних кроків:

- 1) Вводять тіла, що є частиною механічної системи. Вказують інерційні характеристики (маса та моменти інерції), ступені вільності, механічні обмеження, координатні системи.
- 2) Прикладають сили, крутні моменти. Додають приводи (актуатори) та датчики (сенсори), що дають змогу ініціювати та записувати рухи тіл.

- 3) Додають засоби візуалізації та запису результатів моделювання у вигляді двовимірних та тривимірних графіків, дисплеїв тощо. Вказують режим роботи вирішувачів – для прямої або зворотної кінематики.
- 4) Додатково може бути створений графічний інтерфейс для більш зручної взаємодії з блоками вводу та виводу моделі.

Створена модель маніпулятора в площині наведена на рис. 3.8. На рис. 3.9 наведена підсистема, що задає закони руху крокових двигунів (фаза, кутова швидкість та прискорення в радіанах); з приводів додатково виводяться поточні та максимальні значення реакцій в з'єднанні (момент на сила). Для всіх приводів використана кутова швидкість  $\omega_{1,2,3} = 0,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  без кутового прискорення. В якості навантаження виступають маси всіх тіл під дією сили тяжіння, значення якої встановлені в блоці Machine Environment.

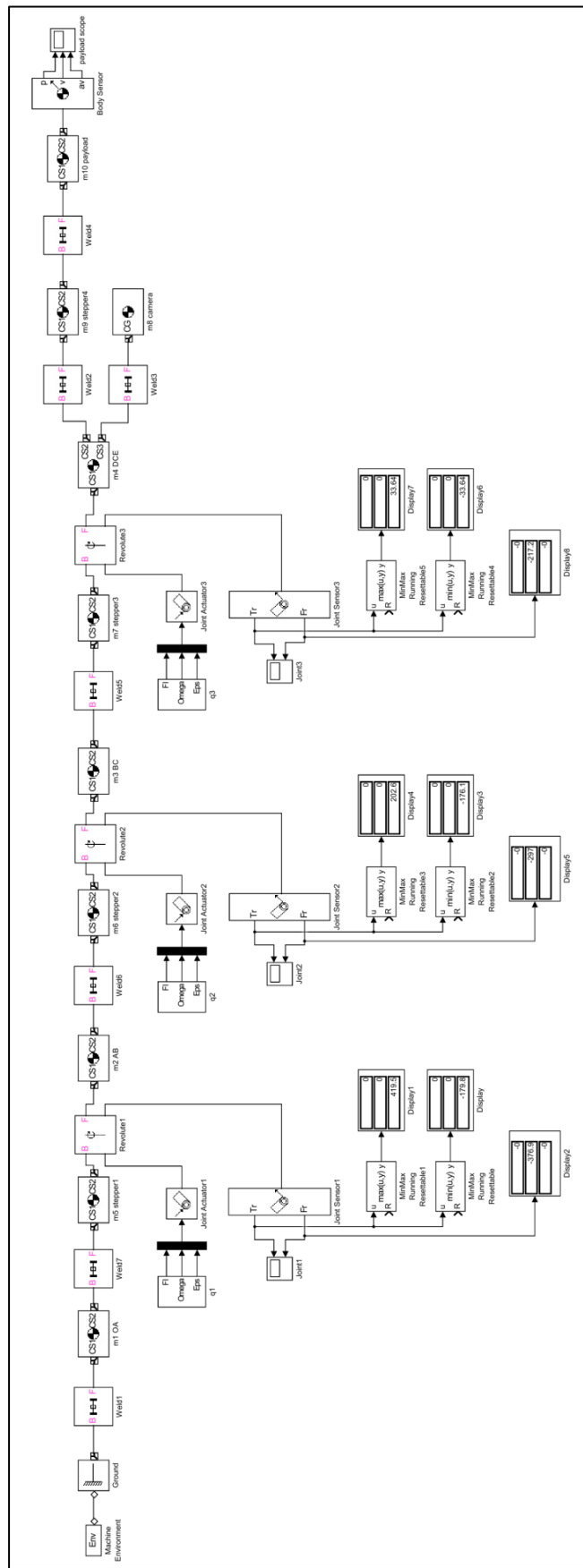


Рис. 3.8. Планарна модель маніпулятора в Simulink



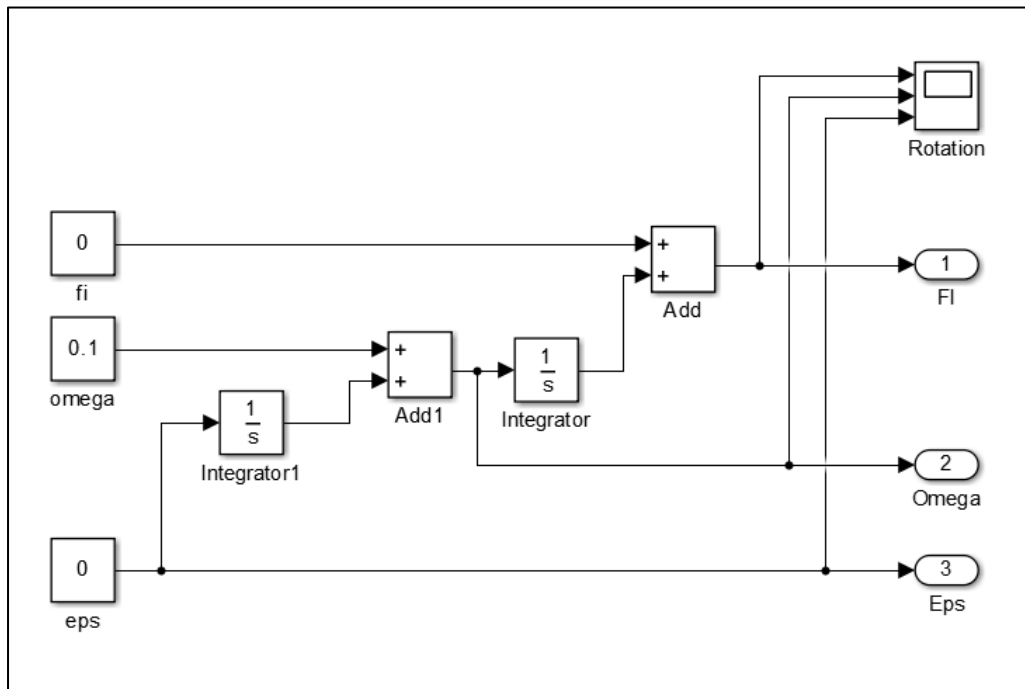
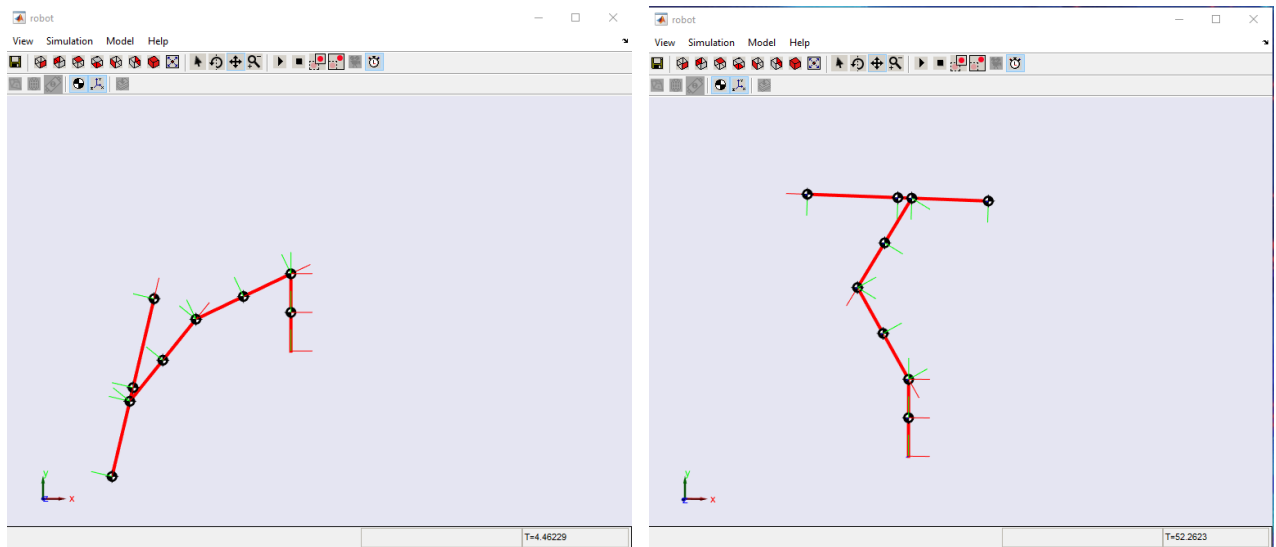


Рис. 3.9. Підсистема, що задає закон руху приводів

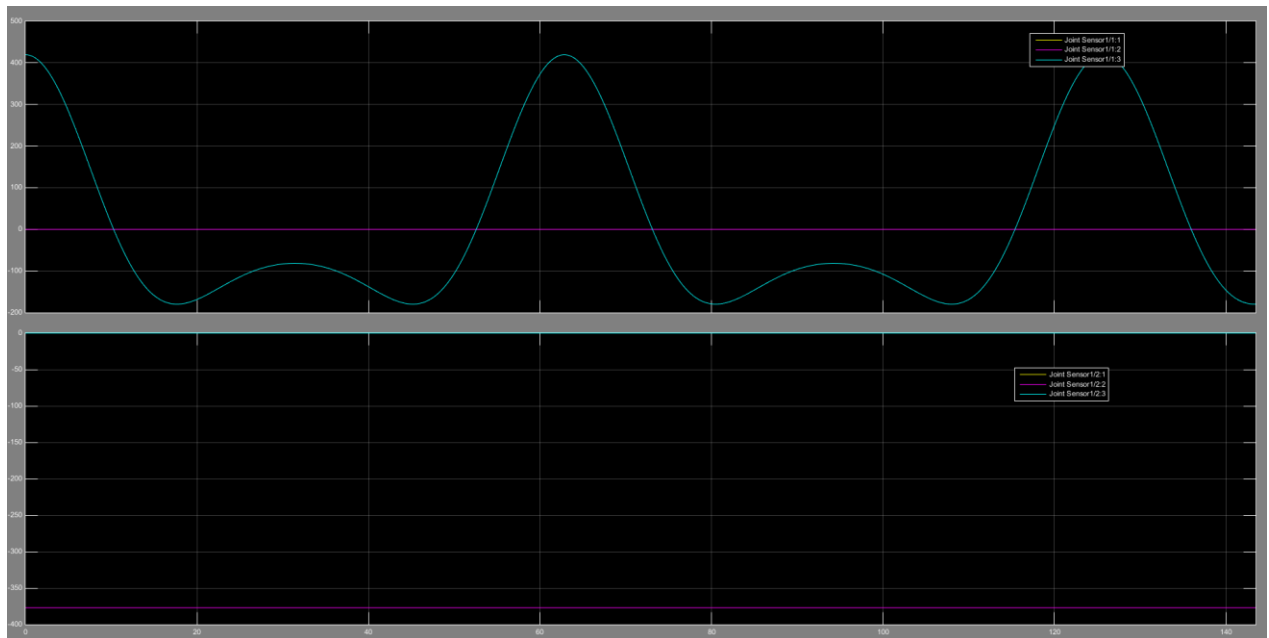
Результати моделювання кінематики механізму в різні моменти часу наведено на рис. 3.10 (а,б); реакції у з'єднаннях наведені на рис. 3.11 (а-в). Значення взяті при  $m_{10} = 9$  кг.



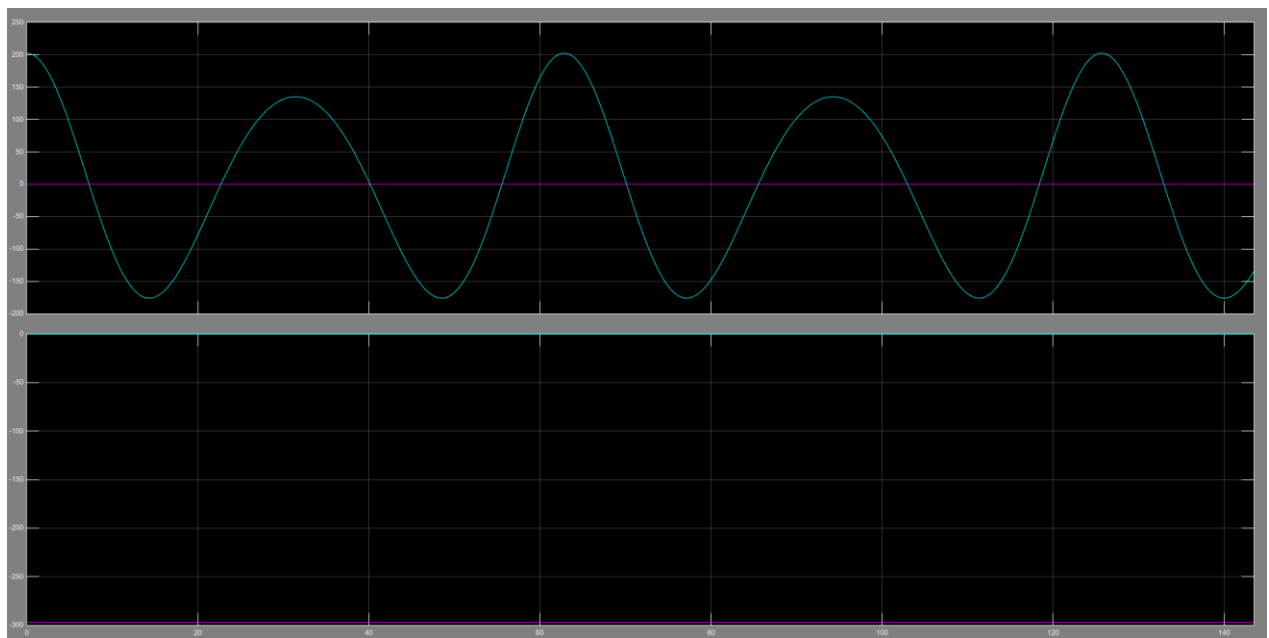
а) при  $T = 4,46$  с

б) при  $T = 52,26$  с

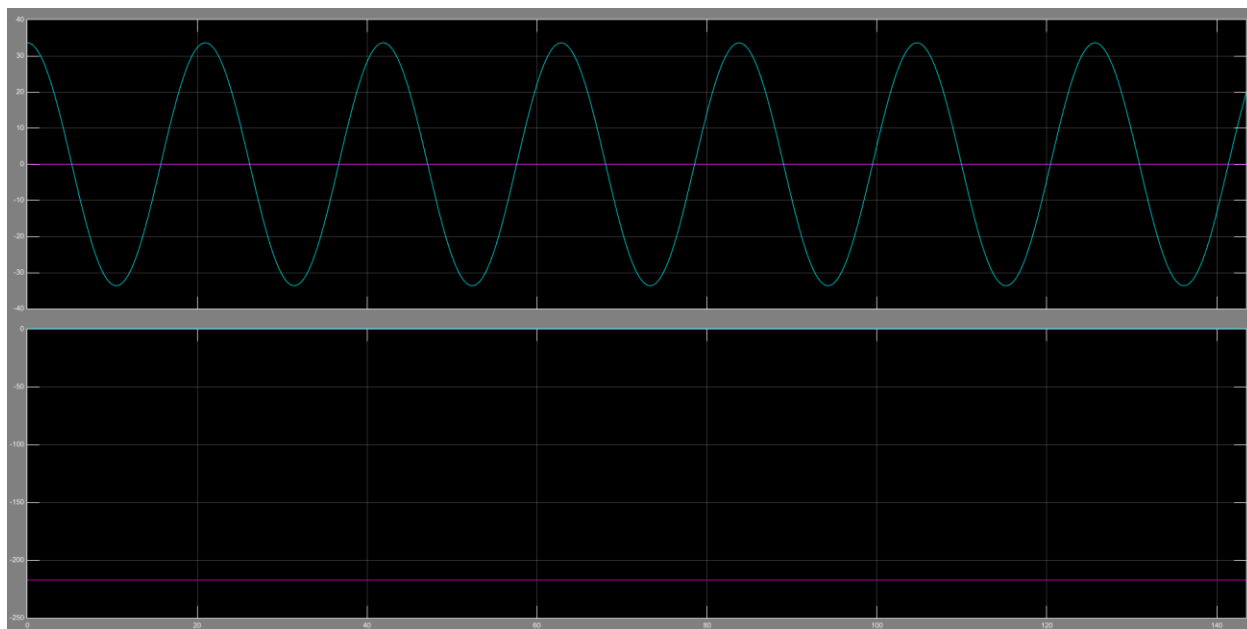
Рис. 3.10. Кінематика механізму



а) момент та сила в приводі  $q_1$



б) момент та сила в приводі  $q_2$



в) момент та сила в приводі  $q_3$

Рис. 3.11. Реакції у з'єднаннях маніпулятора

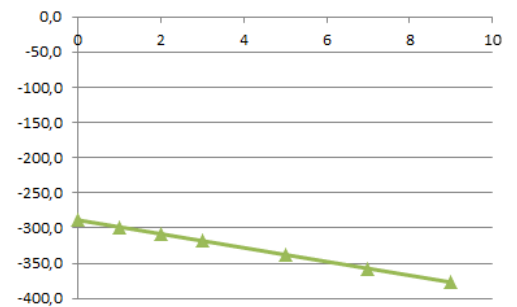
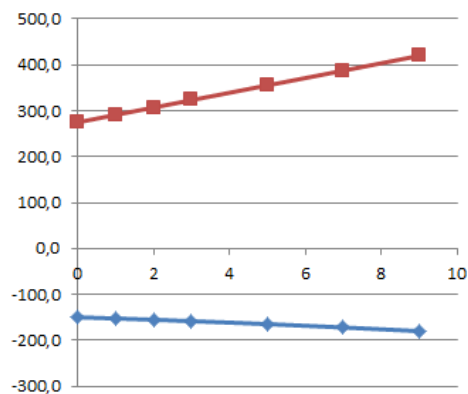
З метою отримання залежності реакцій в приводах маніпулятора від ваги  $m_{10}$  предмету, що утримується в схваті, в таблиці 3.3 зведемо максимальні та мінімальні значення крутного моменту та постійної сили реакції.

Таблиця 3.3. Значення реакцій в приводах маніпулятора

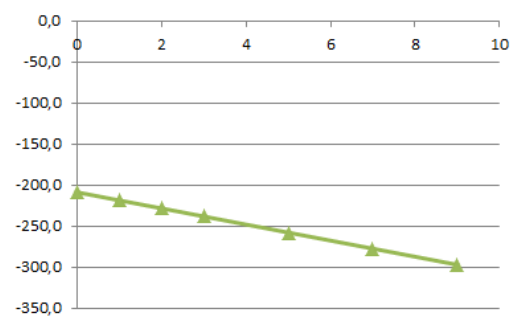
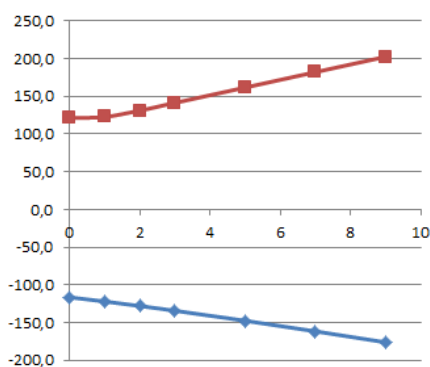
Навантаження, кг	1 мін. момент, Нм	1 макс. момент, Нм	1 сила, Н	2 мін. момент, Нм	2 макс. момент, Нм	2 сила, Н	3 мін. момент, Нм	3 макс. момент, Нм	3 сила, Н
0	-149,6	274,7	-288,6	-116,3	121,2	-208,8	-5,2	5,2	-128,9
1	-152,3	290,8	-298,4	-121,9	122,8	-218,6	-0,9	0,9	-138,7
2	-155,0	306,9	-308,2	-127,9	131,2	-228,4	-3,4	3,4	-148,5
3	-158,0	323,0	-318,0	-134,2	141,4	-238,2	-7,8	7,8	-158,3
5	-164,5	355,2	-337,7	-147,5	161,8	-257,8	-16,4	16,4	-178,0

7	-171,7	387,3	-357,3	-161,5	182,2	-277,4	-25,0	25,0	-197,6
9	-179,8	419,5	-376,9	-176,1	202,6	-297,0	-33,6	33,6	-217,2

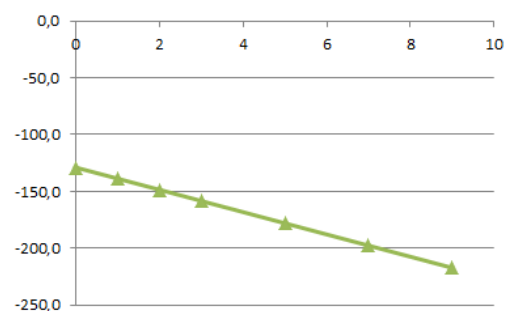
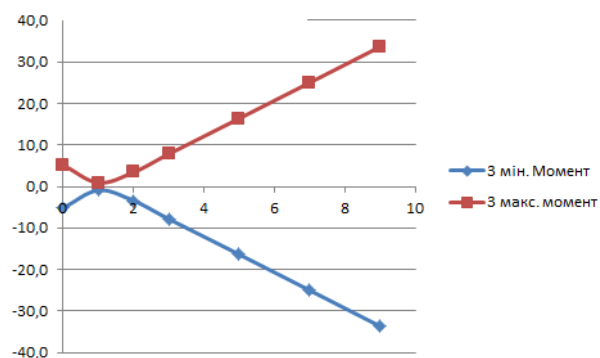
Для кожного привода будують графіки залежності моментів та сил реакції від ваги корисного навантаження в схваті (рис. 3.12).



а) момент на сила в приводі  $q_1$



б) момент на сила в приводі  $q_2$



в) момент на сила в приводі  $q_3$

Рис. 3.12. Залежність реакцій у з'єднаннях від корисного навантаження

Максимальні та мінімальні значення показують поступовий ріст абсолютних значень зі збільшенням ваги вантажу. Виключення становить в приводі  $q_3$ , де крутний момент при 1кг помітно менше моменту при пустому схваті та 2кг вантажу. Я пов'язую це зі зміною балансу ланки  $DE$ , коли збільшення ваги корисного вантажу веде до приближення центру ваги ланки від кріплення камери до схвату, проте після 2кг цей ефект нівелюється.

Додатково для перевірки робочої зони маніпулятора було додано модуль (рис. 3.13), що бере значення вектору координати вершини маніпулятора, розбиває його на три складові ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) та будує двовимірний графік руху цієї точки (рис. 3.14, а). Гострі кути графіку пов'язані з дискретністю моделювання. Варто зауважити, що швидкості руху у вузлах були змінені на помітно вищі за реалістичні та такі, що відрізняються та не є близько кратними між собою. Це зроблено для охоплення більшої частини робочої зони та зменшення впливу гармонік, коли результуючий графік нагадує гіпотрохоїду, отриману за допомогою спірографа (рис. 3.14, б). Для першого варіанту кутові швидкості задані як  $\omega_1 = 0,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $\omega_2 = 2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $\omega_3 = 10 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , для другого  $\omega_1 = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $\omega_2 = 3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $\omega_3 = 5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

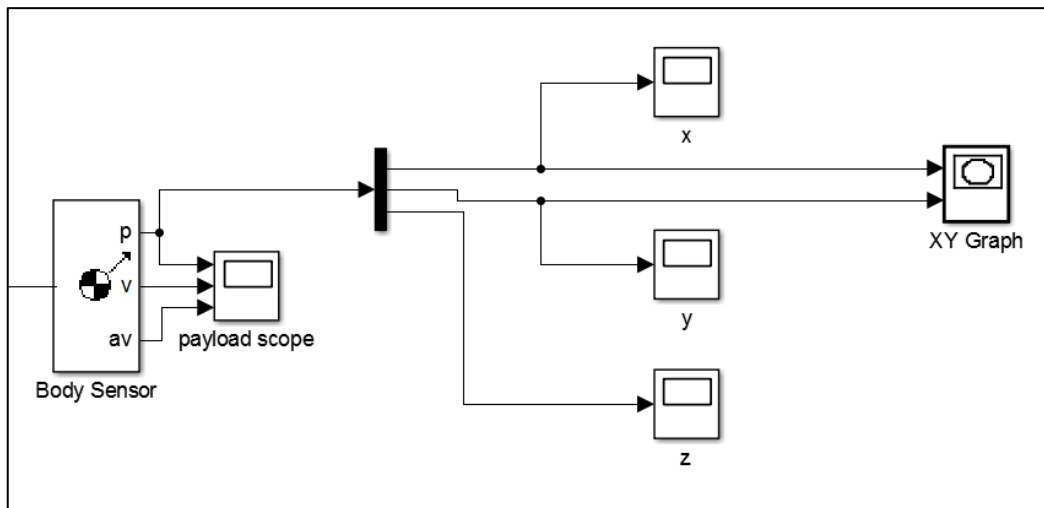
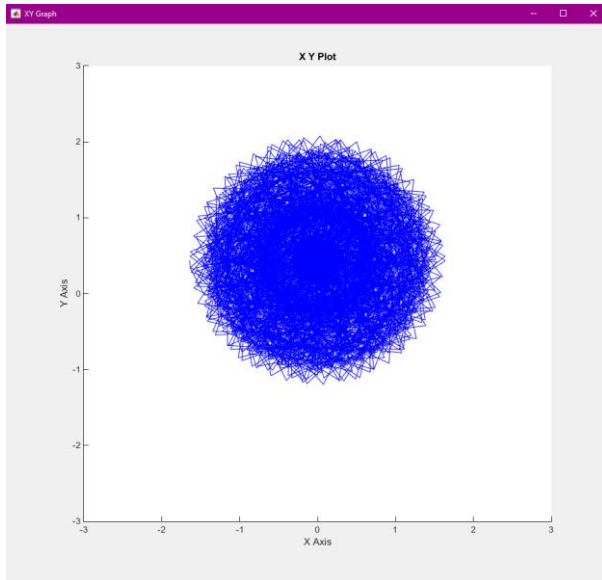
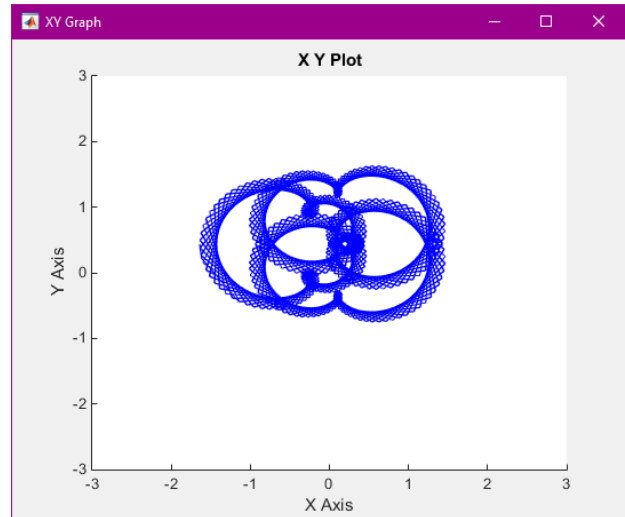


Рис. 3.13. Модуль, доданий для аналізу руху вершини маніпулятора



а)



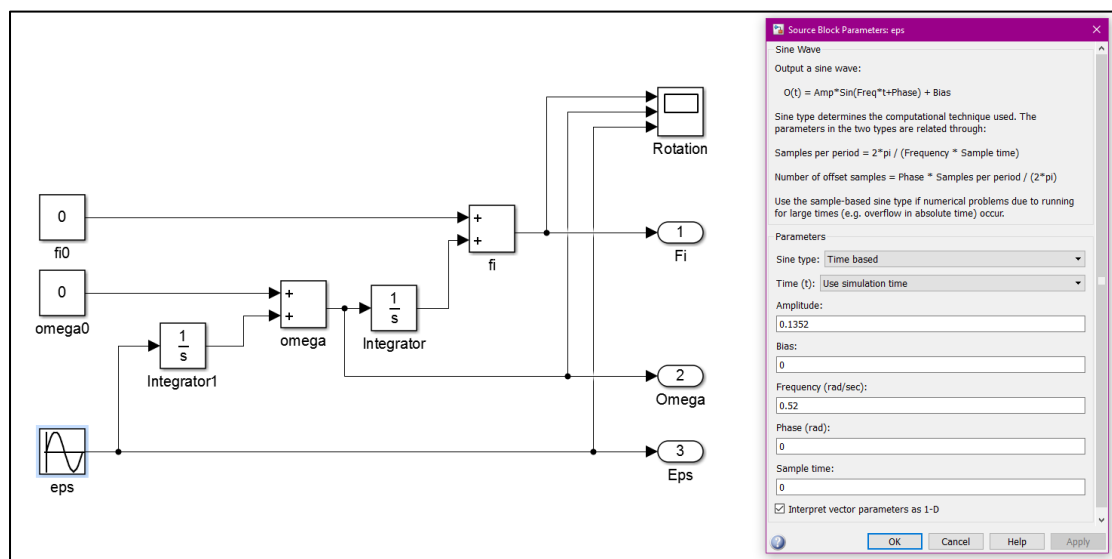
б)

Рис. 3.14. Графік руху вершини маніпулятора:

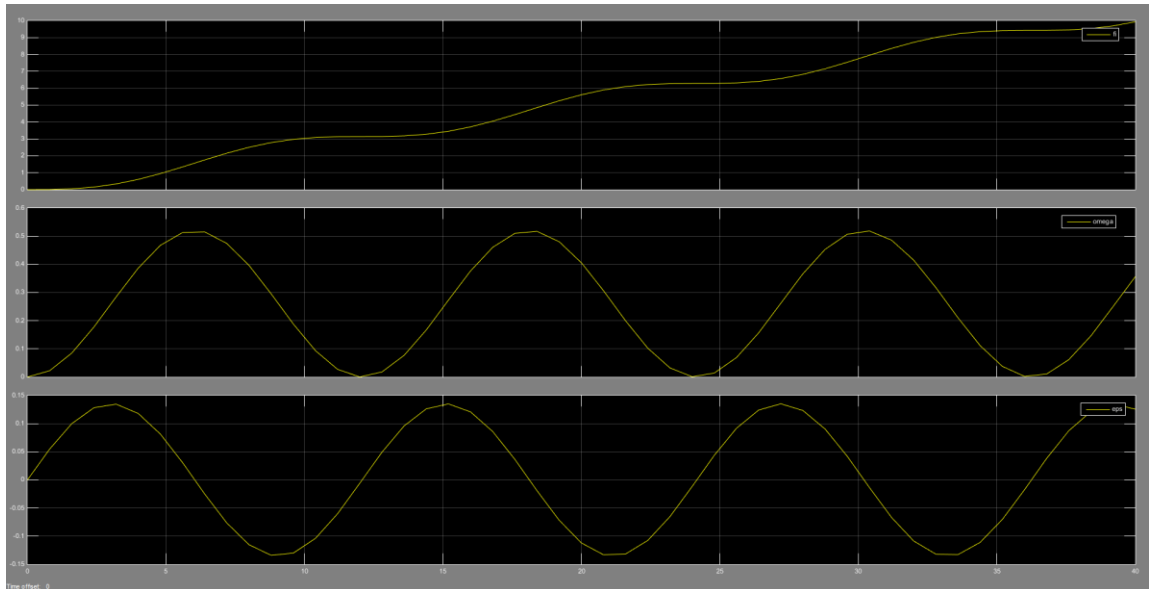
а – повна робоча зона, б – робоча зона з вираженими гармоніками

Другим етапом було створення системи з двох маніпуляторів. Для цього попередня модель була доповнена та розширена.

По-перше, змінена подача постійної кутової швидкості на синусоїду. Параметри сигналу наведені на рис. 3.15, а – він відповідає розгону від стану спокою до максимальної кутової швидкості  $0,52 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  ( $30 \frac{\text{град}}{\text{с}}$ ) та гальмування до стану спокою в початковій точці (рис. 3.15, б) за період 12 секунд.



а)



б)

Рис. 3.15. Підсистема, що задає закон руху приводів  
а – модель, б – результуючий сигнал

По-друге, був доданий шарнір *Revolute0* в основу маніпулятора, щоб забезпечити поворот площини початкової моделі плаского маніпулятора (рис. 3.16).

Третім завершальним кроком було згортання моделі маніпулятора в підпрограму та об'єднання двох маніпуляторів спільним середовищем (рис. 3.17 а). Візуалізація кінематики наведена на рис. 3.17 б,в.

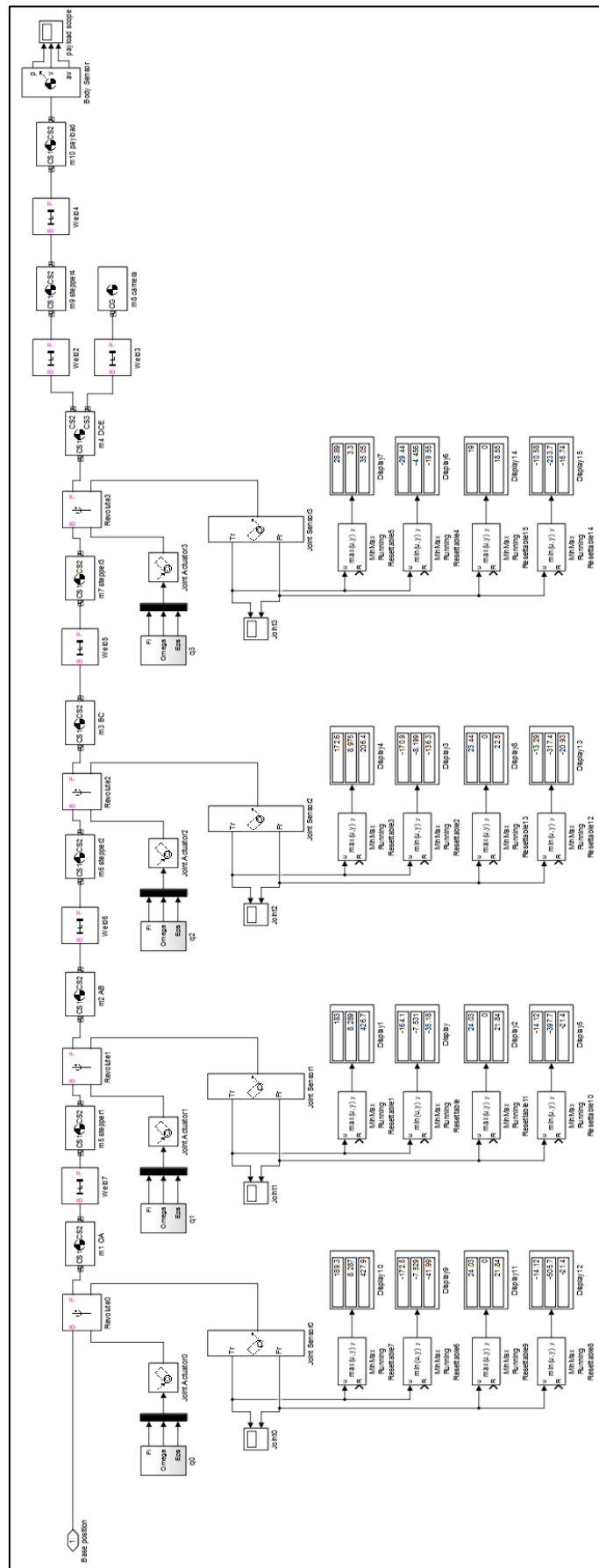
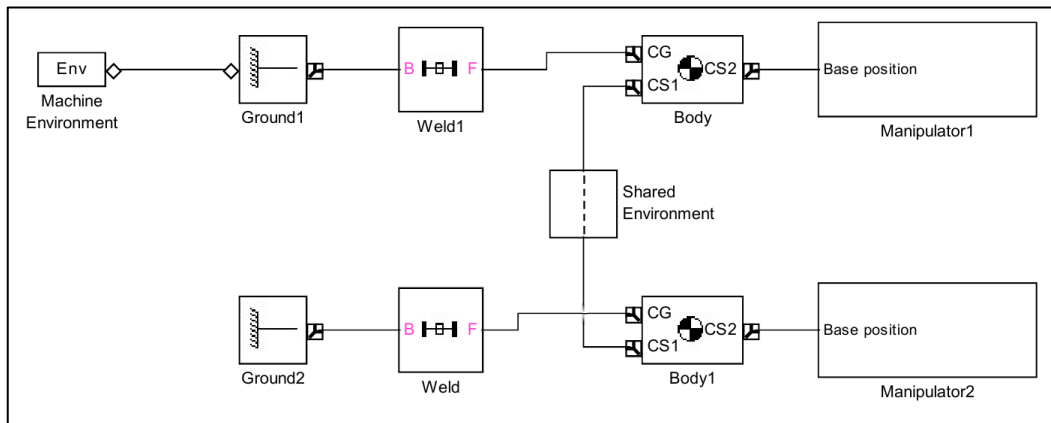
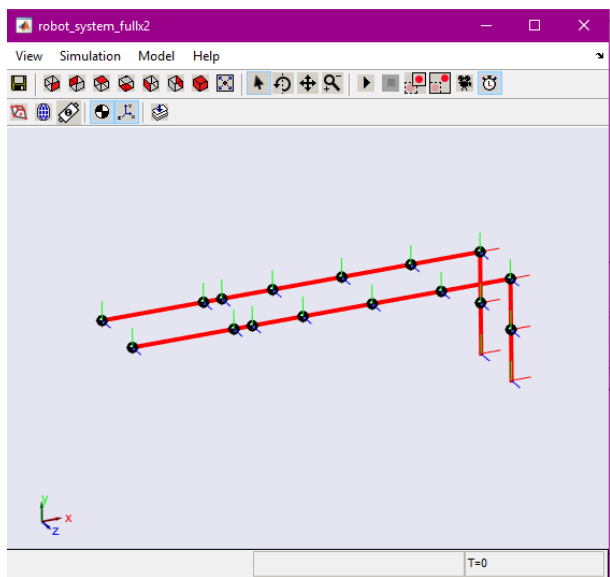


Рис. 3.16. Повна модель маніпулятора в Simulink

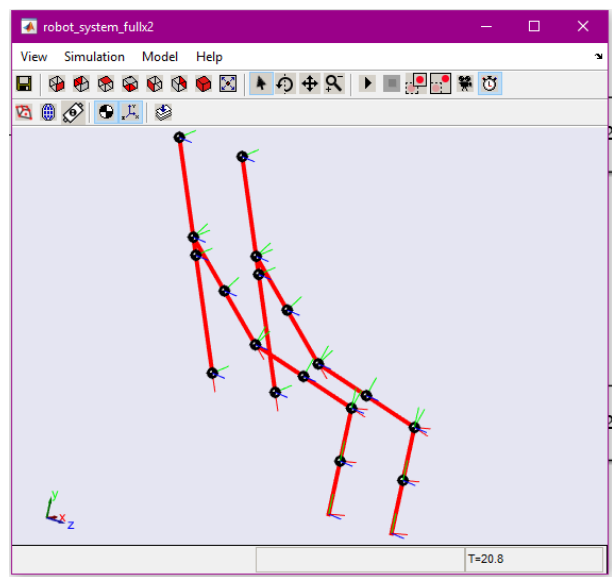




а)



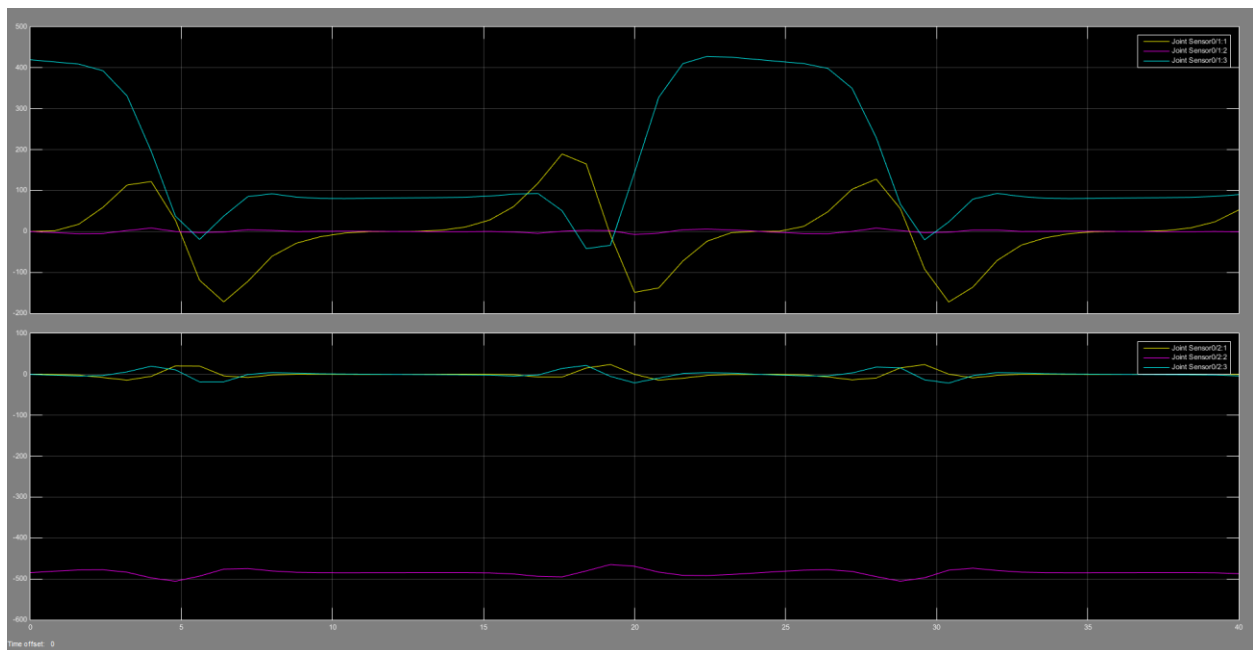
б)



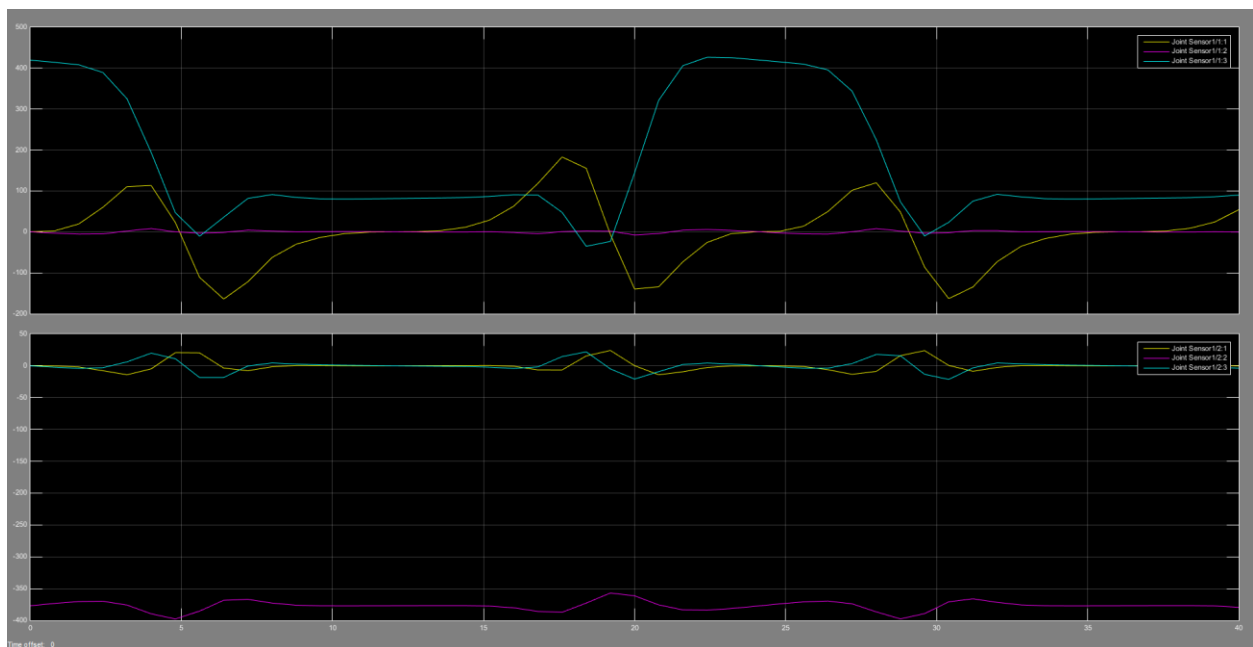
в)

Рис. 3.17. Математична модель системи маніпуляторів  
а – модель верхнього рівня; б,в – результати моделювання

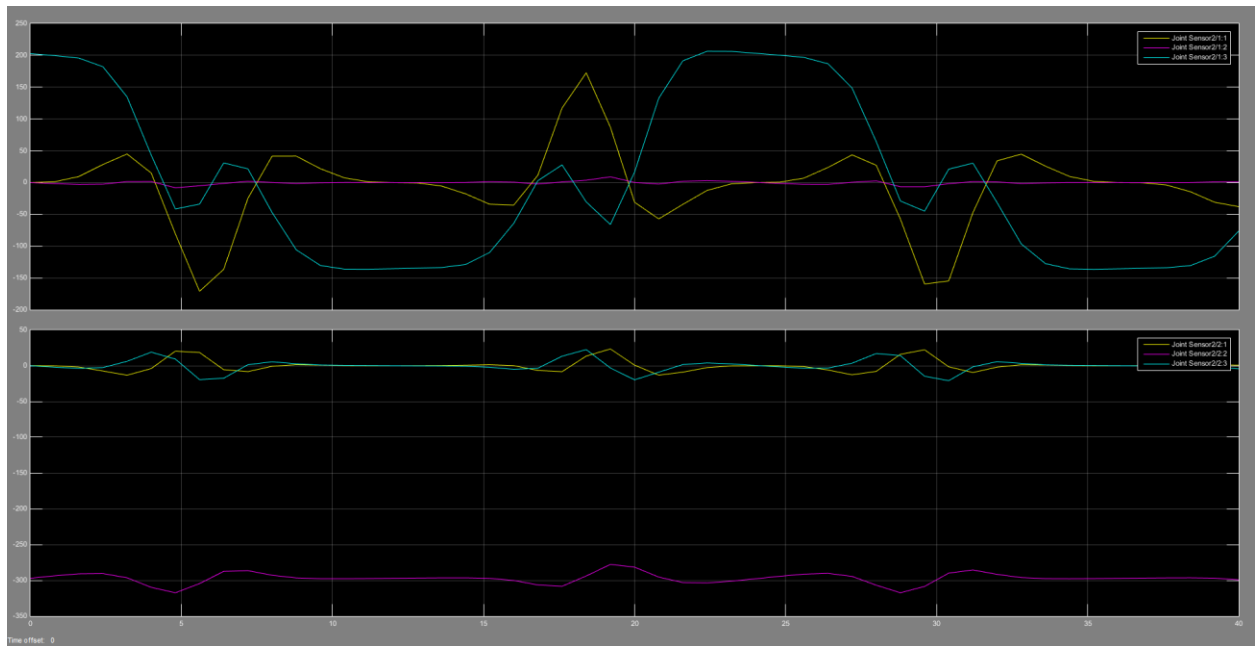
Реакції у з'єднаннях першого маніпулятора наведені на рис. 3.18 (а-г).  
Значення взяті при  $m_{10} = 9$  кг.



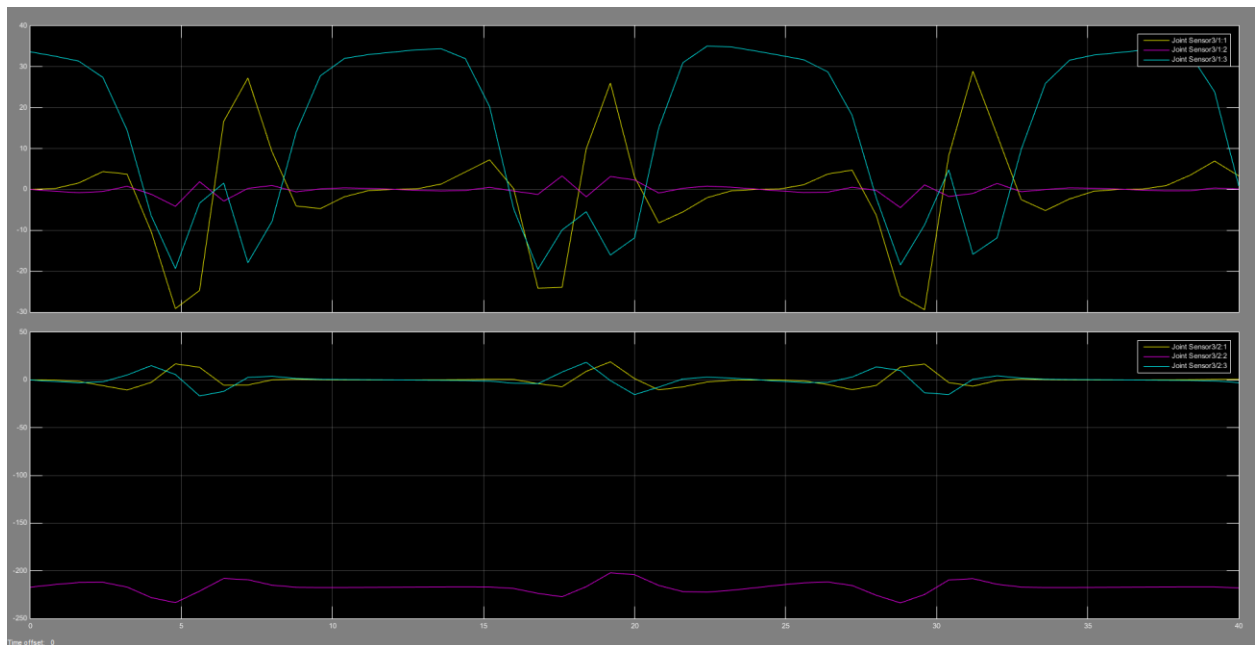
а) момент та сила в приводі  $q_0$



б) момент та сила в приводі  $q_1$



в) момент та сила в приводі  $q_2$



г) момент та сила в приводі  $q_3$

Рис. 3.18. Реакції у з'єднаннях маніпулятора

Дані про рух у просторі вершини маніпулятора наведені на рис. 3.19. Перша лінія – позиція (координати), друга лінія – складові швидкості, третя – складові прискорення.

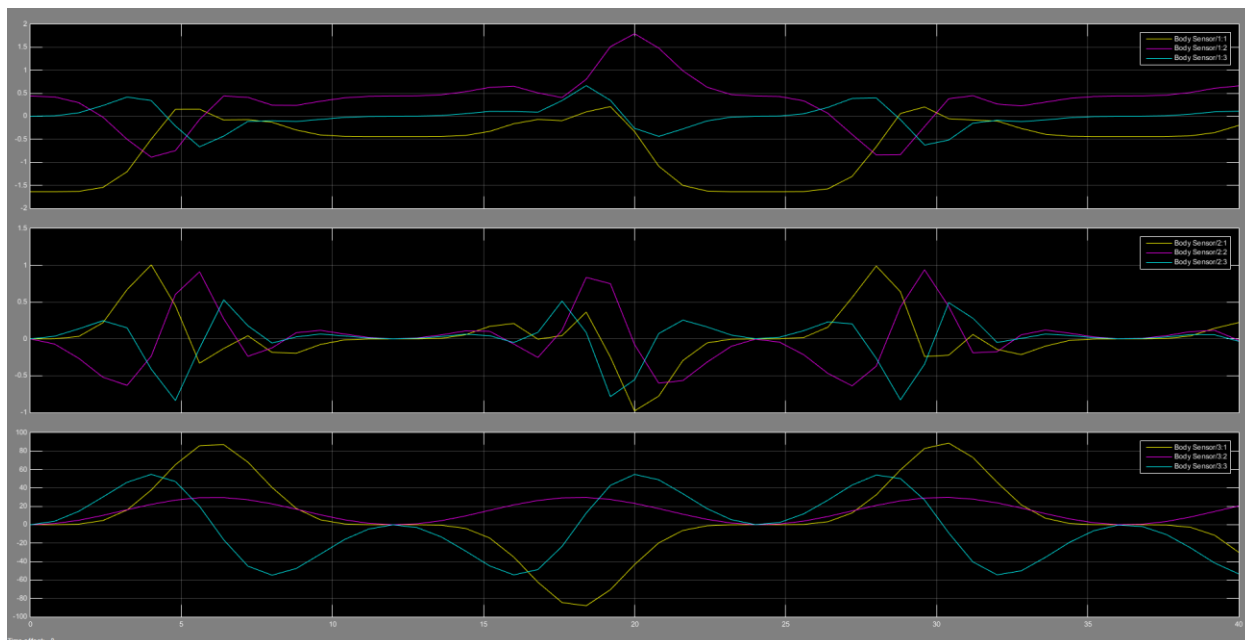


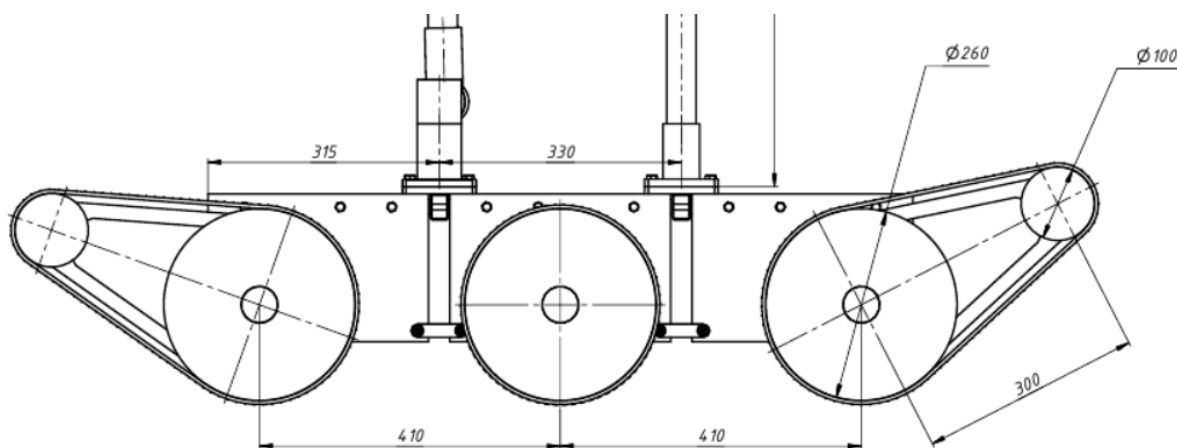
Рис. 3.19. Дані про рух вершини маніпулятора

В результаті проведеної роботи були опановані засоби Matlab SimMechanics по моделюванню механічних систем тіл; була розроблена модель системи двох маніпуляторів мобільного роботизованого комплексу; отримана анімація руху механізму та реакції у вузлах маніпуляторів. Проведене моделювання динаміки роботи маніпулятора з різною вагою корисного вантажу в схваті, зроблені висновки про залежність навантаження на двигуни у вузлах маніпулятора від ваги утримуваного об'єкту. Дана модель може бути використана в подальшому для корегування геометрії та мас вузлів робота, вирішення прямої та зворотної задач кінематики, створення систем керування приводами та ін.

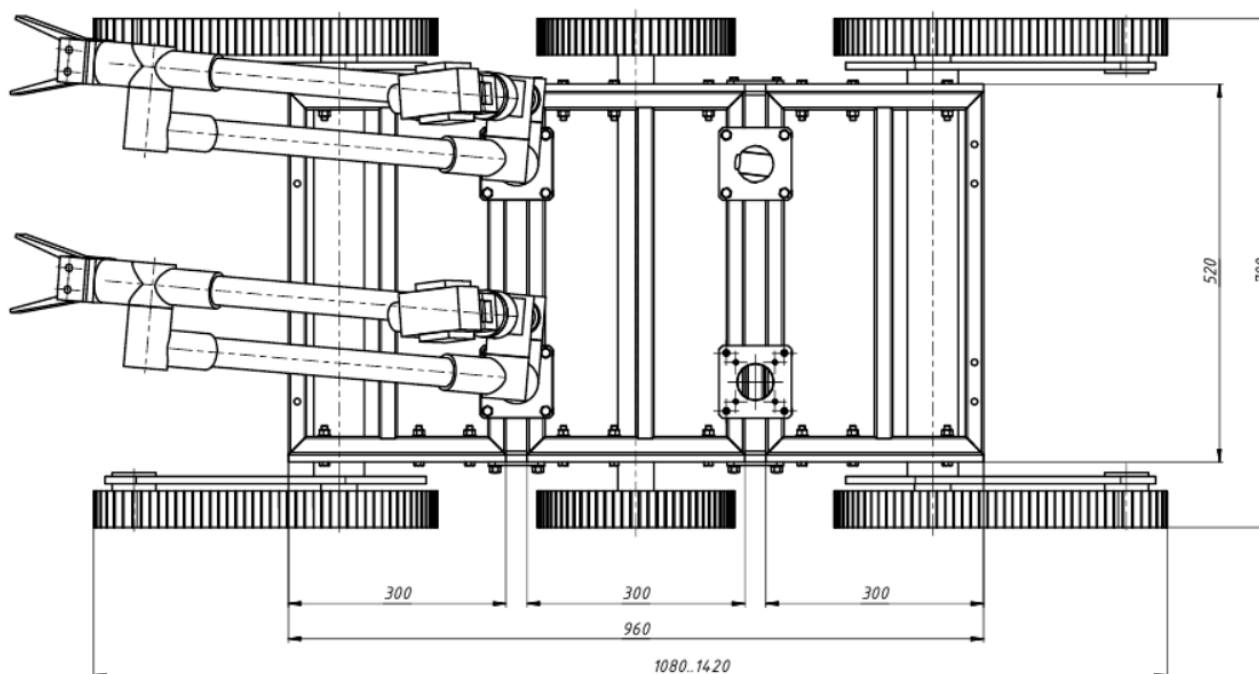
Для розкриття в повній мірі функціоналу моделювання та подальшого спрощення процесу створення моделей може бути рекомендовано використати режим сумісності зі збірками Solidworks CAD з врахуванням певних обмежень. Наприклад: модель збірки має бути ієрархічною, в назвах компонентів бажано не використовувати кирилицю, за можливістю лише одна деталь має бути зафіксованою, ступені вільності деталей та збірок мають задаватися виключно сполученнями між ними та ін. [47].

### 3.4. Проектування конструкції шасі та опис системи керування

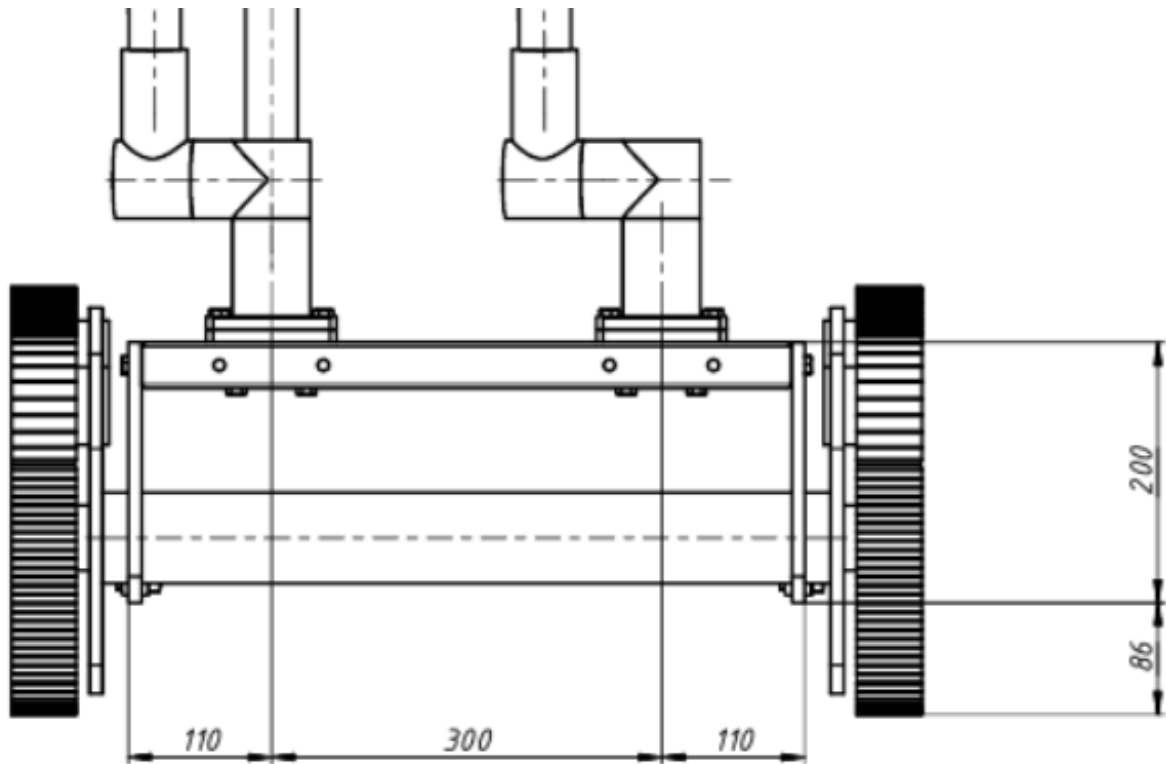
Спроекований мобільний роботизований комплекс, оснащений системою маніпуляторів, буде обладнаний для пересування по поверхні землі колісно-гусеничним шасі. В обраній компоновці використані три модулі: передній та задній, що обладнані фліперами з гусеничним шасі та можуть змінювати кут контакту гусениць з ґрунтом, середній модуль з колісним шасі (рис. 3.20).



а)



б)



в)

Рис. 3.20. Вигляд модулів шасі в профільній (а), горизонтальній (б) та фронтальній (в) площинах

Фліпери – пристрої підвищення прохідності гусеничного шасі. Вони можуть обертатися навколо осі, що змінює геометрію гусеничного шасі та змінює кут контакту з поверхнею, по якій пересувається наземний робот. Завдяки даній можливості становиться можливими для робота долати складні перешкоди, сходи та бордюри, завали та ін. Також можна збільшити кліренс з 86мм до 300мм при переведенні кліперів у крайнє нижнє положення, фліпери можуть бути використані як упори в заглиблення в землі для збільшення стійкості при роботі на одному місці. Загальна довжина шасі варіюється від 1080мм до 1420мм.

В конструкції фліперів мають бути передбачені: приводний двигун, що приводить в рух гусениці; кроковий двигун, що регулюватиме кут між кліпером та корпусом (або горизонтом); в корпусі мають бути розміщене

електронне обладнання, що подаватиме керуючі сигнали на двигуни, аналізуватиме інформацію з датчиків, керувати живленням пристроїв з акумуляторних батарей, що забезпечуватимуть достатній час автономної роботи комплексу.

Для кращого маневрування та збільшенні стабільності пересування комплексу по складному ландшафту може бути створена інтелектуальна система керування фліперами в передній та задній частині роботизованого комплексу.

Завдяки інформації з датчиків, системи камер можна скласти приблизну тривимірну модель поверхні, що знаходиться на шляху робота, запланувати на певний проміжок часу закони руху приводів фліперів та їх кутів нахилу до корпусу. Після проведення багатофакторного аналізу інтелектуальна система має обрати найкращий варіант проходження шляху з урахуванням мінімізації часу проходження, мінімізації динамічних навантажень на маніпулятори, максимізації стійкості, недопускання перекидання та ін. (рис. 3.21).

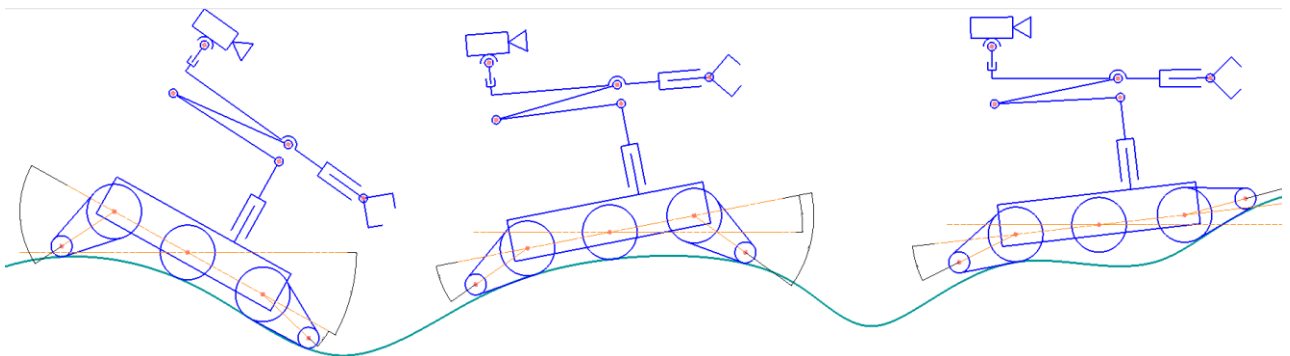


Рис. 3.21. Приклад керування нахилом фліперів з метою збільшення площі контакту шасі з поверхнею ландшафту

Інтелектуальна система може мати жорстку алгоритмічну структуру, проте на мій погляд, варто застосувати штучні нейронні мережі та генетичні алгоритми, що дуже добре показують себе для створення програм керування з великою кількістю факторів та невизначеностями. Для початкового етапу

має бути створена програма для проходження шасі робота складної двовимірної поверхні, яка може бути отримана як сума випадкових синусоїд. Програма, що формуватиме один із сценаріїв проходження маршруту, матиме такі вхідні дані: двовимірний графік поверхні землі, поточні значення кутів (кут між горизонтом та корпусом, два кути між фліперами та корпусом робота); як вихідні дані: закон керування кутами між корпусом та двома фліперами (для максимального контакту гусениць з ґрунтом), закон керування приводними двигунами (для збільшення обертового моменту за необхідності при зниженні кутової швидкості при виникненні проковзування). В комп'ютерній фізичній симуляції можна запускати одразу кілька роботів з різними системами керування на основі штучних нейронних мереж для проходження згенерованого випадково ландшафту; обирати за певними критеріями найкращих представників; завдяки генетичним алгоритмам вносити зміни до нейронних мереж та створювати нове покоління систем керування; починати цикл з початку до отримання такої системи керування, що буде справлятися з проходженням полоси перешкод на достатньо високому рівні. Отримана автоматизована схема дозволить оператору не задумуватися про геометрію перешкод, що знаходяться перед роботом, а тільки вказувати напрям руху та бажану швидкість [48, 49, 50].

### **3.5. Проектування модуля з'єднання шасі та маніпуляторів**

Однією з частин проекту є елемент «З'єднання». Його функціями є скріплення між собою модулів шасі та надання бази для встановлення маніпулятора, відеокамери на штанзі та ін. (рис. 3.22).





та труб, що є частиною рами модулів шасі. Дані труби кріпляться до пластини чотирма болтами М8 довжиною 45мм, а до вставки-труби - двома болтами М8 довжиною 90мм, з відповідними гайками ГОСТ 15526-70 та гроверами ГОСТ 6402-70. В збірці наведені дві ділянки труб, що є частинами рами модулів шасі, для ілюстрації принципу кріплення збірок між собою. Для деталей створені креслення для подальшого виготовлення та збирання.

Кріплення нижньої частини маніпулятора може бути виконана у вигляді цільної деталі, проте для зменшення об'єму видаленого металу, вона виконана у вигляді двох частин, що з'єднані ручним дуговим зварюванням за двома замкнутими контурами з наступним зняттям посилення шва. На кресленні не показані фаски, необхідні для зварювання, тому що вказаний метод зварювання може бути змінений на інший за необхідності.

Нижню частину (Труба) виконати з труби  $\varnothing 60$  зі Сталі 40Х ГОСТ 13663-86; токарна обробка. Відповідальні поверхні: отвір  $\varnothing 40$  Н8, що служить для монтажу електродвигуна; різьба М50, в яку буде загвинчена кришка над електродвигуном (рис. 3.23).

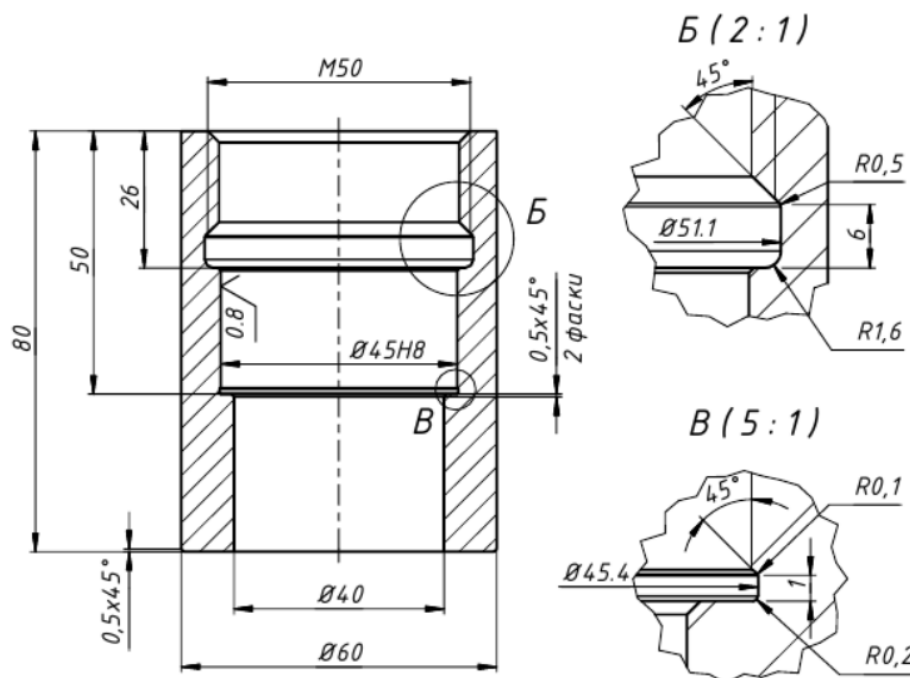


Рис. 3.23. Нижня частина кріплення маніпулятора - Труба

Верхню частину (Фланець) виконати з квадратного каліброваного прутка 100x100 зі Сталі 40Х ГОСТ 13663-86; обробка фрезерно-токарна. Відповідальні поверхні: циліндрична бобишка  $\varnothing 50h8$  - його циліндрична поверхня та площина пластини мають бути оброблені шліфуванням для досягнення шорсткості  $Ra0.8$  та повинна бути витримана перпендикулярність вказаної площини до осі бобишки (рис. 3.24).

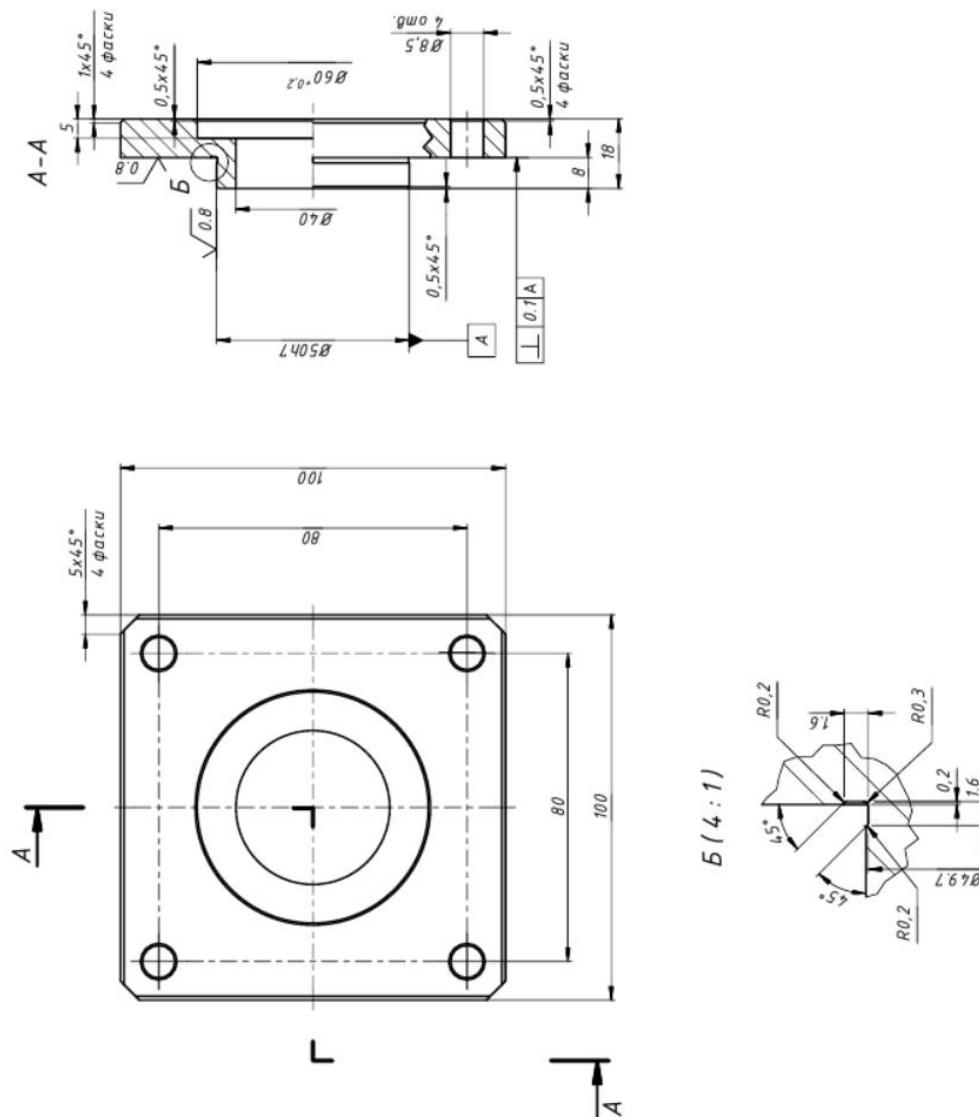


Рис. 3.24. Верхня частина кріплення маніпулятора - Фланець

Друга складальна одиниця Підставка потребує виготовлення двох деталей та після збирання закріплюють зварюванням. Першу, Пластину виконати з квадратного каліброваного прутка 100x100 зі Сталі 40Х ГОСТ 13663-86; обробка координатно-розточувальна. Відповідальні поверхні: отвір  $\varnothing 50H8$ ; дві групи з чотирьох різьбових отворів М8 зверху та знизу пластини; шліфуванням досягти значень шорсткості Ra0.8 для центрального отвору та верхньої площини пластини (рис. 3.25).

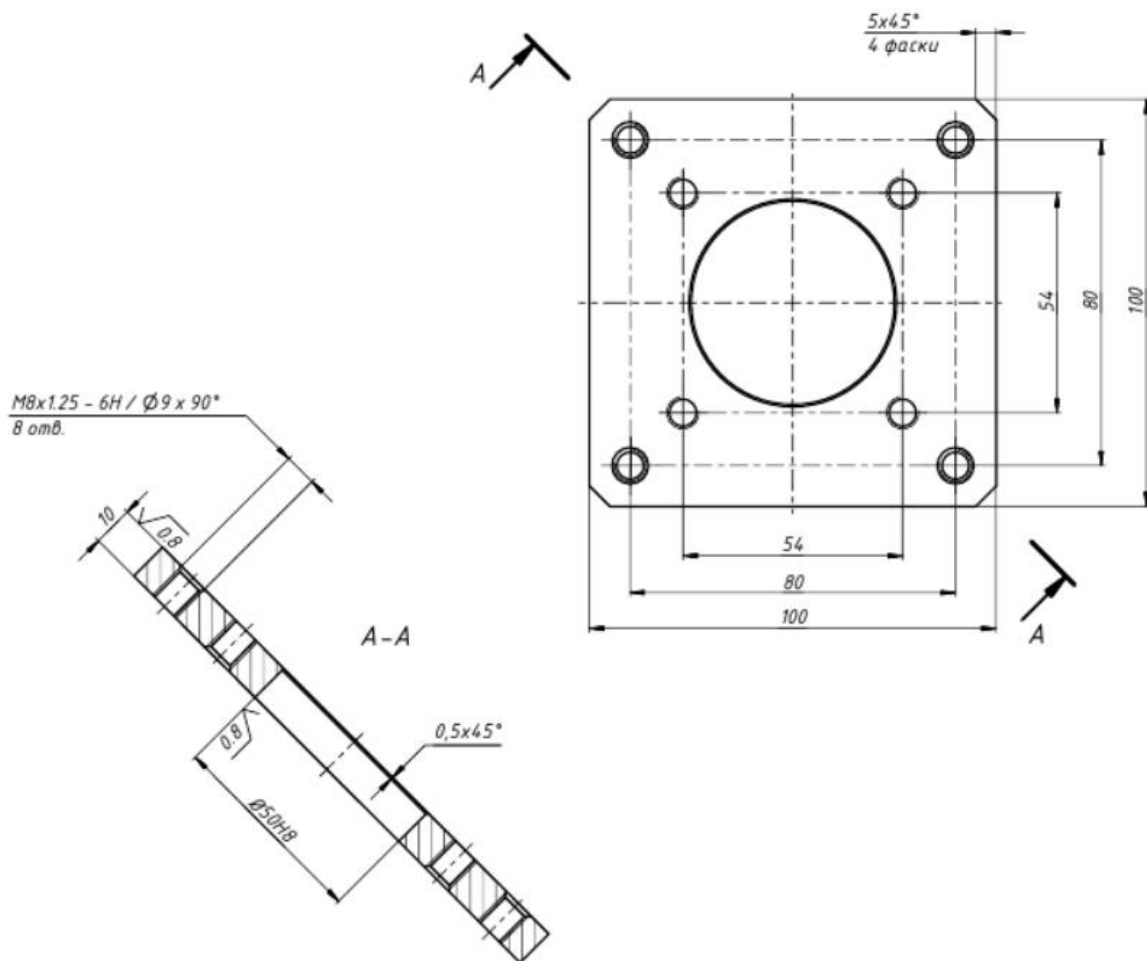


Рис. 3.25. Пластина

Другу деталь, Пластину дистанційну виконати з полоси 2x20 зі сталі Ст3 ГОСТ 103-76; обробка – відрізати пластину потрібної довжини та пробити отвори  $\varnothing 9$  на пресі, альтернативно – вирізати деталі за допомогою лазерної різки листового металу (рис. 3.26).

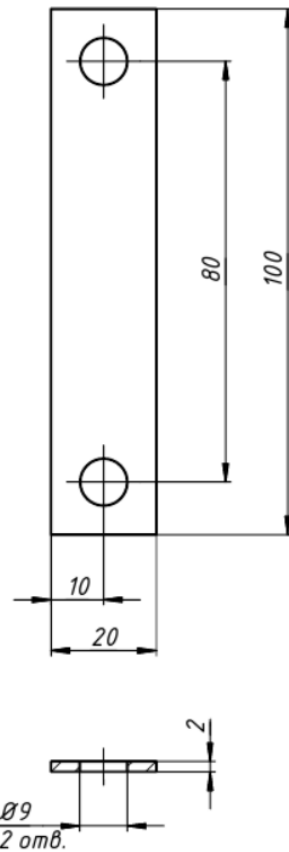


Рис. 3.26. Пластина дистанційна

### 3.6. Проектування конструкції модулів шарнірів

В даному розділі описаний варіант монтажу спроектованого циклоїдного редуктора та керованого електродвигуна в шарнірах-суглобах маніпулятора (рис. 3.27). На деталь 1, що монтується на кінцеву точку одної з ланок маніпулятора, чотирма гвинтами 3 кріпиться збірка приводу шарніра 2, на яку встановлюється деталь 4, що монтується на початкову точку наступної ланки маніпулятора.

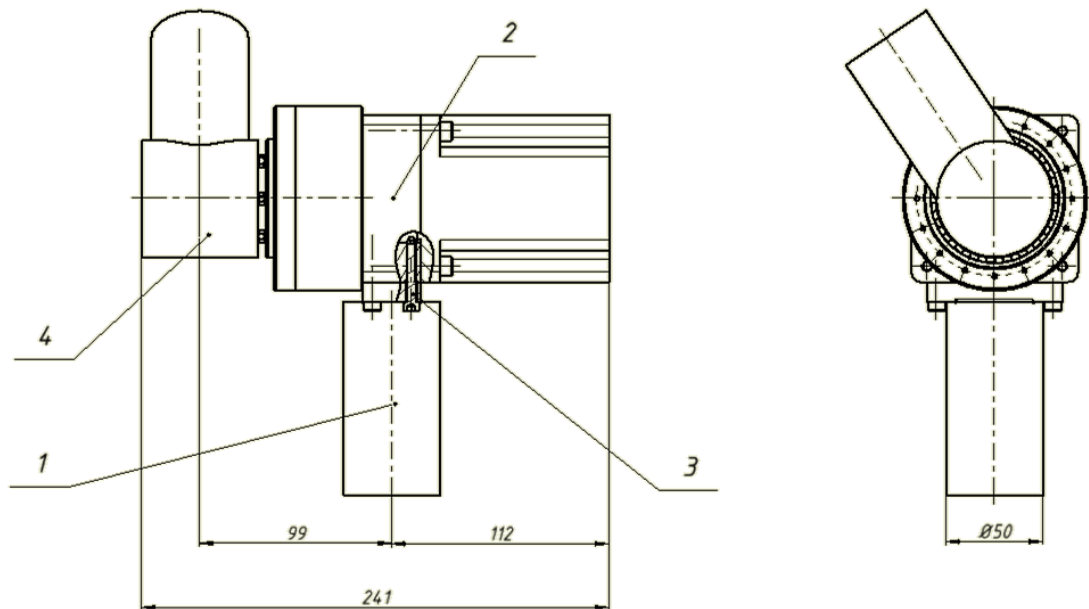


Рис. 3.27. Складальне креслення одного з суглобів маніпулятора

Привод маніпулятора складається з керованого електродвигуна 6 (кроковий або серводвигун) та циклоїдного редуктора 1, корпуси яких з'єднані між собою деталлю-перехідником 3 та гвинтами 4 та 5. Установочний гвинт 2 з'єднує вал електродвигуна та вхідний вал редуктора. Перехідник спочатку має бути змонтований гвинтами з редуктором, після – з двигуном (рис. 3.28).

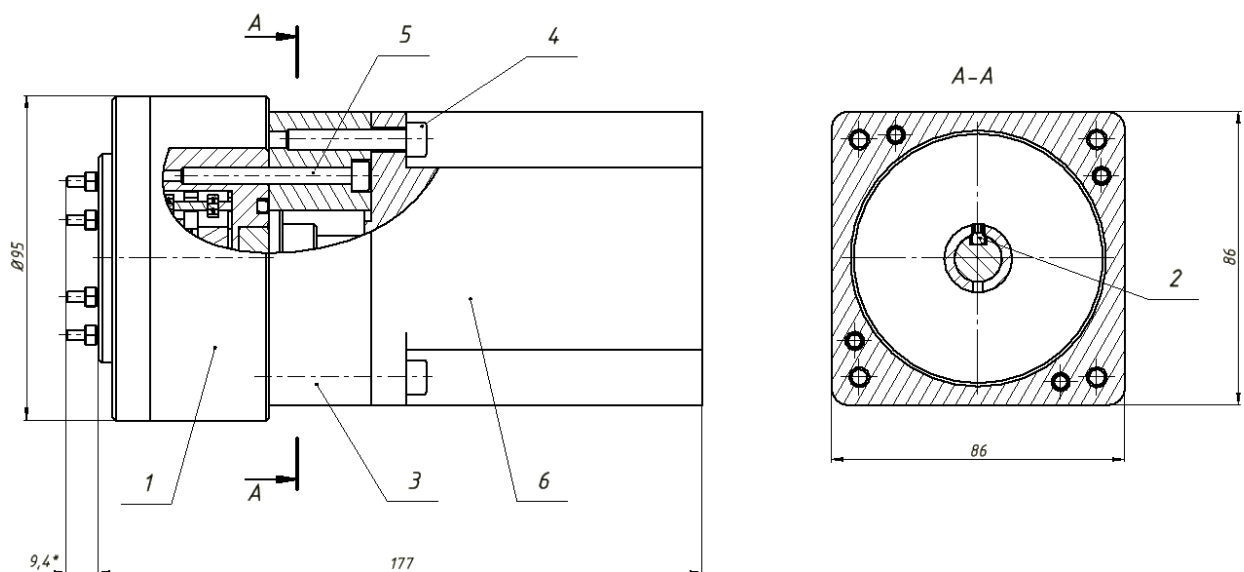


Рис. 3.28. Складальне креслення приводу

Деталь-перехідник має групу з чотирьох різьбових отворів із заглибленням під циліндричну головку для гвинтів, що будуть вкручені в корпус редуктора, групу з чотирьох різьбових отворів для гвинтів, що будуть проходити через кріпильні отвори електродвигуна. На одній з бокових граней знаходиться група з чотирьох різьбових отворів, що призначені для подальшого монтажу збірки привода на деталь, що знаходиться на кінці відповідної ланки маніпулятора (рис. 3.29).

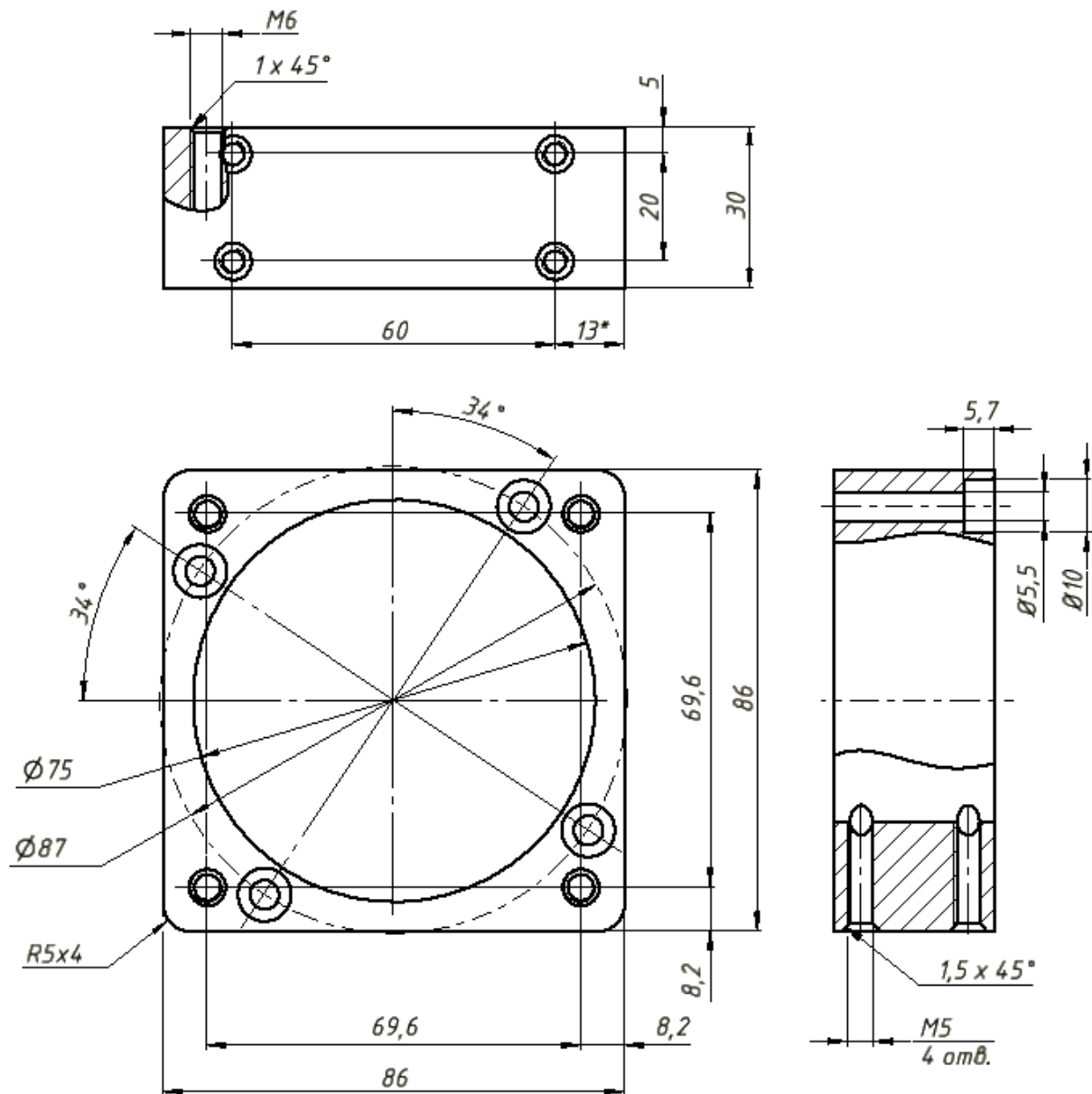


Рис. 3.29. Перехідник між електродвигуном та редуктором

В подальшому рекомендується перевірити достатність жорсткості конструкції суглоба маніпулятора при пікових статичних та динамічних навантаженнях. Можливе розвантаження вихідного вала редуктора від навантаження на згин та залишення лише навантаження кручення – розробкою окремої підшипникової опори, яка буде кріпитися на кінцеву деталь попередньої ланки маніпулятора (рис. 3.27, 1), в якій буде вільно обертатися початкова деталь наступної ланки маніпулятора (рис. 3.27, 4), що буде отримувати обертання через муфту від вихідного вала редуктора. Розвантаження редуктора дозволить зменшити навантаження на більшість деталей, збільшити надійність та строк служби. Негативними наслідками буде збільшення габарити шарніра за діаметром та довжиною та маси вузлів маніпулятора.



## 4. Інноваційна діяльність за темою дисертації

### 4.1. Опис мобільного робота, на який отриманий патент України

В більшості маніпуляторів на мобільних роботизованих комплексах не реалізована автоматизована система зворотного зв'язку для контролю виходу схвату маніпулятора в задану позицію. Зворотній зв'язок можливий лише через безпосереднє спостереження за кінцем маніпулятора оператором через систему камер. В співавторстві (Струтинський В.Б., Гуржій А.М., Новак В.В., Вакуленко С.Ю.) були розроблені оптико-електронна система (рис. 4.1), що забезпечує об'єктивне обчислення координати схвату маніпулятора відносно платформи, що забезпечує зворотній зв'язок та підвищує точність маніпулювання. На дану розробку була подана заявка до патентного відділу НТУУ КПІ (додаток 2), що привели до отримання патенту України на винахід та корисну модель (додаток 3) [51].

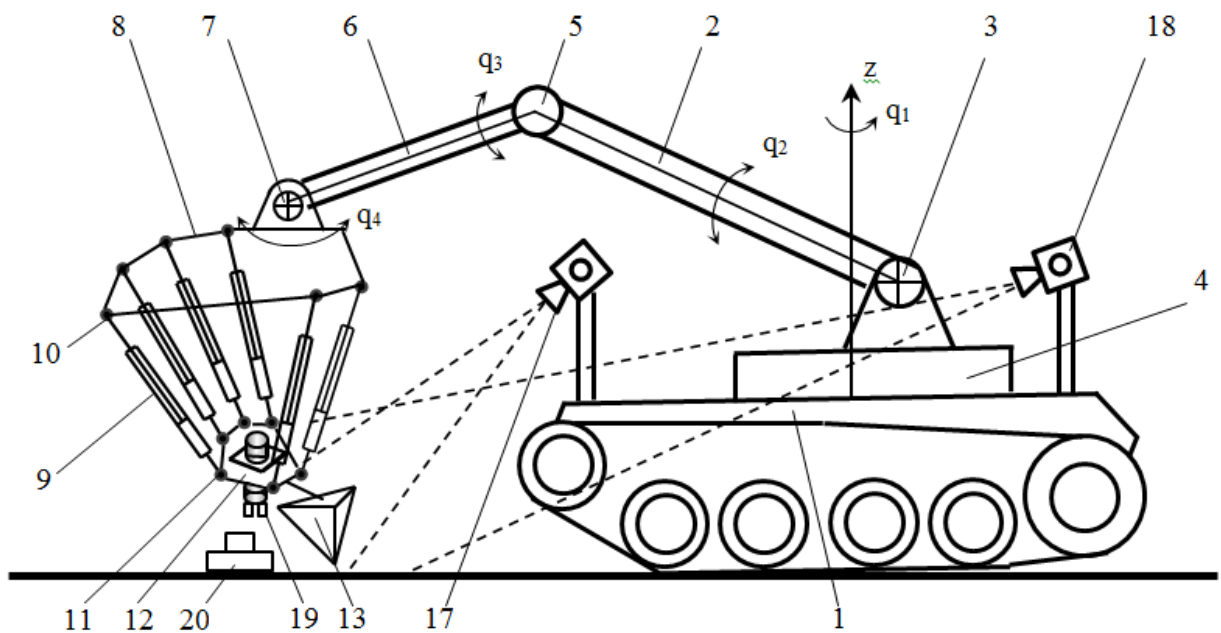


Рис. 4.1. Схема конструкції мобільного робототехнічного комплексу

Мобільний роботизований комплекс, на який отриманий патент, має самохідне шасі, антропоморфний маніпулятор із механізмом з паралельними кінематичними структурами на кінці, на рухомій платформі якого жорстко

встановлена спеціальна деталь, що виконана у вигляді тригранної піраміди та слугує для визначення просторового положення платформи. За допомогою встановлених на шасі системи камер, що разом складають 3D-сканер - можливе точне визначення просторового положення даної піраміди, а відносно неї вираховувати координати вершини маніпулятора та кут нахилу осей симетрії. Спеціальна деталь виконана у вигляді тригранної піраміди, ребра виконані під кутом  $90^\circ$  між собою та зорієнтовані вздовж осей симетрії рухомої платформи, на яку деталь змонтована на чітко визначеній відстані (рис. 4.2).

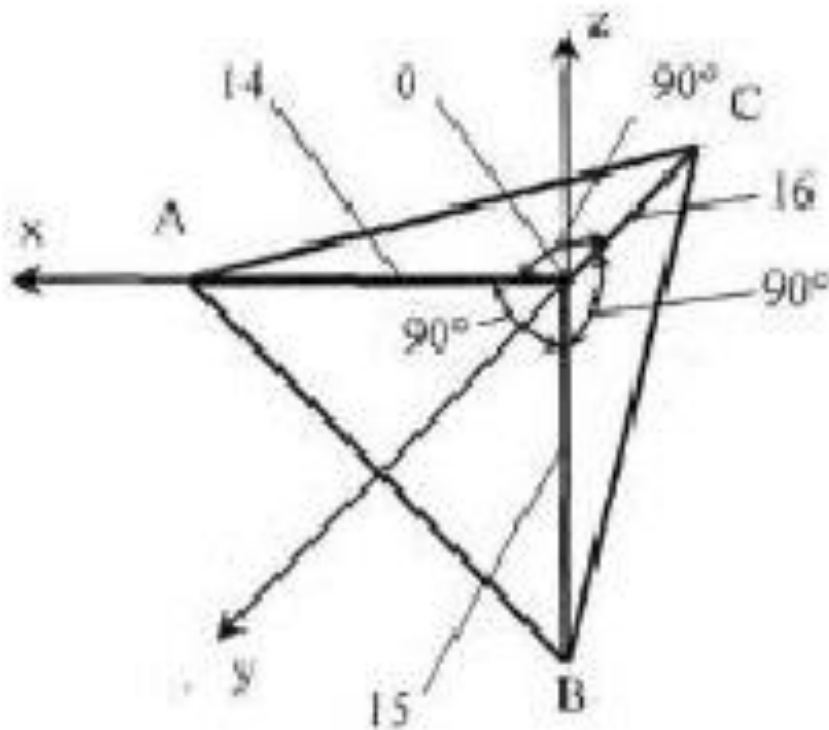


Рис. 4.2. Геометрія деталі для визначення положення кінця маніпулятора

Механізми маніпулятора мають фіксатори в активних шарнірах диференційного типу для фіксації силового плеча та кисті в чітко визначених позиціях, що дискретно покривають весь робочий простір (рис. 4.3).

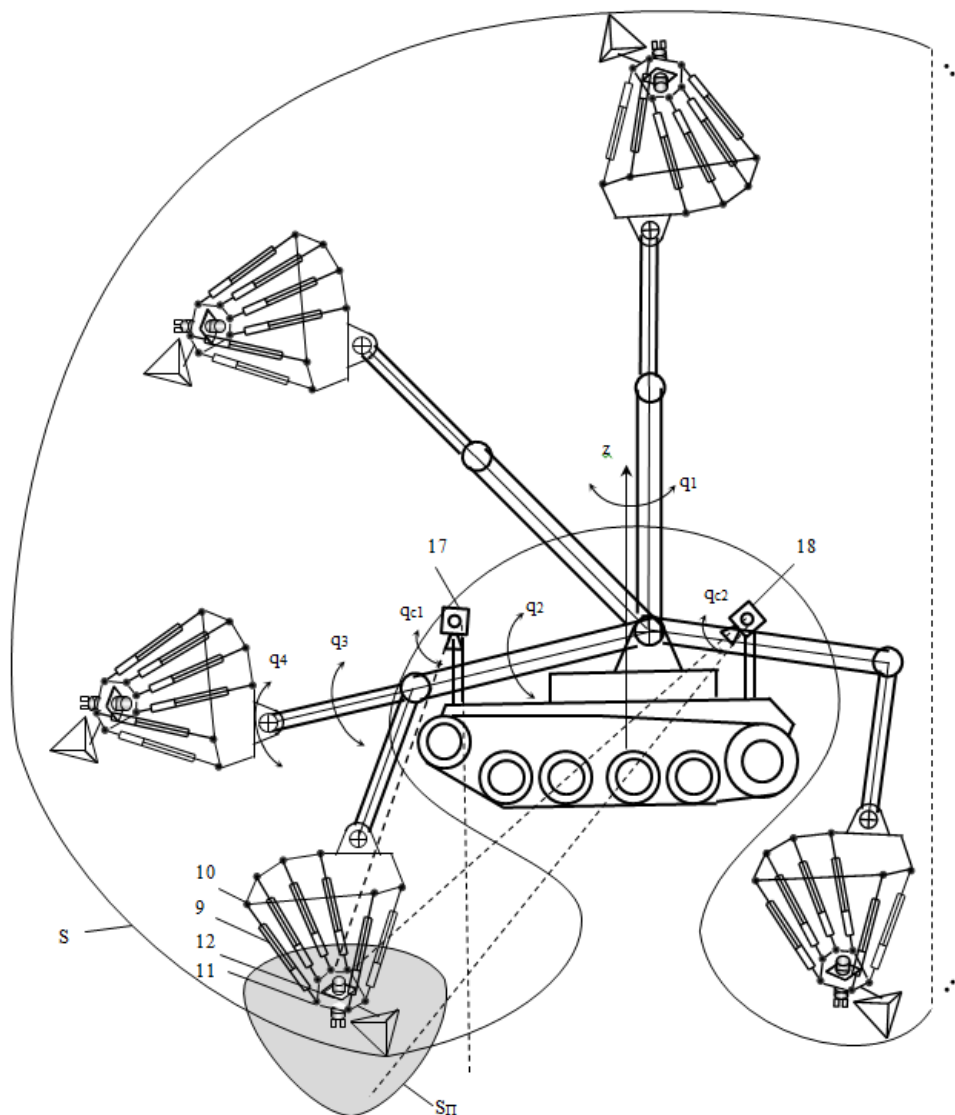


Рис. 4.3. Робочий простір маніпулятора

Запатентоване технічне рішення є новим у порівнянні з відомими технічними рішеннями та підвищує точність маніпулювання, необхідну при оперуванні компонентами небезпечних об'єктів. Система зворотного зв'язку дає можливість завчасно створювати програми для певного спектру операцій, що будуть виконуватися роботом в автоматичному режимі з використанням зворотного зв'язку навіть в середовищі, що динамічно змінюється. Це зніме частину навантаження з оператора за пультом мобільного робота-сапера, що працює в психологічно складних умовах.

#### **4.2. Представлення проекту на конкурс оборонних технологій Sikorsky Challenge**

В травні 2019 року мною була взята участь в Конкурсі оборонних технологій стартап-школи Sikorsky Challenge (додаток 1). Наша команда презентувала проект №37 «Експериментальний роботизований комплекс для відпрацювання основних положень проектування мобільних роботів спеціального призначення». Лідером команди був д.т.н., професор Струтинський В.Б.; відповідальна за менеджмент к.т.н., доцент Юрчишин О.Я.; відповідальний за матеріально-технічне забезпечення к.т.н., доцент Кравець О.М.; завідувач лабораторією Костиця С.М.; аспірант Полунічев В.Е.; студенти Новак В. та Вакуленко С.

Конкурс проектів Sikorsky Challenge проводився за підтримки Державного концерну "Укроборонпром", КПІ ім. Ігоря Сікорського, Наукового парку «Київська політехніка», ГС "Ліга оборонних підприємств України", Державна інноваційна фінансово-кредитна установа, Міністерства оборони України та ін. Метою заходу є презентація проектів військового та подвійного призначення представникам державних підприємств, вітчизняним та закордонним інвесторам.

Організаторам надійшло близько 130 проектів, поміж яких експертна група відібрала 85 розробок, що мали потенціально велике наукове та комерційне значення [52, 53].

Для демонстрації проекту, користуючись рекомендаціями консультантів з питань стартапів, були розроблені презентація та інформаційний плакат. Публіці вживу був представлений модуль робота на колісно-гусеничному шасі та з встановленим маніпулятором з паралельною кінематикою, що був розроблений та зібраний представниками кафедри (рис. 4.4).

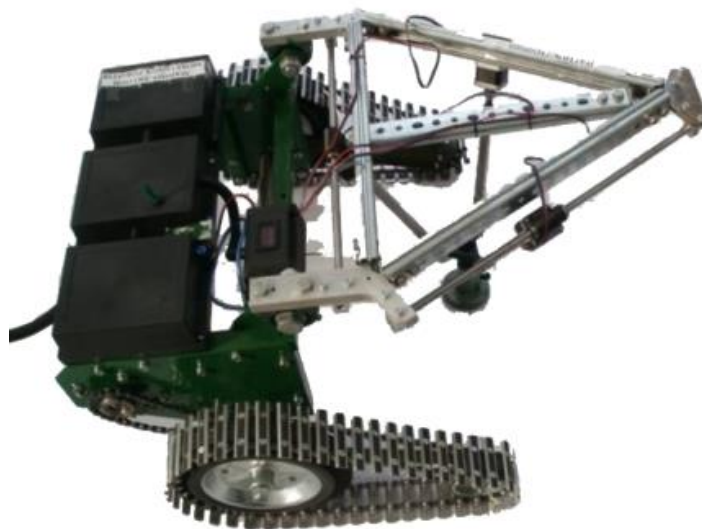


Рис. 4.4. Мобільний робот для маніпулювання небезпечними об'єктами

Додатково були продемонстровані проекти, якими займалися студенти. Перша робота – модульний роботизований комплекс спеціального призначення, що розробив Новак Владислав для бакалаврського проекту. Дана модульна компоновка дозволяла проводити польові балістичні випробування різних марок стрілецького озброєння (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Проект модульного роботизованого комплексу зі стрілецьким озброєнням

Друга робота – мій бакалаврський проект мобільного роботизованого комплексу, що оснащений системою маніпуляторів. За рахунок сумісної роботи маніпуляторів розширяються функціональні можливості платформи (рис. 4.6).

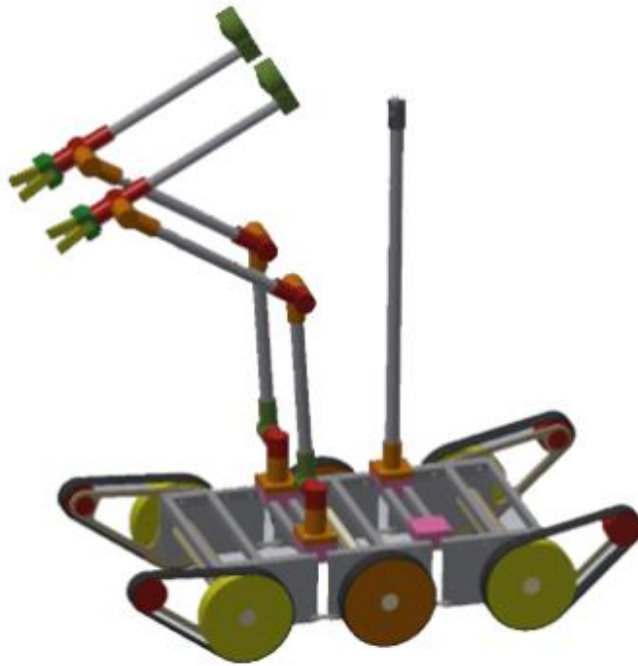


Рис. 4.6. Проект мобільного робота з системою маніпуляторів

Головною ідеєю було створення комплексу уніфікованих модулів, що дадуть можливість швидко та легко збирати прототипи мобільних роботів, проводити випробування тестових конструкцій, робити висновки та правки перед впровадженням в одиничне або серійне виробництво. В першу чергу комплекс призначений для державних та приватних компаній, що займаються проектуванням та виготовленням наземних роботизованих комплексів для підрозділів Збройних Сил, Служб з надзвичайних ситуацій.

Поточний стан проекту – був виготовлений діючий варіант мобільного робота. Він оснащений гусеничним шасі з фліперами для підвищення прохідності, механізмом з паралельною кінематикою – для роботи з небезпечними об'єктами. Для окремих вузлів та технічних рішень створена документація та отримані патенти України.

Додатково на форумі були досліджені проекти інших команд, що приймали участь, розглянуті технічні рішення для можливого використання у майбутньому, створені контакти з представниками компаній та інженерно-науковими групами, висвітлена важливість вирішення проблеми створення Україною ряду мобільних роботів для широкого кола застосувань.

## **Висновки**

Отже, основною метою даного проекту була розробка системи маніпуляторів, призначеної для наземного роботизованого комплексу.

В рамках огляду актуальних технічних рішень були розглянуті основні представники сучасних роботів-саперів; систематизовані вибухонебезпечні об'єкти, з яким працюють дані роботи; висвітлені найважливіші виклики, що стоять перед проектувальниками сучасних роботів; проведений патентний пошук; була розглянута методика оцінки рухомих можливостей дворуких роботів.

Для шарнірів маніпуляторів був спроектований циклоїдний редуктор, досліджені принципи роботи та проектування даного типу редукторів, проведений аналіз переваг та недоліків, виконаний аналіз напружень для збірки та окремих деталей для перевірки на міцність.

Була спроектована система з двох маніпуляторів для наземного роботизованого комплексу, детально розроблені окремі вузли, створена математична модель для аналізу динаміки системи маніпуляторів, описані основні функції системи керування та подальші кроки покращення конструкції роботизованого комплексу.

Була виконана інноваційна діяльність за темою дисертації, а саме: розроблене інноваційне технічне рішення для мобільного робота, на яке отримане патент на винахід та корисну модель; представлені розробки як частину проекту, що пройшов у фінал конкурсу стартапів Sikorsky Challenge.

## Перелік посилань

1. Понад півсотні протитанкових мін часів другої світової знайшли в Києві [Електронний ресурс] // 5 канал. 2018. 10 серпня. URL: <https://www.5.ua/kyiv/ponad-pivсотni-protytankovykh-min-chasiv-druhoi-svitovoi-znaishly-v-kyievi-175356.html> (дата звернення: 01.05.2021).
2. Понад 800 цивільних постраждали через міни та вибухонебезпечні предмети на Донбасі – Міноборони [Електронний ресурс] // Радіо Свобода. 2019. 03 квітня. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-minoborony/29859043.html> (дата звернення: 01.05.2021).
3. Рятувальники розповіли про ліквідацію наслідків вибухів біля Ічні [Електронний ресурс] // Радіо Свобода. 2018. 18 жовтня. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-vybukhy-v-ichni/29550174.html> (дата звернення: 01.05.2021).
4. Типы мин [Електронний ресурс] // Stopmina.com. URL: [http://stopmina.com/ru/what\\_to\\_know/types](http://stopmina.com/ru/what_to_know/types) (дата звернення: 01.05.2021).
5. Gent Edd. The 10 Grand Challenges Facing Robotics in the Next Decade [Електронний ресурс] // SingularityHub. 2018. 06 лютого. URL: <https://singularityhub.com/2018/02/06/the-10-grand-challenges-facing-robotics-in-the-next-decade> (дата звернення: 01.05.2021).
6. Dery Mikaela. 10 big robotics challenges that need to be solved in the next 10 years [Електронний ресурс] // CREATE DIGITAL. 2018. 16 лютого. URL: <https://createdigital.org.au/robotics-challenges-next-10-years> (дата звернення: 01.05.2021).
7. Crowe Steve. 10 Biggest Challenges in Robotics [Електронний ресурс] // The Robot Report. 2018. 02 лютого. URL: <https://www.therobotreport.com/10-biggest-challenges-in-robotics> (дата звернення: 01.05.2021).
8. Lewis Ben. The 10 biggest challenges facing robotics [Електронний ресурс] // Australia's Science Channel. 2018. 26 липня. URL:



- <https://australiascience.tv/the-10-biggest-challenges-facing-robotics> (дата звернення: 01.05.2021).
9. The UDC Summary (UDCS) [Електронний ресурс] // UDC Consortium. URL: <http://www.udcsummary.info/php/index.php?tag=6&lang=uk> (дата звернення: 01.05.2021).
10. УДК класифікатор – що означає і чому потрібен [Електронний ресурс] // Видавництво «Триумф». URL: <https://www.triumph.ru/udk-klassifikator.html> (дата звернення: 01.05.2021).
11. International Patent Classification (IPC) [Електронний ресурс] // World Intellectual Property Organization. URL: <https://www.wipo.int/classifications/ipc> (дата звернення: 01.05.2021).
12. О Международной патентной классификации [Електронний ресурс] // World Intellectual Property Organization. URL: <https://www.wipo.int/classifications/ipc/ru/preface.html> (дата звернення: 01.05.2021).
13. Спосіб розмінування місцевості від вибухонебезпечних предметів // Патент України №81356. 2013. Бюл. №12 / Дачковський В.О., Воробйов О.М., Коцюруба В.І., Кізяк Я. О.
14. Мобильный робот // Патент России № 2487007. 2013. Бюл. №19 / Алешин А.А.
15. Сборный мобильный робот // Патент России № 174140. 2017. Бюл. №28 / Прокопович Г.А.
16. Мобильный робототехнический комплекс // Патент России № 2241594. 2004. Бюл. №34 / Лукьянчиков В.В.
17. Рухомий пристрій для ударного знищення вибухонебезпечних предметів уламковими елементами // Патент України № 130521. 2018. Бюл. №23 / Гусяков О.М., Шишанов М.О., Коцюруба В.І., Дачковський В.О., Куровська Т.Ю.

18. Дістанційно- і самокерований агрегат бойової автономної модульної платформи високої прохідності для прихованого транспортування військових вантажів // Патент України № 115207. 2017. Бюл. №18 / Беліков В.Т., Григор'єв О.П., Белохвост В.С., Гуляк О.В., Кравчук О.І., Ковалішин С.С., Чепков І.Б., Цуканов В.Н.
19. Ваулина Фаина за матеріалами NAKED SCIENCE. Біологи розробляють бактерій для пошуку бомб [Електронний ресурс] // ZN.UA. 2019. 14 листопада. URL: <https://zn.ua/TECHNOLOGIES/biologi-razrabatyvayut-bakteriy-dlya-poiska-bomb-336035.html> (дата звернення: 01.05.2021).
20. Парафонова В. Мины живут дольше людей [Електронний ресурс] // Наука и жизнь. Вип. №6, 2012. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/4338/> (дата звернення: 01.05.2021).
21. Левков О. Українським саперам допоможуть роботизовані системи [Електронний ресурс] // Defense Express. 2018. 23 січня. URL: <https://defence-ua.com/index.php/statti/4044-ukrayinskym-saperam-dopomozhut-robotyzovani-systemy> (дата звернення: 01.05.2021).
22. Dragon runner - сапёрный робот [Електронний ресурс] // Страйкбольна команда 40 Commando Royal Marines. 2013. 07 квітня. URL: <https://40cdorm.ru/articles/britanskaya-armiya/snaryajenie/dragon-runner> (дата звернення: 01.05.2021).
23. Dragon Runner – ультракомпактный разведывательный робот [Електронний ресурс] // OHRANA.RU. URL: <http://ohrana.ru/equipment/technique/3134/> (дата звернення: 01.05.2021).
24. TALON Tracked Military Robot [Електронний ресурс] // Army Technology. URL: <https://www.army-technology.com/projects/talon-tracked-military-robot/> (дата звернення: 01.05.2021).
25. MarkV-A1 [Електронний ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/MarkV-A1> (дата звернення: 01.05.2021).

- 26.Andros MarkV-A1 [Електронний ресурс] // Army Guide. URL: <http://www.army-guide.com/rus/product.php?prodID=5960&printmode=1> (дата звернення: 01.05.2021).
- 27.KAPLAN Explosive Ordnance Disposal Robot [Електронний ресурс] // Aselsan. URL: <https://www.aselsan.com.tr/en-us/capabilities/unmanned-systems/unmanned-vehicles/kaplan-explosive-ordnance-disposal-robot> (дата звернення: 01.05.2021).
- 28.KAPLAN [Електронний ресурс] // Army Guide. URL: <http://www.army-guide.com/rus/product5044.html> (дата звернення: 01.05.2021).
- 29.Легкий робот для разминирования DIGITAL VANGUARD ROV [Електронний ресурс] // Інтертрейд-Україна. URL: <http://intertrade-ukraine.com/oborudovanie/robototekhnicheskie-kompleksy/legkij-robot-dlya-razminirovaniya-digital-vanguard-rov> (дата звернення: 01.05.2021).
- 30.Универсальный робот для разминирования AVENGER ROV [Електронний ресурс] // Інтертрейд-Україна. URL: <http://intertrade-ukraine.com/oborudovanie/robototekhnicheskie-kompleksy/universalnyj-robot-dlya-razminirovaniya-avenger-rov> (дата звернення: 01.05.2021).
- 31.Павленко І. І. Промислові роботи та РТК: монографія /. - Кропивницький : Лисенко В. Ф. [вид.], 2016. - 490 с. - ISBN 978-617-7197-49-1.
- 32.Sumitomo Cyclo Drive 6000 [Електронний ресурс] // ТД ИРБИС. URL: <https://www.irbis.ua/ru/produktsiya-i-uslugi/motor-reduktory/sumitomo.html> (дата звернення: 01.05.2021).
- 33.Циклоидальный редуктор [Електронний ресурс] // ТОРГОВО-ТЕХНИЧЕСКИЙ АЛЬЯНС «АПС». 2017. 17 травня. URL: <https://www.ttaars.ru/about/stati/tsikloidalnyy-reduktor> (дата звернення: 01.05.2021).
- 34.Cycloidal drive [Електронний ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cycloidal\\_drive](https://en.wikipedia.org/wiki/Cycloidal_drive) (дата звернення: 01.05.2021).

- 35.Mraz Stephen. Comparing Cycloidal and Planetary Gearboxes [Електронний ресурс] // MachineDesign. 2011. 03 лютого. URL: <https://www.machinedesign.com/news/article/21829580/comparing-cycloidal-and-planetary-gearboxes> (дата звернення: 01.05.2021).
- 36.What is a Cycloidal Speed Reducer? [Електронний ресурс] // Darali Drives. URL: <http://www.darali.com/page17.html> (дата звернення: 01.05.2021).
- 37.Younis Omar. Building a Cycloidal Drive with SOLIDWORK [Електронний посібник] // Solidworks Blogs. 2014. 02 липня. URL: <https://blogs.solidworks.com/teacher/wp-content/uploads/sites/3/Building-a-Cycloidal-Drive-with-SOLIDWORKS.pdf> (дата звернення: 01.05.2021).
- 38.stepbystep-robotics. How to Design a Cycloidal Drive for Robot Actuator Module! [Електронний ресурс] // YouTube. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Nk3aaVcvbpA> (дата звернення: 01.05.2021).
- 39.James Bruton. 3D Printed Cycloidal Drive V2 - Much Better! [Електронний ресурс] // YouTube. 2021. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=tgEOpl880KM> (дата звернення: 01.05.2021).
- 40.Construction of the cycloidal disc of a cycloidal drive [Електронний ресурс] // tec-science. 2019. 14 січня. URL: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/construction-of-the-cycloidal-disc> (дата звернення: 01.05.2021).
- 41.Mirko Blagojevic et al. A New Design of a Two-Stage Cycloidal Speed Reducer // Journal of Mechanical Design. Випуск №133. 2011. Серпень.
- 42.Mirko Blagojevic et al. Dynamic Behaviour of a Two-Stage Cycloidal Speed Reducer of a New Design Concept // Technical Gazette 25, Suppl. 2(2018), 291-298.
- 43.Конюх В.Л. Основи робототехніки. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 281 с. – ISBN 978-5-222-12575-5.

- 44.Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. – М. : Наука, 2006. – 383 с. – ISBN 5-02-033952-0.
- 45.Журавлев Ю.Н. Кинематическое и динамическое исследование промышленного робота. – Псков : Издательство ППИ, 2008. – 121 с. – ISBN 978-5-91116-036-4.
- 46.Viliam Fedák, František Ďurovský and Róbert Üveges. Analysis of Robotic System Motion in SimMechanics and MATLAB GUI Environment [Электронный ресурс] // IntechOpen. 2014. 13 лютого. URL: <https://www.intechopen.com/books/matlab-applications-for-the-practical-engineer/analysis-of-robotic-system-motion-in-simmechanics-and-matlab-gui-environment> (дата звернення: 01.05.2021).
- 47.Тихонов К.М., Тишков В.В. SimMechanics Matlab как средство моделирования динамики сложных авиационных робототехнических систем [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 41. URL:<http://trudymai.ru/upload/iblock/84f/simmechanicsmatlab-kak-sredstvo-modelirovaniya-dinamiki-slozhnykh-aviatsionnykh-robototekhnicheskikh-sistem.pdf> (дата звернення: 01.05.2021).
- 48.Сырямкин В.И. Интеллектуальные робототехнические и мехатронные системы. – Томск, 2017. – 256 с. – ISBN 978-5-93629-586-7.
- 49.Code Bullet. A.I. Learns to FLY [Электронный ресурс] // YouTube. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=D5xX6nRWDko> (дата звернення: 01.05.2021).
- 50.Mostafa Ghoniema, Taher Awadb, Ossama Mokhiamar. Control of a new low-cost semi-active vehicle suspension system using artificial neural networks [Электронный ресурс] // ScienceDirect. Alexandria Engineering Journal. 2020. Жовтень. URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820303380> (дата звернення: 01.05.2021).

- 51.Мобільний робототехнічний комплекс з дистанційним керуванням // Патент України № 140446. 2020. Бюл. №4 / Струтинський В.Б., Гуржій А.М., Вакуленко С.Ю., Новак В.В.
- 52.В Україні стартує перший Конкурс проектів оборонних технологій Sikorsky Challenge [Електронний ресурс] // STARTUP SCHOOL. 2019. 09 лютого. URL: <https://blog.sikorskychallenge.com/2019/02/sikorsky-challenge.html> (дата звернення: 01.05.2021).
- 53.На перший Конкурс оборонних технологій Sikorsky Challenge відібрано 85 перспективних розробок [Електронний ресурс] // STARTUP SCHOOL. 2019. 16 квітня. URL: <https://blog.sikorskychallenge.com/2019/04/sikorsky-challenge-85.html> (дата звернення: 01.05.2021).

Сертифікат фіналіста Конкурсу проектів  
оборонних технологій Sikorsky Challenge





Довідка, видана патентним відділом з питань інтелектуальної власності  
НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, про подачу заявки на патент


ДОВІДКА

Видана авторам корисної моделі «Мобільний робото технічний комплекс з дистанційним керуванням, призначений для роботи в екстремальних умовах» Новаку Владиславу Віталійовичу та Вакуленку Сергію Юрійовичу надалі в тому, що 30.05.2019 опис, формула, реферат подані до відділу з питань інтелектуальної власності та комерціалізації наукових розробок для подання заявки на видачу патенту до Державного підприємства інститут інтелектуальної власності.

Подані документи передано на розгляд Комісії з питань комерційної таємниці зв'язку з тим, що вони містять відомості, що можуть становити комерційну таємницю Університету.

Рішення про збереження матеріалів заявки на корисну модель «Мобільний робото технічний комплекс з дистанційним керуванням, призначений для роботи в екстремальних умовах» в режимі комерційної таємниці або про подання заявки до ДП «УКРПАТЕНТ» буде прийнято на підставі висновку комісії протягом місяця.

Начальник відділу  
з питань інтелектуальної власності  
та комерціалізації наукових розробок

 Орешникова О.О.  
20.08.2019  




## Деклараційний патент на корисну модель



# Специфікація циклоїдного редуктора

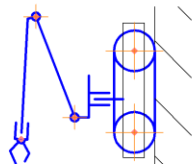
[illegible]



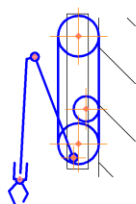
Графічний матеріал (листи та креслення)

Наявні робототехнічні комплекси

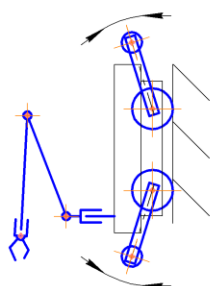
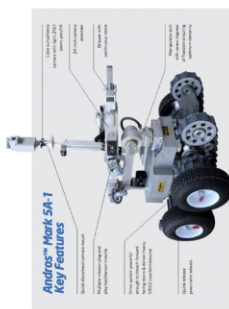
Dragon Runner



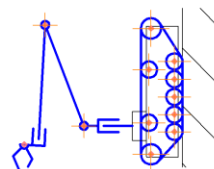
TALON



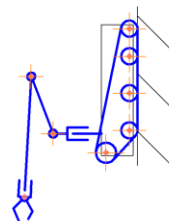
Andros Mark 5A-1



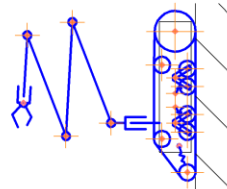
KAPLAN EOD



Digital Vanguard ROV



Avenger ROV



Виконав: Вакуленко С.Ю.  
Наук. керівник: проф. Струтинський В.Б.

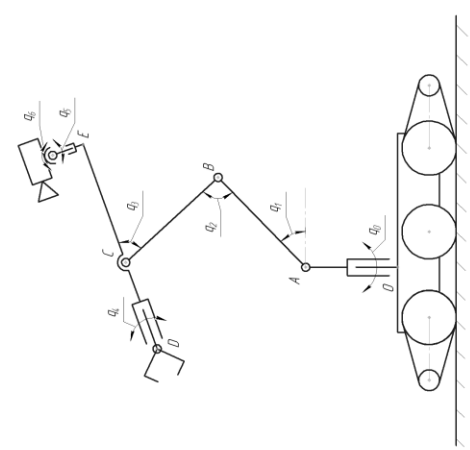


ЕЖ 000123104-006-804

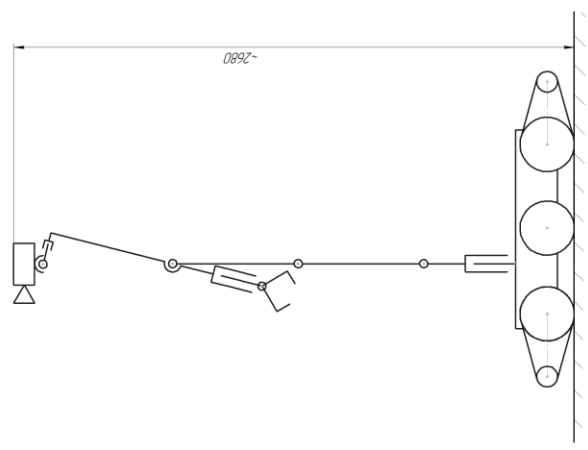
# Кінематика системи двох маніпуляторів

Максимальний вільний схвату

Позначення керованих координат маніпулятора

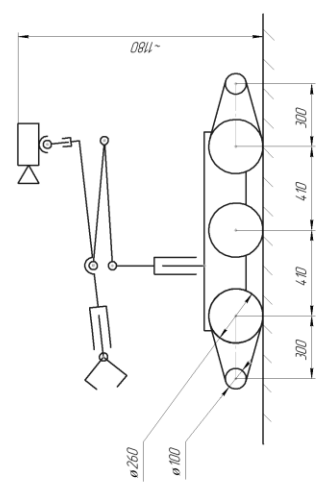


Максимальне підняття телекамери

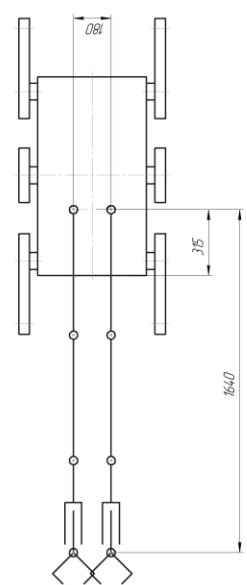


## Характеристика змін керованих координат

Вид зверху на комплекс



Вид зверху на комплекс

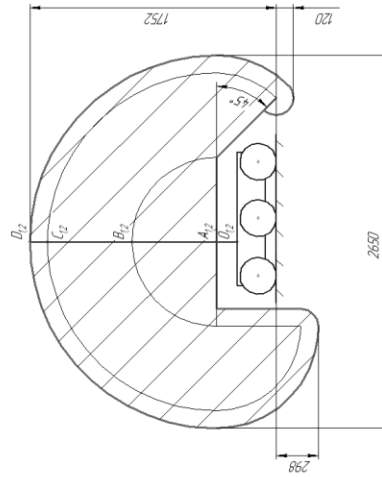
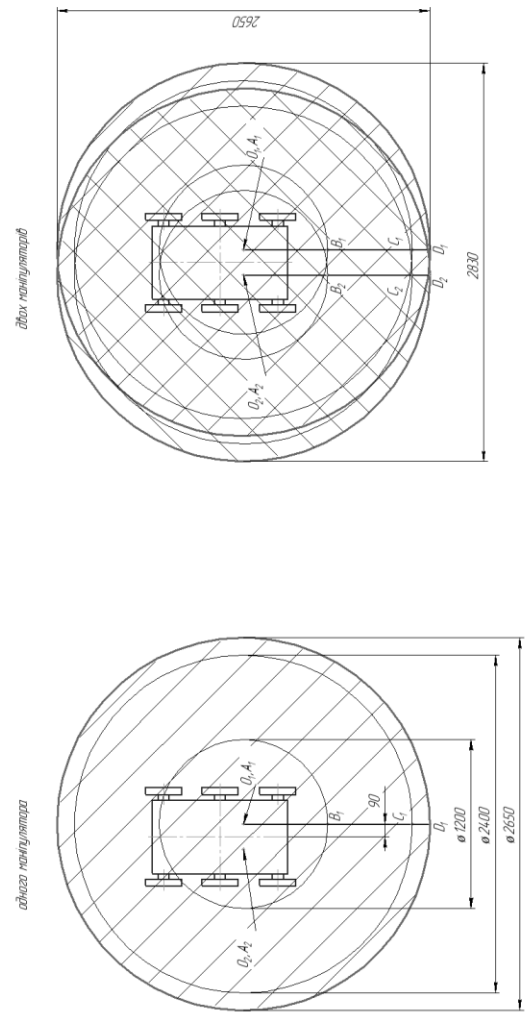
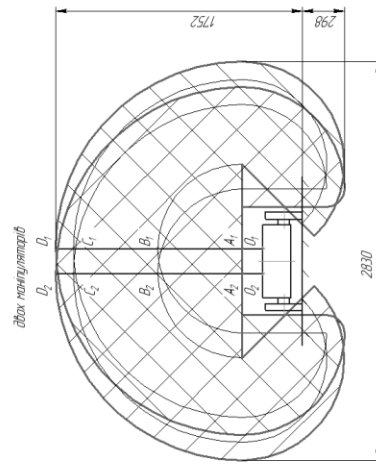
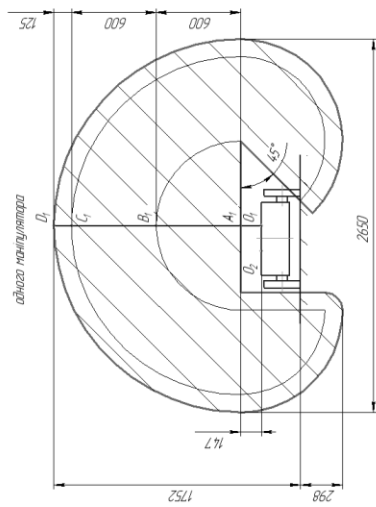
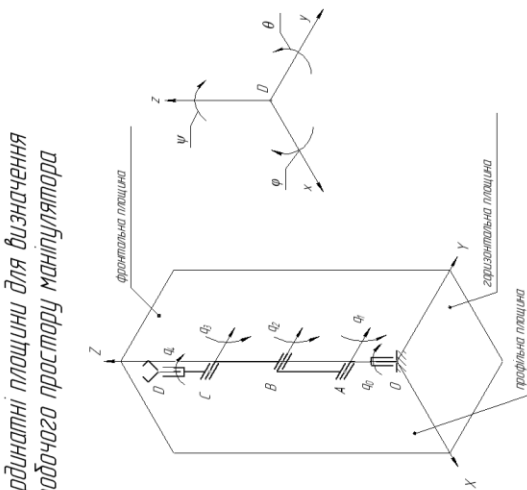


Назва керованих координат	Діапазон значень	Максимальна швидкість зміни, є/сек
$q_1$	$-180 \div 180$	30
$q_2$	$0 \div 180$	40
$q_3$	$0 \div 360$	40
$q_4$	$0 \div 180$	40
$q_5$	$0 \div 360$	40
$q_6$	$0 \div 360$	50
$q_7$	$-90 \div 90$	50

Модель	МР-910	ММД-21000 КЗ
Розробник	МР-910	ММД-21000 КЗ
Виробник	МР-910	ММД-21000 КЗ
Датум	17.07.2017	17.07.2017
Версія	1.0	1.0
Статус	Затверджено	Затверджено
Місце	МР-910	ММД-21000 КЗ
Сторінка	1	1
Всього сторінок	1	1
Місце	МР-910	ММД-21000 КЗ
Сторінка	1	1
Всього сторінок	1	1

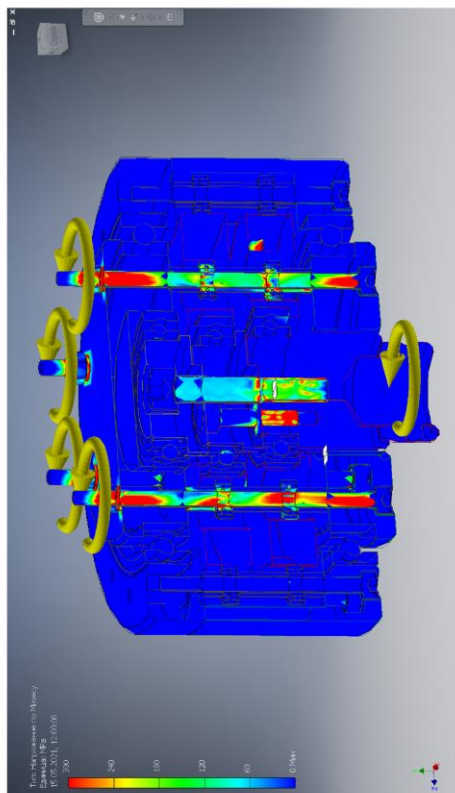
Схема робочого простору  
в профільній площині

Схема рабочего простору в горизонтальній площині

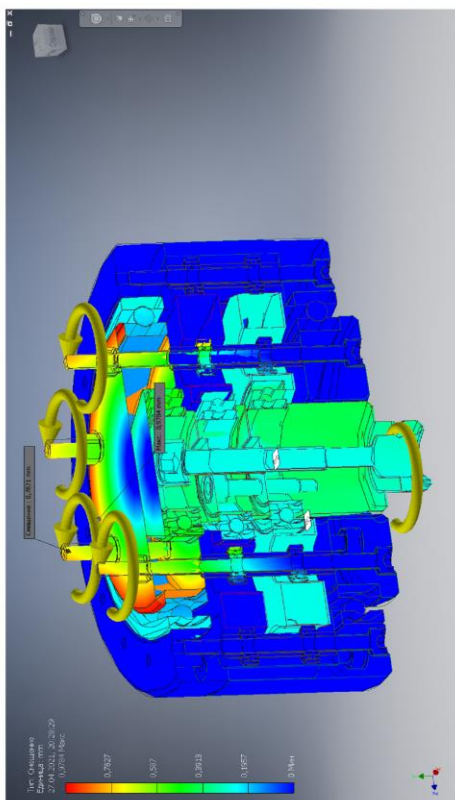
[illegible]



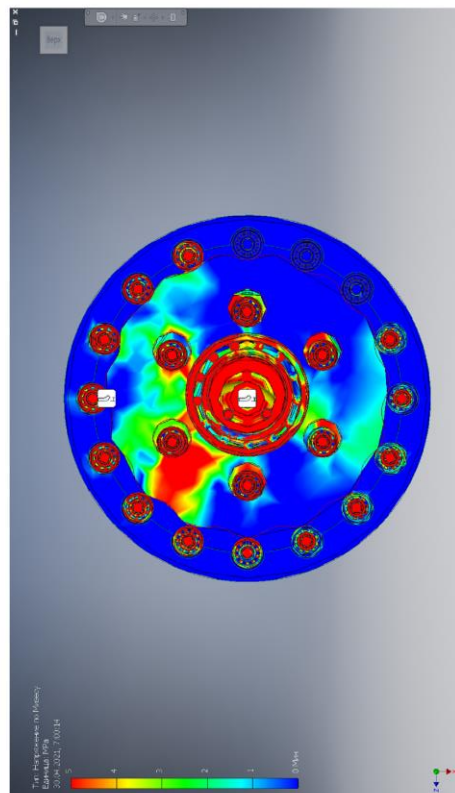
## Статичний аналіз напружень збірки циклоїдного редуктора в Autodesk Inventor



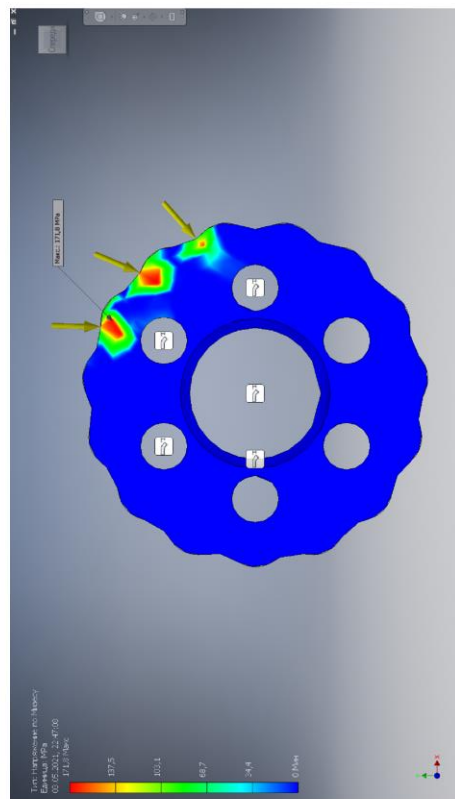
Напруження за Мізесом в збірці редуктора



Зміщення деталей редуктора



Напруження в першій циклоїдній пластині  
(макс. значення кольорової гами суттєво занижене!)



Альтернативний розрахунок напружень в циклоїдній пластині

Виконав: Вакуленко С.Ю.  
Наук. керівник: проф. Струтинський В.Б.



MB-9101MH.MD310.000 C6

Перв. примеч.

Справка. №

A

Подп. и дата

Инв. № дудл.	З. №
--------------	------

БЭДМ. УНД


DWD

ing n. v.

*Noton*


νρ

No. 10

Инд.

[illegible]

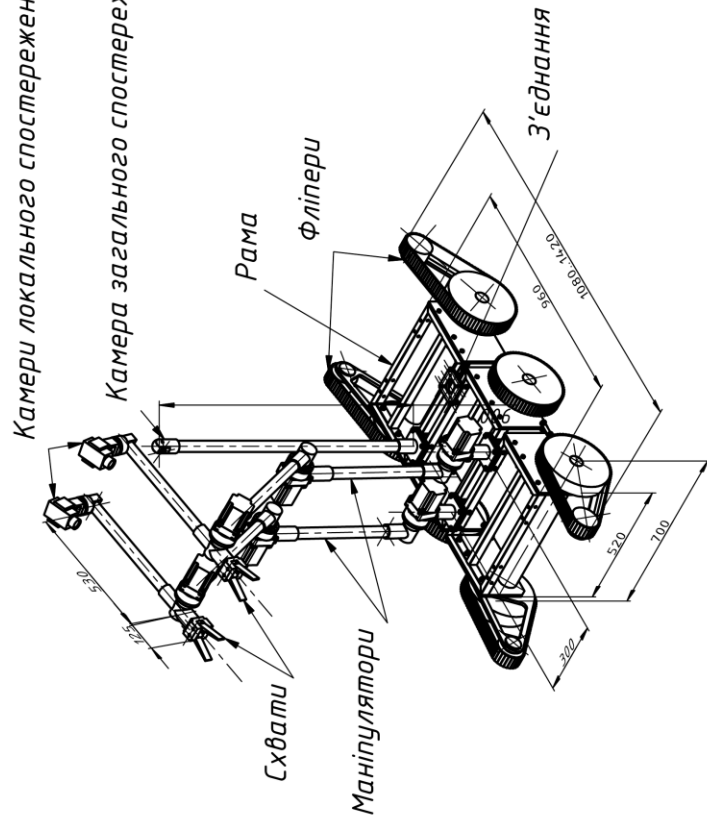
2

--	--

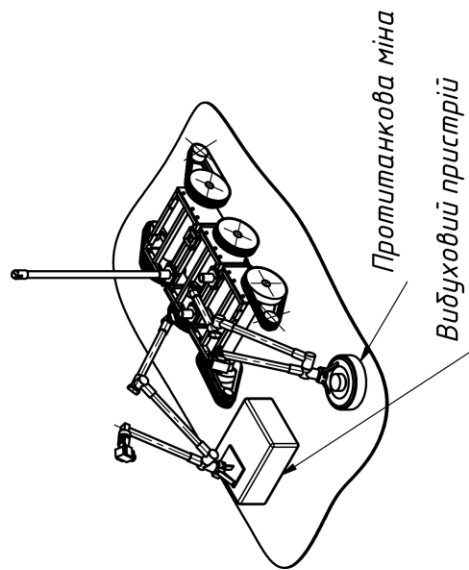
1

Формат А3

## Загальний вид комплексу



Робота з відеохімовими пристроями (1:25)



Представлений наземний роботизований комплекс має високі показники прохідності завдяки колісно-гусеничному шасі із застосуванням пристроїв підвищення прохідності (філіперів).

Кількість модулів може бути змінена в залежності від потреб (в даній комплектації 3 модулі).

*Комплекс оснащений системою двох антропоморфних маніпуляторів та відеокамерою для загального огляду.*

МВ-9101МН.МД310.000 С6

### Мобільний роботизований

комплекс

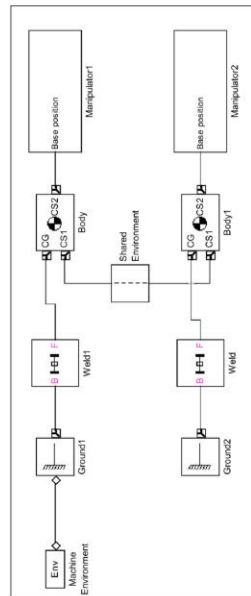
מחלקת המחקר והפיתוח  
מחלקת המכירות והשיווק

корського  
3-91мн

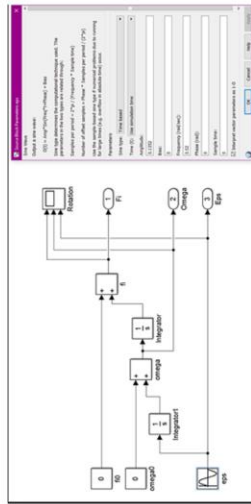
---



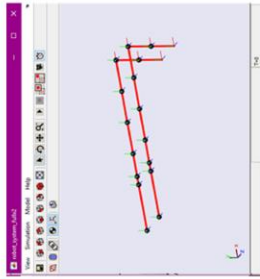
## Математична модель системи маніпуляторів в Simulink



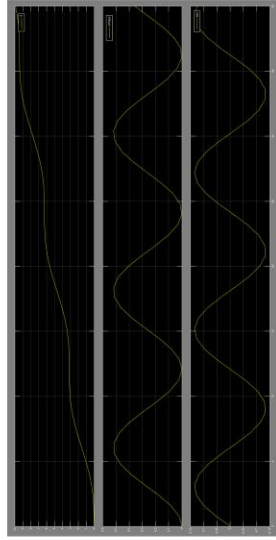
Модель системи маніпуляторів



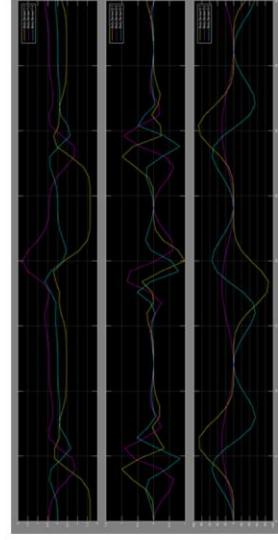
Підсистема, що задає закон руху приводів



Результати моделювання руху маніпуляторів



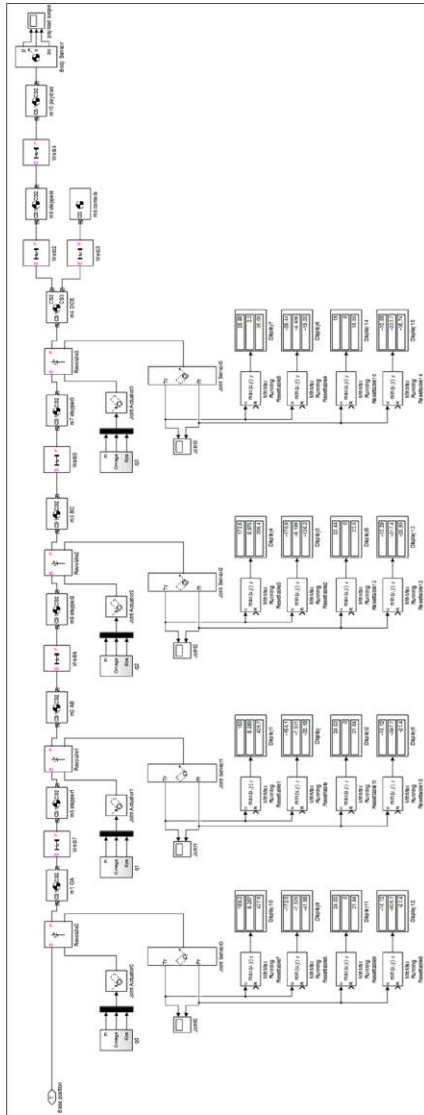
Заданий закон руху приводів маніпуляторів



Дані про рух вершини маніпулятора  
(координати, швидкості, прискорення)

Виконав: Вакуленко С.Ю.  
Наук. керівник: проф. Струтинський В.Б.

Підсистема – модель одиничного маніпулятора



# Патент на винахід та корисну модель "Мобільний робототехнічний комплекс"

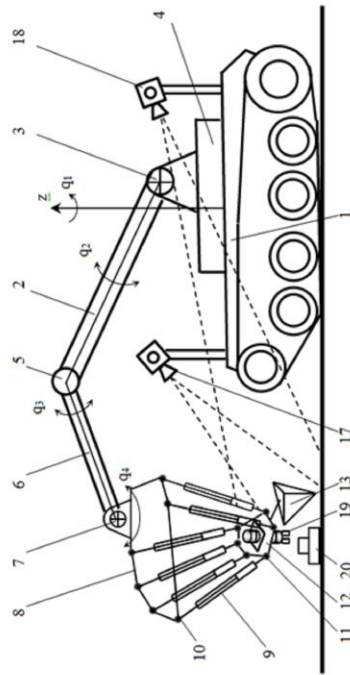
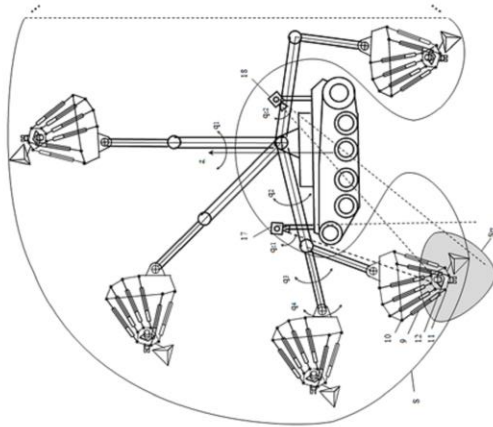
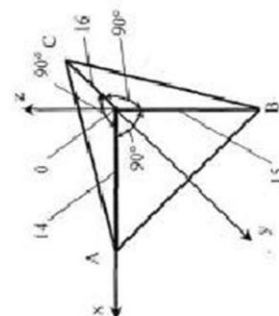


Схема мобільного роботизованого комплексу



Робочий простір манипулятора



Геометрія деталі для визначення координат верхньої частини манипулятора

Виконав: Вакуленко С.Ю.  
Наук керівник: проф. Струтинський В.Б.



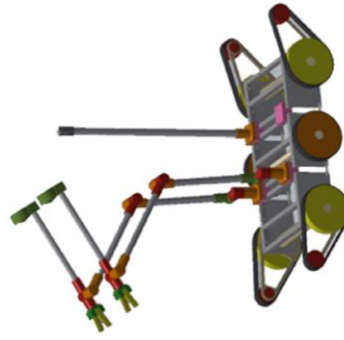
## Представлення проекту на конкурс оборонних технологій Sikorsky Challenge



Мобільний робот для маніпулювання  
небезпечними об'єктами



Проект мобільного роботизованого  
комплексу зі стрілецьким озброєнням



Проект мобільного робота  
з системою маніпуляторів

Виконав: Вакуленко С.Ю.  
Наук. керівник: проф. Струтинський В.Б.