

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В.Б. Струтинський, А.М. Гуржій

## **НАЗЕМНІ РОБОТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ**

Монографія

*Рекомендовано до друку Вченої Радою  
Національного технічного університету  
України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
(протокол засідання Вченої Ради  
№1 від 23 січня 2023 р.)*

Житомир - 2023 –ПП «Рута»

УДК 621.9.04-868  
С 87

*Рекомендовано до друку Вченої Радою Національного  
технічного університету України «КПІ ім. Ізгоря Сікор-  
ського (протокол засідання Вченої Ради  
№ 1 від 23 січня 2023 )*

Рецензенти:

|                            |                                                                                                                                                       |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Луців І.В., д.т.н.,</i> | професор, завідувач кафедри конструювання верстатів,<br>інструментів та машин Тернопільського державного<br>технічного університету імені Івана Пулюя |
| <i>Козлов Л.Г. д.т.н.,</i> | професор, завідувач кафедри машинознавства Вінницького<br>Національного технічного університету                                                       |
| <i>Бадах В.М., к.т.н.,</i> | доцент, в.о. завідувача кафедри гідрогазових систем<br>Національного авіаційного університету                                                         |

С 87 **Струтинський В.Б., Гуржій А.М.** : Монографія. – Житомир: ПП «Рута», 2023 . – 524 с.

ISBN \_\_\_\_\_

В монографії в систематичній формі викладені дослідження в галузі наземних роботизованих комплексів. Наведені конструкції сучасних наземних роботизованих комплексів виконано аналіз їх схемних і конструктивних рішень та областей застосування. Особливу увагу приділено пристроям спеціального призначення (військовим роботам).

Детально викладені особливості геометрії, кінематики і статички наземних роботизованих комплексів. Розроблені методи розрахунку кінематичних параметрів, визначені похибки позиціонування роботів по шести просторовим координатам, встановлені умови статичної стійкості наземних роботизованих комплексів.

Запропоновані методи дослідження динаміки наземних роботизованих комплексів. Викладено дослідження динамічних властивостей роботів з використанням теорії нечітких (fuzzy) множин.

Сформульовані основні положення теорії проектування наземних роботизованих комплексів. Запропонована концепція, схемні і конструктивні рішення основних вузлів, методики проектних розрахунків.

Монографія розрахована на широке коло фахівців промисловості, науковців, аспірантів та студентів, які займаються розробленням та дослідженням робототехнічних систем.

Іл.: 577. Табл.: 14. Бібліогр.: 172 назв.

УДК 621.9.04-868

ISBN \_\_\_\_\_

© Струтинський В.Б. Гуржій А.М., 2023  
©

## **Вступ**

Наземні роботизовані комплекси застосовуються при виконанні операцій в надзвичайних ситуаціях і, як правило, працюють з небезпечними об'єктами. В даний час застосовуються роботи імпортного виробництва. Вітчизняні розробки в даній галузі ведуться на протязі останніх 20-ти років. Наявні окремі розробки дослідних зразків наземних роботизованих комплексів різного виду. Для підвищення ефективності дослідно-конструкторських робіт в напрямку створення наземних роботизованих комплексів спеціального призначення необхідні фундаментальні теоретичні та експериментальні дослідження. Вони проведені на кафедрі конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Основні результати досліджень викладено в даній монографії.

Матеріали згруповані в чотирьох частинах. В першій частині розглянуті особливості конструкції, технічні характеристики наземних роботизованих комплексів та напрямки їх інноваційного розвитку. Наведено огляд сучасних наземних роботизованих комплексів, виконано аналіз їх схемних і конструктивних рішень та областей застосування. Запропоновані класифікаційні принципи та розроблена класифікація комплексів по геометричним та по масо-габаритним параметрам.

Друга частина монографії присвячена проблемам переміщення, орієнтації та навігації наземних роботизованих комплексів. Запропоновано методи математичного опису детермінованих плавно та різко змінних нерівностей дорожнього полотна по якому переміщуються наземні роботизовані комплекси. Методи враховують особливості стохастичних змін нерівностей дорожнього полотна і умови бездоріжжя. Встановлені закономірності дії двох сусідніх колій на переміщення наземного роботизованого комплексу, вплив нерівностей дороги на платформу та маніпулятор мобільного робота. Наведені результати досліджень змін положення шасі при різко-змінній просадці ґрунту, ударних та вібраційних навантаженнях. Запропоновані заходи по підвищенню точності позиціонування та стабільності положення шасі наземного роботизованого комплексу на основі інноваційних оптичних методів точної орієнтації шасі із застосуванням спеціально розроблених оптичних пристроїв.

Розглянуті задачі навігації, орієнтації та керування наземних роботизованих комплексів, які вирішуються із застосування штучного інтелекту. Викладені принципи побудови штучних нейронних мереж. Описані окремі штучні нейронні мережі, які застосовуються в системах керування наземними роботизованими комплексами. Дано огляд принципів побудови систем зв'язку, керування та моніторингу функціонування наземних роботизованих комплексів.

В третій частині наведено спеціальну методологію на основі розвитку теорії гвинтів, яка використана для визначення характеристик наземних роботизованих комплексів. Введені математичні об'єкти відповідні нормалізованим гвинтам, які описують параметри наземних роботизованих комплексів. З використанням методів

гвинтового числення визначена геометрія та кінематика маніпуляторів із розімкненими кінематичними ланцюгами. Розроблено алгоритмічне забезпечення та проведено математичне моделювання важільного маніпулятора планарного виду. Запропоновані методи дослідження точності маніпуляторів, зокрема, визначення випадкових похибок позиціонування виконавчого органу маніпулятора по одній, двох та шести координатах. Проведено визначення кінематичних характеристик маніпулятора відповідно апарату гвинтового числення. Встановлені особливості статичних характеристик наземних роботизованих комплексів. Визначено статичні навантаження обумовлені переміщення шасі наземних роботизованих комплексів та досліджено статичну стійкість наземних роботизованих комплексів. Розроблені методи аналізу процесів деформування просторових пружних систем роботів із визначенням їх матриць жорсткості та деформативності. Досліджено гістерезисні властивості роботів, обумовлені нелінійностями характеристик їх основних вузлів. Значну увагу приділено наземним роботизованим комплексам з паралельними кінематичними зв'язками. Викладені методи їх теоретичних і експериментальних досліджень та методики математичного моделювання. Досліджені динамічні характеристики наземних роботизованих комплексів. Зокрема, проведено математичне моделювання сферичних рухів у просторових динамічних системах маніпуляторів та моделювання динаміки маніпуляторів з використанням кусково-постійних ортогональних функцій та теорії нечітких множин

В четвертій частині викладені елементи теорії проектування наземних роботизованих комплексів. Запропонована концепція теорії проектування наземних роботизованих комплексів, розроблено загальні принципи, алгоритми і методи проектування їх основних вузлів. Наведена методика вибору схемних і конструктивних рішень наземних роботизованих комплексів. Розглянуто як традиційні, так і інноваційні схемні рішення маніпуляторів наземних роботизованих комплексів. Зокрема, запропонована компоновка, вузли і деталі маніпулятора наземного роботизованого комплексу виготовленого із композитних матеріалів. Узагальнено досвід проектування, виготовлення та апробації експериментальних зразків наземних роботизованих комплексів різного виду. Надані рекомендації для проектування ходової частини наземного роботизованого комплексу та гусеничного рушія.

Монографія є першою в Україні науковою працею, що містить теоретичні основи розроблення, методи розрахунку та математичного моделювання, а також методики експериментальних досліджень та випробування наземних роботизованих комплексів.

Монографія орієнтована на фахівців, які займаються питаннями розроблення промислових та мобільних роботів, зокрема наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. Монографія буде корисною для студентів та аспірантів закладів вищої освіти.



## **Частина I**

# **Особливості конструкції та технічні характеристики наземних роботизованих комплексів**

## **РОЗДІЛ 1**

### **Мобільні наземні роботизовані комплекси відомі в світовій практиці**

#### **1.1. Загальна характеристика наземних роботизованих комплексів та напрямки їх інноваційного розвитку**

Наземні роботизовані комплекси являють собою спеціальні функціонально орієнтовані системи, основою яких є промисловий робот або маніпулятор.

Наземні роботизовані комплекси розділяються на стаціонарні та мобільні. Стаціонарні комплекси включають один або кілька промислових роботів та інші пристрої необхідні для функціонування комплексу. Наземні роботизовані комплекси мають засіб пересування із відповідними енергетичними установками, рушіями, навігаційними та керуючими системами і оснащені роботами відповідного виду [80].

В залежності від середовища в якому переміщується комплекс, розрізняють наземні роботизовані комплекси, повітряні (безпілотні літальні апарати) та надводні або підводні комплекси.

Наземні роботизовані комплекси являють собою рухому платформу на колісному або гусеничному шасі і робот, маніпулятор чи інший автоматичний пристрій, який забезпечує функціонування комплексу.

Наземні роботизовані комплекси розділяються по ступеню спеціалізації функцій на універсальні, спеціальні та спеціалізовані [96].

Універсальні призначені для виконання різномірних операцій. Кількість виконуваних типів операцій залежить від конструктивного виконання робота і може бути достатньо великою. Спеціальні наземні роботизовані комплекси призначені для виконання однієї операції, яка є чітко визначена. Спеціалізовані наземні роботизовані комплекси орієнтовані на виконання частини одного варіанта операції. Між вказаними групами наземних роботизованих комплексів немає чітких меж. Як правило, комплекси мають змінний ступінь спеціалізації.

Наземні роботизовані комплекси розрізняються на операційні (технологічні) та обслуговуючі (допоміжні). Операційні технологічні комплекси призначені для виконання технологічних операцій. Для стаціонарних наземних роботизованих комплексів це операції зварювання, фарбування, збирання вузлів, а також виконання операцій механообробки, вимірювань та інші.

Наземні роботизовані комплекси застосовуються при виконанні операцій обробки матеріалів. Для цього застосовуються верстати-роботи, що виконуються як в

стаціонарному так і в мобільному варіантах. Мобільне виконання верстатів-роботів є новим напрямком в робототехніці.

Розробка наземних роботизованих комплексів у вигляді верстатів-роботів для високоточної обробки об'єктів у польових умовах має важливе значення для підвищення обороноздатності та національної безпеки держави. Ефективною є побудова таких комплексів у вигляді мобільних верстатів-роботів на основі механізмів паралельної структури.

Верстати-роботи призначені для переміщення, очистки та механічної обробки мін, снарядів, ємностей з токсичними матеріалами, трубопроводів та резервуарів під тиском, зокрема ємностей з пошкодженнями, що супроводжуються витоками рідких і газоподібних речовин та інші. Як правило, об'єкт має забруднення, орієнтований довільним чином і не допускає переміщення.

Робота з небезпечним об'єктом є необхідною для проведення підготовчих операцій по транспортуванню об'єктів, визначенню їх стану та ступеня небезпечності або для знешкодження об'єктів на місці.

Верстат-робот для обробки небезпечних об'єктів радикально змінює організацію та проведення робіт по ліквідації надзвичайних ситуацій, ремонту військової техніки, утилізації вибухонебезпечних об'єктів, токсичних та радіоактивних речовин. Це має важливе значення для організації робіт в надзвичайних ситуаціях.

Верстати-роботи реалізовано на основі механізмів з паралельними кінематичними зв'язками. Вони мають низьку енерго- та матеріалоемність, тому їх можна використати для високоточної обробки об'єктів у польових умовах.

Наземні роботизовані обслуговуючі комплекси призначені для проведення завантажувально-розвантажувальних робіт, транспортування об'єктів, виконання складських операцій та операцій логістики.

Для наземних роботизованих комплексів технологічні операції полягають у виконанні операцій маніпулювання об'єктами, в тому числі небезпечними [22], виконання завдань розвідки, визначення локалізації об'єктів (снайперів), виконання стрілецьких операцій, тощо. Наземні роботизовані комплекси призначені для виконання своїх функцій в заданому місці. Допоміжні операції полягають у транспортуванні об'єктів та проведенні завантажувально-розвантажувальних робіт [19].

Стаціонарні гнучкі наземні роботизовані комплекси мають відповідний склад і структуру. Вони є основою гнучкого автоматизованого виробництва. Воно включає автоматизовані дільниці та автоматизовану систему керування технологічним процесом. Гнучкі автоматизовані виробництва об'єднують технологічне обладнання: металорізальні верстати, промислові роботи та інше обладнання та транспортно-складальну систему. Дана система забезпечує подачу та приймання заготовок, готових деталей, інструменту, контрольно-вимірювальних засобів та інше. Керування гнучким автоматизованим виробництвом здійснює автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП).

Гнучке автоматизоване виробництво має різні види. Це зокрема, механічна обробка матеріалів, інженерно-фізичні методи обробки з використанням

інтегрованих технологій машинобудування, а також ливарне, ковальсько-пресове та зварювальне виробництво.

Наземні роботизовані комплекси розрізняються по виду шасі на гусеничні та колісні. Застосовуються різні конструктивні виконання робочих органів комплексів. Роботизований комплекс із маніпулятором являє собою робочу машину призначену для виконання певних функцій. Наземні роботизовані комплекси оснащені системами штучного зору, мають систему навігації та зв'язку. Вони призначені для виконання функцій транспортування, спостереження за об'єктами, діагностування їх стану та необхідної обробки об'єктів, зокрема: очищення, виміри, механічна та інженерно-фізична обробка. Комплекси оснащені системами штучного інтелекту і забезпечують автоматичну навігацію. При цьому здійснюється прив'язка до місцевості, визначення координат і положення комплексу. Автоматична навігація дає можливість реалізувати рух комплексу за рухомим об'єктом, рух комплексу в колоні, рух за заданим маршрутом і автоматичне повернення назад.

Як правило, наземні роботизовані комплекси призначені для роботи з небезпечними об'єктами. Вони розробляються як військові системи або системи подвійного призначення.

На державному рівні розробкою і практичним використанням військових роботів займаються в США, Франції, Великобританії, Японії і Росії[1,14].

Відомі американські військові роботи сімейства PackBot. Вони застосовуються для розмінування, а також роботи TAGS і RedOwl. У Ізраїлі, Великобританії і Німеччині розроблені і знайшли військове застосування рухомі гусеничні роботи для розвідки, розмінування та знищення вибухових пристроїв різного типу.

Армія США під час бойових дій і поліцейських операцій в Іраку з успіхом використовувала озброєні вогнепальною зброєю малогабаритні гусеничні роботи в наступальних і розвідувальних операціях. Загальна кількість військових роботів, використаних армією США в Іраку досягала кількох тисяч одиниць.

Роботи спеціального призначення застосовуються як основний компонент комплексних систем постійного моніторингу, охорони (захисту) державних кордонів та спеціалізованих стратегічних об'єктів державної важливості. До таких об'єктів віднесені збройові арсенали, склади боєприпасів, військові бази, військові і цивільні аеродроми, підприємства атомної промисловості і атомні електростанції, висотні дамби ГЕС і ряд інших споруд подібного роду [102].

Роботи можуть бути використані для моніторингу і забезпечення охорони (захисту) державних кордонів, організації охоронного і захисного забезпечення, нормального функціонування особливо важливих державних стратегічних об'єктів. Фактично бойова робототехнічна машина призначена для виконання завдань, які поставлені перед автономними підрозділами охорони (захисту) у вигляді мобільних дозорів і груп. До таких завдань, зокрема, можуть бути віднесені:

- скритне механізоване захищене переміщення розвідувального устаткування і засобів поразки об'єктів, визначених засобами розвідки;
- автоматичне сповіщення операторів, які керують вказаними бойовими робототехнічними машинами, про наявність неприпустимих відхилень радіаційних,

хімічних і температурних параметрів навколишнього оточення від заданих нормальних значень;

- механізоване захищене переміщення бійців, озброєння, боєприпасів, спорядження, продовольства і іншого майна, необхідного для забезпечення дій військових підрозділів по постійному моніторингу, охороні (захисту) важливих об'єктів.

Класифікація здійснена згідно функціонального призначення робота. Основними тенденціями розвитку військової робототехніки є: інтелектуалізація керуючих систем; групове застосування роботів; мікромініатюризація компонентів роботизованих комплексів; інтеграція підсистем; ієрархічна схема побудови систем керування і евоційність.

В даний час розроблено значну кількість зразків наземних роботизованих комплексів військового призначення[97]. В основному вони поділяються на дві групи: бойові та інженерно-технічні. Інженерно-технічні наземні роботизовані комплекси спеціального призначення оснащені маніпуляторами і можуть виконувати різноманітні операції. Бойові комплекси мають стрілецьке або ракетне озброєння та відповідне забезпечення [96].

Бойова робототехнічна машина, за своєю суттю повинна конструктивно бути малорозмірним легко маскованим, малопомітним рухомих наземним об'єктом. Робот може мати малогабаритне виконання. В цьому випадку відповідним чином виявляються зменшеними діаметри ведучих коліс його автономних транспортних функціональних блоків-модулів, внаслідок чого забезпечення прохідності, надійності і точності його руху по пересіченій місцевості стає проблематичним.

В даний час наявна значна кількість патентно-інформаційних матеріалів в напрямку розроблення наземних роботизованих комплексів. Для узагальнення матеріалів проведено аналіз результатів патентних джерел в області безекіпажної рухомої наземної військової техніки, зокрема мобільних роботизованих комплексів. Аналіз виконано з метою прогнозування напрямків інноваційного розвитку наземних роботизованих комплексів для потреб Збройних Сил України. Аналіз ґрунтується на виконаних патентно-інформаційних дослідженнях. Він включає розробку класифікаційних ознак та методів аналізу інноваційних рішень в галузі наземних роботизованих комплексів військового призначення.

В даний час в технічно розвинутих країнах широко ведуться дослідження по створенню наземних роботизованих комплексів спеціального призначення . Розроблена і використовується значна кількість наземних роботизованих комплексів, які призначені для роботи з небезпечними об'єктами. Одним із основних вузлів наземного роботизованого комплексу є маніпулятор . Маніпулятори наземних роботизованих комплексів суттєво відрізняються від маніпуляторів, що працюють в стаціонарних умовах. Основними відмінностями маніпуляторів наземних роботизованих комплексів є мінімальна маса, порівняно низька точність позиціонування, обмежена швидкодія, мінімізовані показники енергоспоживання та ряд інших параметрів . Маніпулятори наземних роботизованих комплексів розташовані на рухомому шасі, тому на них діють значні динамічні навантаження.

Висуваються особливі вимоги до захисту від метеорологічних факторів та захисту від різноманітних впливів зовнішнього середовища, зокрема обумовлених наявністю небезпечних об'єктів.

В літературних джерелах наведені узагальнюючі характеристики ряду наземних роботизованих комплексів.

В статті [96] наведено загальний огляд стану розроблення наземних робототехнічних комплексів. Основну увагу приділено комплексам важкого та середнього класів. Наведено технічні характеристики систем важкого класу (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Основні ТТХ закордонних НРК важкого класу

|                                          |                                                                                       |                                                                                    |                                                                      |                                                                 |                                                                                   |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Назва НРК, країна розробник              | Black Knight, США і Великобританія                                                    | XM1219 (ARV-AL MULE) США                                                           | Guardium MK 3, (G-NIUS), Ізраїль                                     | «Вихрь», РФ                                                     | «Уран-9», РФ                                                                      |
| Основне призначення                      | бойовий                                                                               | бойовий, штурмовий                                                                 | бойовий, розвідувальний                                              | ударно-бойовий                                                  | ударно-бойовий                                                                    |
| Спосіб управління                        | напівавтономне радіокомандне                                                          | напівавтономне радіокомандне                                                       | напівавтономне автономне                                             | дистанційно керований                                           | дистанційно керований                                                             |
| Базове шасі                              | гусеничне, БМП М2 Bradley                                                             | колісна платформа 6x6                                                              | колісне (Ford F-350 SandCat) 4x4                                     | гусеничне, БМП-3                                                | гусеничне, (вузли БМП)                                                            |
| Вага, т                                  | 9,5                                                                                   | 3,5                                                                                | 3,8                                                                  | 15,0                                                            | до 12,0                                                                           |
| Тип силової установки                    | дизельний Caterpillar                                                                 | дизельний (Centurion)                                                              | дизельний                                                            | дизельний УТД-29                                                | дизельний (ЯМЗ335347)                                                             |
| Швидкість, км/год                        | 77                                                                                    | 40                                                                                 | 120                                                                  | 60                                                              | до 35                                                                             |
| Запас ходу, км                           | 250                                                                                   | 100                                                                                | 250                                                                  | 600                                                             | 200                                                                               |
| Склад озброєння, спеціального обладнання | автоматична гармата 25 мм (30 мм) зі спареним кулеметом 7,62 мм, комплекс ОЕ розвідки | кулемет 7,62 мм, 25 мм автоматичний гранатомет, ПТРК Javelin, комплекс ОЕ розвідки | дистанційно керована турель з 12,7 мм кулеметом або 40 мм гранатомет | ДКБМ: 30 мм авт.гармата, 7,62 мм кулемет, ПКТМ, ПТРК «Корнет-М» | ДКБМ: 4 од., ПТРК 9М120 «Атака», 4 од. ЗРК 9М342 «Игла-С», 30 мм авт.гармата 2А72 |

Як правило, наземні роботизовані комплекси важкого класу мають ударно-бойове призначення і оснащені артилерійським озброєнням калібром до 30 мм.

Наземні роботизовані комплекси еквівалентні безекіпажним броньованим автомобілям. Як правило, вони використовують базове колісне або гусеничне шасі наявних броньованих автомобілів. Комплекси оснащені потужною системою керування та захищеними каналами зв'язку. Наявне кулеметне або артилерійське озброєння. Використовуються гранатомети.

Наземні роботизовані комплекси середнього класу мають масу 800...2000 кг (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

**Основні тактико-технологічні характеристики закордонних НРК  
середнього класу**

|                              |                                                                                                               |                                                                                       |                                                                               |                                                                                                   |                                                                                |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Назва НРК, країна розробник  | SMSS, Lockheed Martin, США                                                                                    | Protector, HDT Robotics, США                                                          | MAAD, Northrop Grumman, США                                                   | AvantGuard MK1, (G-NIUS) Ізраїль                                                                  | «Платформа-М» РФ                                                               |
| Основне призначення          | транспортний, бойовий                                                                                         | інженерний, бойовий                                                                   | транспортний                                                                  | інженерний, бойовий                                                                               | бойовий                                                                        |
| Спосіб управління шасі       | ручне з борту машини, дистанційне, напівавтономне                                                             | дистанційне або автономне (слідкування за лідером)                                    | дистанційне по радіоканалу, автономне                                         | дистанційне, напівавтономне                                                                       | дистанційне                                                                    |
| Шасі                         | 6-ти колісне                                                                                                  | гусеничне                                                                             | 6-ти колісне                                                                  | 4-гусеничне всюдихода TAGS                                                                        | гусеничне                                                                      |
| Вага, кг                     | 1810                                                                                                          | 1400                                                                                  | 1500                                                                          | 2834                                                                                              | 800                                                                            |
| Силова установка, потужність | дизельна, 80 к.с.                                                                                             | дизельна з турбонаддувом, 32 к.с.                                                     | гібридна                                                                      | турбодизель Kubota, 100 к.с.                                                                      | акумуляторні батареї                                                           |
| Вантажопідйомність, кг       | 450-680                                                                                                       | 340 та причіп до 227 кг                                                               | 340                                                                           | 1088 кг                                                                                           | 250                                                                            |
| Швидкість руху               | 40 км/год                                                                                                     | 8 км/год                                                                              | 5-11,3 км/год                                                                 | 20 км/год                                                                                         | 12 км/год                                                                      |
| Запас ходу                   | 80 км (160 км – по шосе)                                                                                      | 100 км (72 год)                                                                       | 36 год                                                                        | 250 км                                                                                            | не менше 10 год                                                                |
| Озброєння                    | ДКБМ з 12,7 мм кулемет, 40 мм гранатомет, ПУ ПТРК Javelin                                                     | ДКБМ кругового оберту CROWS M-153 5,56 мм або 7,62 мм кулеметом                       | ДКБМ CROWS з 12,7 (7,62 мм) кулеметом, 40 мм гранатомет або 30 мм авт.гармата | ДКБМ з 12,7 мм кулеметом                                                                          | ДКБМ з 7,62 мм кулеметом ПКТ або «Печенег» (400) та 3 РПГ-26                   |
| Спеціальне обладнання        | місця для перевезення військових, майна та боєприпасів. Комплекс датчиків на висувній телескопічній платформі | мінний трал шириною 60 см, ківш для ескаваторних робіт або підйомник, а також ПУ БПЛА | вантажна платформа                                                            | засоби розвідки (тепловізор, радар, лазерний далекомір) та РЕБ, а також мінні трали та міношукачі | Прилади спостереження та прицілювання, РЛС, тепловізор, далекомір, мінний трал |

В Україні розроблені лише окремі експериментальні зразки наземних роботизованих комплексів (табл. 1.3).

Дані розробки проведені в ініціативному порядку. В цілому розроблені зразки відповідають встановленим вимогам [96, 97]. Серійне виробництво наземних роботизованих комплексів потребує значних зусиль та витрат.

Таблиця 1.3

Основні вітчизняні макетні зразки НРК

| Тип шасі, силової установки                                                                  | Призначення, основні характеристики, заявлені розробниками, склад озброєння та спеціального обладнання                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Колісне шасі квадрациклу 4х4, незалежна підвіска, бензиновий двигун                          | Розвідувально-бойовий НРК середнього класу. Вага 400 кг, вантажопідйомність 300 кг, час роботи від двигуна 8 год (в черговому режимі 24 год), кліренс 22 см. Керування жестами, голосом, тросом та з пульта. Режим «слідуй за мною». Можливість автономного руху по заданим координатам, розпізнавання дорожньої інфраструктури, розпізнавання об'єктів та автосупроводу цілей. Розроблений діючий «автопілот» для роботизації автомобільної техніки [7].                                                                         |
| Гусеничне, 2 електродвигуни по 5 кВт на кожну гусеницю                                       | Розвідувально-бойовий НРК легкого класу. Вага (без озброєння) 200 кг, вантажопідйомність 200 кг, запас ходу 30 км, максимальна швидкість 40км/год, кліренс 14 см. Керування жестами, голосом та з пульта. Режим «слідуй за мною», дистанційного та автономного керування. Бойовий модуль (кулемет ПКМ 7,62 мм, ПТУР або гранатомет УАГ-40) тепловізор, дальномір, засоби автоматичного розпізнавання об'єктів та автосупроводу цілей [7].                                                                                         |
| Колісне 6х6, з електроприводом на кожне колесо                                               | Багатофункціональна розвідувальна платформа (БРП) для розвідувального і діагностичного забезпечення підрозділів, евакуації поранених. Вага 600 кг, вантажопідйомність 200 кг, час роботи (переміщення) від АКБ 2-12 год (в режимі очікування 72 год), кут підйому 30 градус, кліренс 27 см, максимальна швидкість 7 км/год. На модифікації бойового РСВК-МЗ встановлений бойовий модуль (кулемет НСВТ 12,7 мм), спеціальне обладнання (розвідувальне, розмінування), засоби автоматичного виявлення і розпізнавання об'єктів [8]. |
| Колісне 4х4 з поворотним механізмом, гібридний двигун 50 к.с., електропривід на кожне колесо | Розвідувально-бойова платформа середнього класу. Вага 1500 кг, вантажопідйомність 350 кг. На ДКБМ встановлено кулемет 7,62 мм, максимальна швидкість 20 км/год, час роботи від генератора 11 год, від АКБ 2 год, кліренс 40 см, тягове зусилля 1000 кг. Створений також колісний транспортний НРК «Hound», що діє сумісно з БПЛА.                                                                                                                                                                                                 |
| Колісне 6х6, незалежна підвіска, гібридний двигун 30 кВт                                     | Бойовий НРК середнього класу. Вага 650 кг, вантажопідйомність 350 кг, максимальна швидкість 38 км/год, запас ходу до 20 км. Бойовий модуль з 7,62 кулеметом, 4 ПТУР, денна та нічна камери спостереження. Розроблений в 2017 р., представлений на закордонних виставках озброєння, декілька зразків реалізовано закордонним споживачам. Модифікація «Фантом-2» 8х8 з можливістю встановлення більш потужного озброєння. Розроблений підприємствами ДК «Укроборонпром».                                                            |
| Колісне 4х4, повнопривідне, електропривід (додатково бензиновий генератор)                   | Спеціалізована модульна транспортна платформа середнього класу (з позитивною плавучістю) для доставки вантажів, спорядження та боеприпасів, евакуації поранених, супроводження тактичних груп військовослужбовців. Вага 400 кг, вантажопідйомність 500 кг, запас ходу до 30 км, максимальна швидкість 12 км/год. Керується мініатюрним пультом з руки оператора, може діяти сумісно з БПЛА [8].                                                                                                                                   |

Високі вимоги до технічних характеристик маніпуляторів наземних роботизованих комплексів утруднюють розроблення ефективних конструкцій маніпуляторів. Розроблені в даний час зразки мають суттєві недоліки. Відсутня загальна теорія проектування маніпуляторів наземних роботизованих комплексів. В інформаційних джерелах недостатньо даних для створення прогресивних технологічних рішень маніпуляторів. Однією із причин цього є закритість інформації

в даному напрямку . Наведені в літературних джерелах розробки розглядаються описово, без деталізації технічних питань . Це обумовлює специфіку інформаційних досліджень по напрямку проектування маніпуляторів наземних роботизованих комплексів. В процесі виконання робіт розглянуті узагальнюючі матеріали по наземним роботизованим комплексам спеціального призначення. Дано порівняння окремих розробок та застосовані елементи класифікації. Виконано аналіз окремих розробок та їх вузлів із визначенням їх ефективності. Встановлені світові тенденції розроблення наземних роботизованих комплексів та стан робіт у даному напрямку в Україні [89].

Інформаційні дослідження в основному виконані на основі літературних джерел та інформації в мережі Internet. Одержані результати досліджень доповнені вивченням імпорتنих зразків наземних роботизованих комплексів, які використовуються в Україні та інформацією одержаних в польових умовах при натурному дослідженні вказаних імпорتنих зразків наземних роботизованих комплексів.

Розроблення вказаних наземних роботизованих комплексів ведуться в ініціативному порядку. Слід відзначити відсутність оперативно-технічних вимог та технічних завдань затверджених на рівні Міністерства оборони.

Вказано на найбільш важливі завдання для наземних роботизованих комплексів середнього класу: спостереження і розвідка, розмінування об'єктів. Створення роботизованих комплексів спеціального призначення пов'язано із необхідністю розробки критичних систем, зокрема дистанційно керованих автономних маніпуляторів для роботи з небезпечними об'єктами та засобів розвідки (спостереження) та ураження.

В технологіях короткострокового планування, зокрема передбачено «розроблення методів і апаратури, визначення геометрії та прохідності ґрунту, яка відповідає вимогам автономного руху наземного роботизованого комплексу». Також заплановано «розроблення високошвидкісних та точних маніпуляторів, які виконують операції на рівні людини».

Вказано на актуальність розроблення системи дистанційного керування маніпуляторів для мінування та розмінування, виконання спеціальних завдань.

Розмінування є однією з найбільш небезпечних операцій. Операції мінування і розмінування в режимі дистанційного керування потребують високоточних механізмів маніпуляторів з багатьма ступенями свободи переміщень, математичних алгоритмів керування як окремими операціями маніпуляторів, так і процесом автоматизованого розмінування. Виходячи з цього основними критичними технологіями створення систем дистанційно керованих та автономних маніпуляторів короткотермінового горизонту є: розробка математичних моделей маніпуляторів, як систем з багатьма ступенями свободи переміщень; розробка малогабаритних високоточних шарнірних з'єднань (з вмонтованими в них електроприводом) та технологій їх виготовлення; розробка алгоритмів та апаратно-програмних засобів для забезпечення роботи дистанційного керування маніпулятором.



Наведене вище узагальнення наявних наземних роботизованих комплексів підтверджує актуальність розробок даного виду.

Наведені вище вітчизняні зразки наземних роботизованих комплексів розроблені в ініціативному порядку та мають незадовільні характеристики. Більш ефективними є подібні роботизовані платформи, розроблені за кордоном. По масогабаритним параметрам вони відповідають розглянутим раніше зразкам. Типовими є чотириколісні платформи стабілізованою рухомою баштою для встановлення зброї (рис. 1.1).



*Рис. 1.1. Роботизована платформа лінійки SHARPCLAW-2*

Наземний роботизований комплекс має розвинену систему спостереження та наведення, оснащений ефективною системою керування. Маніпуляційний пристрій призначений для точного позиціонування зброї.

Наявна значна кількість наземних роботизованих платформ такого виду (рис. 1.2).



*Рис.1.2. Типові представники наземних роботизованих платформ, які використовуються для розміщення маніпуляторів наземних роботизованих комплексів*

Платформи мають змінні пристрої, які виконують різноманітні функції. В ряді випадків в якості рушіїв застосовуються гусеничні або комбіновані пристрої ходової частини (рис. 1.3).



*Рис. 1.3. Наземна роботизована платформа із гібридним колісно-гусеничним рушієм*

Як правило, наземна роботизована платформа являє собою універсальний модуль із колісним чи гусеничним рушієм (рис. 1.4).



*Рис. 1.4. Універсальна роботизована платформа Jaguar 4x4 Wheeled Robotic Platform Chassis*

Платформа має стандартні з'єднання для встановлення необхідного обладнання, зокрема маніпуляторів різного виду.

Шасі, як правило, має високу прохідність. Застосовується легке бронювання відповідно функціонального призначення робота (рис. 1.5).



*Рис. 1.5. Безпілотна наземна роботизована платформа THeMIS*

Дана безпілотна платформа оснащена бойовим модулем із відповідними сервісними системами та боекомплексом.

Вказані особливості компоновки шасі і маніпуляційних систем характерні для спеціалізованих бойових роботів, оснащених озброєнням.

Для військових роботів основна характеристика маніпуляційної системи включає параметри точності позиціонування та стабільності положення маніпулятора при дії імпульсних навантажень. Дана характеристика забезпечується, зокрема, розвинутою системою спостереження та оптичними пристроями ідентифікації цілі та наведення зброї. Як правило, застосовуються стереоскопічні оптичні (лазерні) пристрої із спеціальними пристроями переміщення (рис. 1.6).



*Рис. 1.6. Роботизований комплекс AVANTGUARD MKIII оснащений стереоскопічною оптичною системою*

Пристрої маніпулювання оптичними системами мають ряд особливостей у порівнянні із маніпуляторами, які виконують операції переносу об'єктів. Точність позиціонування оптичних пристроїв є високою. Високі вимоги висуваються до плавності роботи таких пристроїв та стабільності їх позиції.

Наведені вище наземні роботизовані комплекси мають пристрої маніпулювання, які виконують функції сервісних систем. Масогабаритні характеристики даних пристроїв є незначними у порівнянні із масою і габаритами комплексу в цілому.

Розроблено принципи класифікації та систематизації ознак об'єктів інтелектуальної власності в галузі роботизованих комплексів військового призначення. Проведено дослідження окремих класифікаційних груп об'єктів з метою виявлення прогресивних конструктивних ознак наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. На основі проведених досліджень здійснено прогнозування напрямків інноваційного розвитку наземних роботизованих комплексів для Збройних Сил України.

Патентно-інформаційні дослідження виявили ряд характерних конструктивних рішень мобільних роботизованих комплексів військового призначення. Вони розділені на кілька груп: група комплексів на базі колісного шасі (броньованого автомобіля) комплекси на гусеничному ході; комплекси з іншим способом пересування та інші..

В групу комплексів на основі колісного шасі (бронеавтомобіля) входить машина інженерної розвідки і розмінування [42] (рис. 1.7).

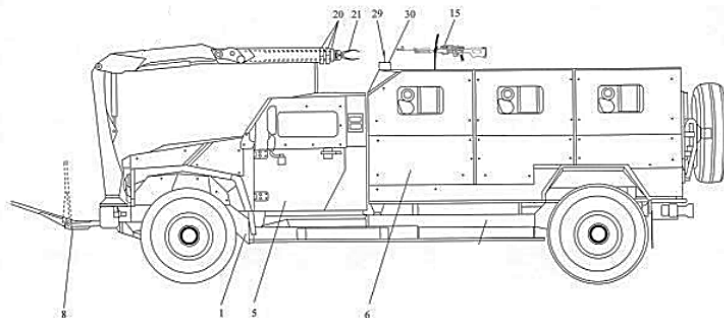


Рис. 1.7. Машина інженерної розвідки і розмінування

Машина включає самохідне шасі, яке має броньовану кабіну, розміщену на рамі. В броньованій кабіні знаходяться відсік особового складу та засоби зв'язку. Машина має броньований кузов-фургон. В передній частині машини знаходиться гідравлічний телескопічний маніпулятор. На ньому розміщено пристрій для пошуку вибухонебезпечних предметів. Передбачена автоматизована система зупинки машини. Наявна телевізійна система пошуку вибухонебезпечних предметів, а також газоаналізаторна система. Машина має можливість постановки радіоелектронних завад та систему навігації. Броньований кузов-фургон розділено на нижню та верхню частини. Нижня частина має два броньованих листа з'єднаних під кутом. Між листами знаходиться кевларова вставка.

Гідравлічний телескопічний захват-маніпулятор змінює свою довжину (рис. 1.8).

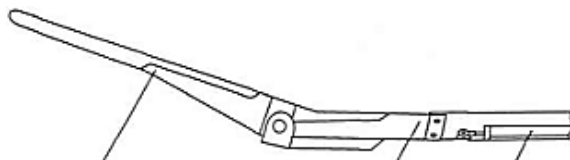


Рис. 1.8. Гідравлічний телескопічний захват-маніпулятор

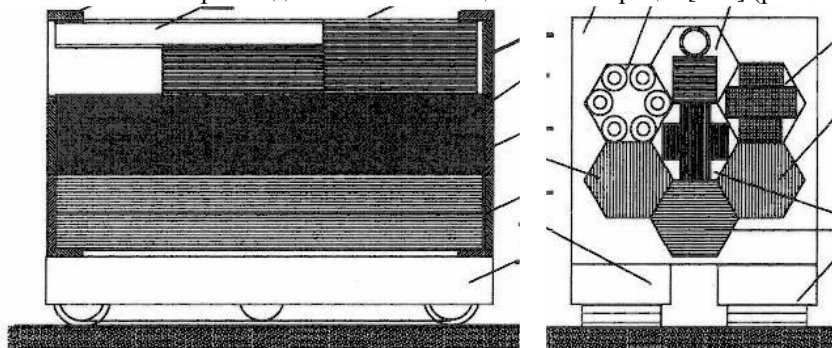
За допомогою маніпулятора, встановлюється необхідний заряд. Підрив встановленого заряду здійснюється дистанційно.

Робочий орган маніпулятора має пристрій захвату предметів. Пристрій для знаходження вибухонебезпечних предметів має чутливий елемент, спеціальну раму та гідравлічний привід. Система пошуку вибухонебезпечних предметів має спеціальну відеокамеру із системою спостереження.

Газоаналізаторна система включає випаровуючу камеру та блок, аналізатор. В машині наявний антенний пристрій, блок завад та система телекерування. Кузов-фургон, маніпулятор та пошуковий пристрій розташовано на рамі. Там же розміщено відеокамеру. Випаровуючу камеру розміщено на гідравлічному маніпуляторі. Фургон має захисні решітки на броньованому кузові та кабіні. Наявна автоматизована

система зупинки машини. Машина інженерної розвідки керується екіпажем. При відповідному доопрацюванні можлива автономна робота машини.

Наступний пристрій є автономним і являє собою модульно-структурований військовий наземний робот для бойових і спеціальних операцій [44 ] (рис. 1.9).



*Рис. 1.9. Модульний наземний військовий робот*

Роботизований комплекс включає розміщені в корпусі електрохімічні, конденсаторні або комбіновані джерела електричної енергії, її перетворювачі, електромеханічні колісні, гусеничні або колісно-гусеничні рушії, комплекси датчиків системи тягового електроприводу, пристрої аналізу зовнішньої обстановки і діагностики, а також комплект виконавчих механізмів. В якості виконавчих механізмів використовуються маніпулятори, системи озброєння і самоліквідації. Елементарний корпусний конструктив робота виконаний у вигляді набору з семи повністю ідентичних коробчастих корпусів простої геометричної форми, в яких знаходяться функціональні блоки-модулі. Шість блоків розміщені симетрично зовні на поверхні центрального коробчастого корпусу. Модулі жорстко об'єднані розміщеними в торцевих областях монтажними шайбами з центральними шестипелюстковими отворами для забезпечення входження в них зовнішніх поверхонь шести зовнішніх коробчастих корпусів. При цьому корпуси блоків модулів електромеханічних рушіїв робота жорстко закріплені на зовнішніх поверхнях монтажних шайб.

Модульний робот має кілька модифікацій [43] . Вони відрізняються виконанням корпусів модулів та монтажних шайб. Корпуси виконуються круглими або шестиграними.

Модульні конструкції роботизованих комплексів є раціональним схемним рішенням. В якості модулів використовуються окремі елементи чи вузли роботів. Ступінь укрупнення модуля визначається задачами, які виконує наземний роботизований комплекс. Однією із переваг модульних конструкцій є можливість зберігання модулів у захищеному контейнері. Це особливо важливо при транспортуванні комплексів або при необхідності довготривалого зберігання у польових умовах.

Однією із модифікацій є робот, що складається з двох елементарних корпусних агрегатів-конструктивів, розміщених по подовжній осі (рис. 1.10).

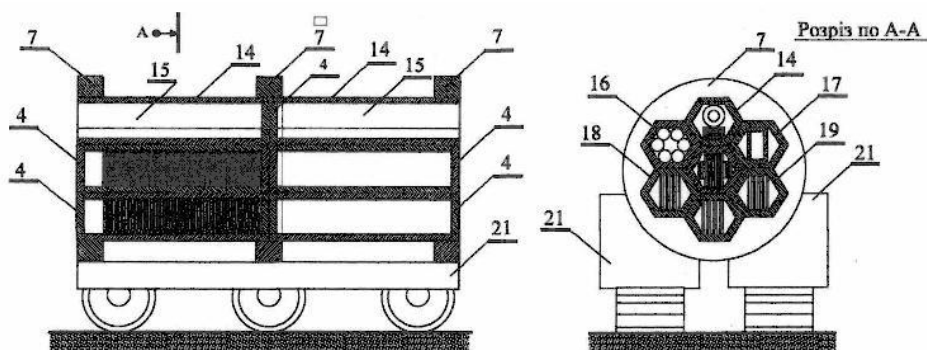


Рис. 1.10. Схема наземного військового робота з двома подовжно розміщеними агрегатами-конструктивами

Модульне виконання є прогресивним технічним рішенням. Види модулів є різноплановими.

В джерелі [42] запропонована наземна допоміжна бойова робототехнічна машина модульного типу для супроводження бронетанкового озброєння і техніки (рис. 1.11).

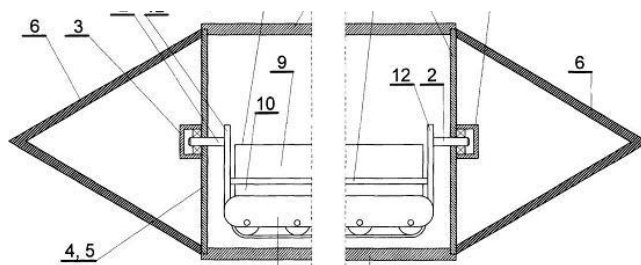


Рис. 1.11. Схема корпусу-контейнера, в якому розміщено роботизований комплекс

Робот є конструктивною структурою модульного типу і розміщений на опорах кочення або ковзання в герметичному циліндровому корпусі-контейнері, закритому з обох боків конусоподібними кришками. Центр мас роботизованого комплексу знаходиться нижче за центральну подовжню вісь корпусу-контейнера. Це забезпечує створення крутного моменту, що повертає комплекс в крайнє нижнє положення для подальшого виїзду на ґрунт.

Запропонована конструкція забезпечує швидке і ефективне розгортання комплексу та його перехід із похідного положення в бойове. Окремою проблемою є захист мобільного робота від динамічних ударних навантажень.

Процес скидання контейнера із броньованої машини супроводжується змінами його положення в просторі (рис. 1.12).

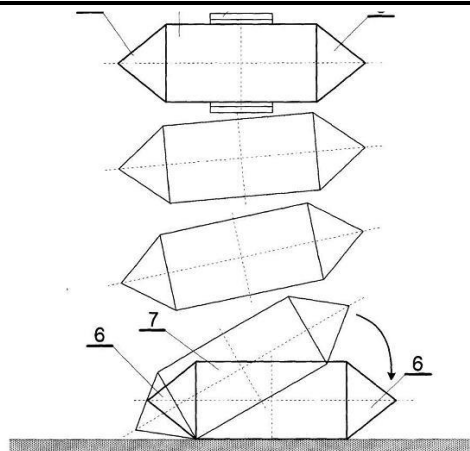


Рис. 1.12. Переміщення контейнера при його скиданні на ґрунт

Для відділення конусоподібних бічних кришок від зовнішнього корпусу використані дистанційно керовані піропатрони. Забезпечено значне підвищення скритності і адаптації до особливостей рельєфу місцевості при проведенні броньованими бойовими машинами бойових і спеціальних операцій. При переміщенні контейнера мають місце поперечні коливання наземного роботизованого комплексу, що знаходиться у контейнері (рис. 1.13).

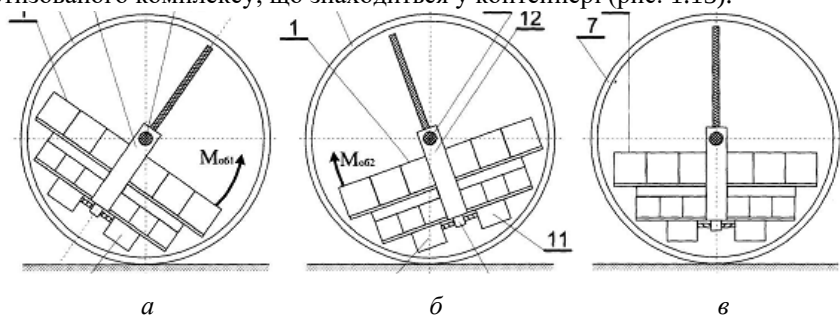


Рис. 1.13. Динамічні переміщення роботизованого комплексу в контейнері (а), (б) та встановлення його в рівноважному стані (в)

В [45] наведено конструкцію бойової модульної наземної робототехнічної машини постійного моніторингу і охорони (захисту) стратегічних об'єктів та кордонів держави. Бойова машина складається з набору функціональних блоків-модулів у вигляді комплексу елементів електроживлення електрохімічного або накопичувального типу, перетворювачів електроенергії, датчиків навколишнього оточення, маніпуляторів, озброєння і боезапасу, закріплених на одному або декількох транспортних блоках-модулях. Блоки-модулі шарнірно зв'язані один з одним. Кожен блок забезпечений комплектом автономних тягових функціональних блоків-модулів з електричним приводом, що включає систему управління тяговими

електродвигунами. На кожному транспортному блоці-модулі закріплено щонайменше дві пари підпружинених горизонтальних опор кочення, опорні колеса яких знаходяться в механічному контакті з вертикальними площинами опорних елементів збірної модульної шляхової структури (рис. 1.14).

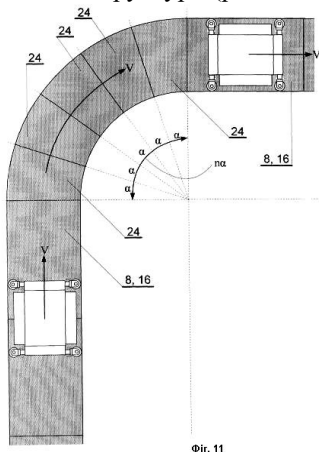
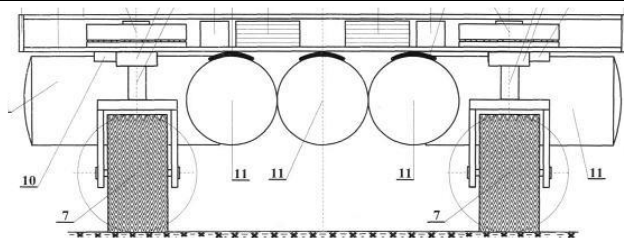


Рис. 1.14. Переміщення транспортного блока-модуля в збірній шляховій структурі

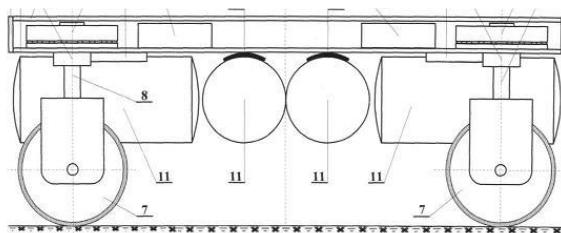
Колеса забезпечують переміщення рухомого блока бойової модульної наземної робототехнічної машини по ділянках її шляхової структури, що мають повороти.

Відоме технічне рішення [46], що визначає наземний касетний контрробот з підіривними елементами ройової протидії. Контрробот є рухомою установкою і складається щонайменше з одного енергетично автономного транспортного блока модуля у вигляді візка-трака. Він має можливість механічного об'єднання за допомогою жорстких або гнучких з'єднань з щонайменше одним подібним візком-траком. Візок має плоску платформу з кронштейнами для кріплення опорних (привідних) коліс і повнопривідним електромеханічним рушієм колісного, гусеничного або комбінованого типу. Рушій має два автономних тягових функціональних блока-модуля. Опорні (привідні) колеса модуля приводяться в дію електроприводом. Плоска платформа візка-трака має захищені внутрішні порожнини, де встановлені джерела електроенергії електрохімічного, накопичувального або комбінованого типів, а також перетворювачі електроенергії для живлення автономних тягових привідних блоків-модулів електромеханічного рушія платформи. Також забезпечується електроживлення привідних електродвигунів бортового електронно-обчислювального устаткування управління і зв'язку, привідних пристроїв і механізмів маніпуляторів, озброєння і допоміжного устаткування, датчиків розвідки і параметрів зовнішньої обстановки. На зовнішній поверхні днища платформи кожного візка-трака встановлені поворотні затискачі для фіксації компактних циліндричних касет, усередині яких з можливістю вільного повороту навколо подовжньої осі розміщені автономні транспортні модулі із закріпленими потужними підіривними боєприпасами (рис. 1.15).





а



б

Рис. 1.15. Візок-трак наземного касетного контрробота з підірвними елементами ройової протидії: а – вид спереду; б – вид збоку

Візок-трак поміщається в касету і фіксується спеціальними пристроями (рис. 1.16).

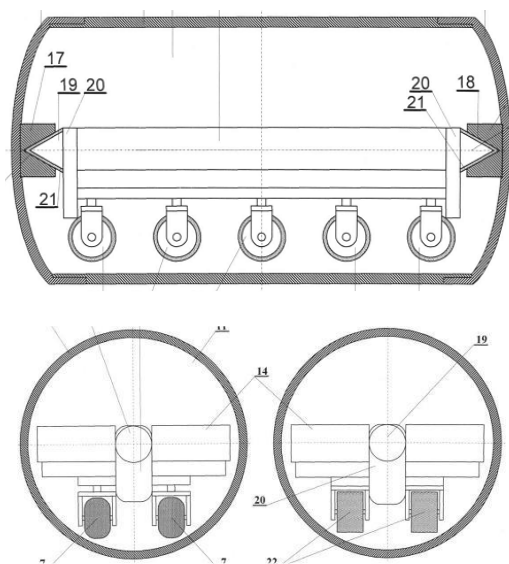


Рис. 1.16. Циліндрична касета у зборі з підірвним боєприпасом на автономному транспортному модулі з колісним рушієм

В [48] описано наземний роботизований комплекс з автономним живленням і системою дистанційного керування, призначений для роботи на закритих від прямого візуального спостереження позиціях на безпечному для людини віддаленні від місця проведення робіт. Комплекс може бути використано для: ліквідації або запобігання техногенних аварій; роботи з вибухонебезпечними предметами та речовинами; проведення хімічних, радіологічних та інших розвідок.

Крім того, комплекс може бути використаний як технологічне обладнання, де за умовами техніки безпеки присутність людини недопустимо, наприклад при підвищеній загазованості, радіації, у ворожому для людини мікробіологічному середовищі і інших подібних умовах.

Комплекс призначений для роботи в екстремальних ситуаціях. Він включає гусеничне шасі з маніпулятором, з блоками управління і енергетичною установкою і пост дистанційного керування.

Комплекс у складеному стані розміщено на гусеничній платформі (рис. 1.17).

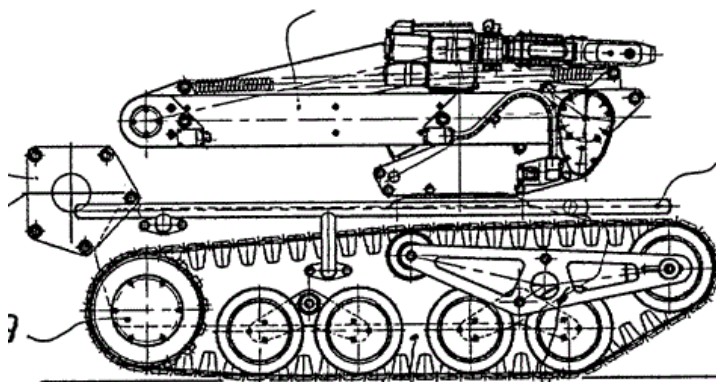


Рис. 1.17. Наземний роботизований комплекс у складеному стані

Гусеничний рушій має диференціальний механізм синхронної зміни величини кліренсу і геометрії гусеничних обводів, що включає в себе два бортових синхронізатора, які встановлені вздовж бортів корпусу гусеничного шасі всередині гусеничних обводів. Борові синхронізатори закріплені шарнірно з можливістю поперечно-кутових переміщень у вертикальній площині з'єднані з корпусом гусеничного шасі. Також комплекс має поперечну траверсу з гумометалевими шарнірами на кінцях, за допомогою яких бортові синхронізатори з'єднані між собою. В комплексі наявний центральний привід поступального руху, шток якого через проміжний важіль з'єднаний з поперечною траверсою, а сам привід з можливістю руху у вертикальній площині шарнірно з'єднаний з корпусом гусеничного шасі. Кожен бортовий синхронізатор складається з жорсткої просторової рами, що включає в себе паралельні рами, які з'єднані поперечними стяжками, і встановлені в головній частині просторової рами. На задньому кінці просторової рами знаходиться лінивець, який являє собою блок підтримувальних роликів. Рама в своїй нижній частині має

нерухомо встановлені несе вал і асиметрично щодо осі несучого вала опорну вісь. Консольний кінець валу шарнірно з'єднаний з корпусом гусеничного шасі, а на опорній вісі шарнірно з можливістю поперечно-кутових переміщень у вертикальній площині встановлений кронштейн гусеничної рушії з опорними катками (рис. 1.18).

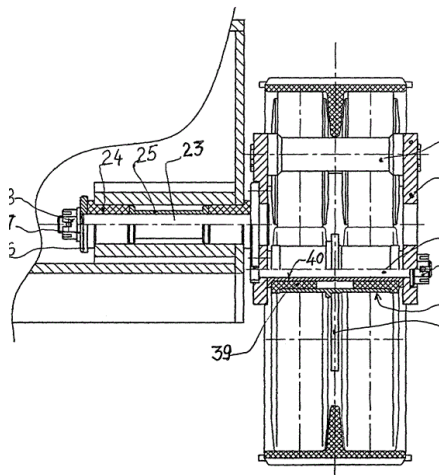


Рис. 1.18. Встановлення опорної вісі в корпусі гусеничного рушія

Конструкція гусеничного рушія забезпечує надійну фіксацію гусениці від зміщення. Робототехнічний комплекс включає засоби зміни конфігурації гусеничних обводів без зміни довжини гусениць. Пристрій зміни конфігурації гусениць (рис. 1.19) має важільну систему встановлену на шасі.

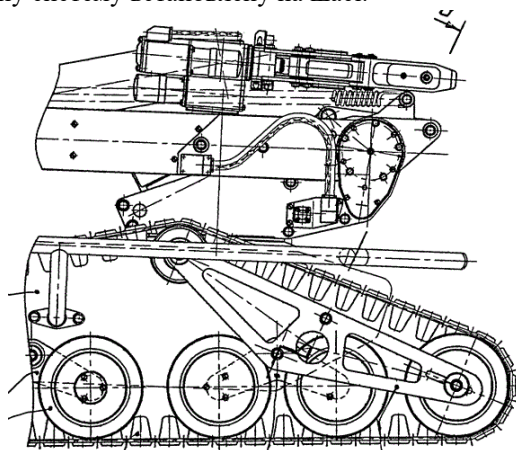


Рис. 1.19. Пристрій зміни конфігурації гусениць робототехнічного комплексу, що забезпечує можливість зміни кута атаки передньої частини гусениці

Зміна конфігурації гусениці дає можливість зміни кліренсу та площі опорної поверхні. При цьому змінюються умови статичної рівноваги комплексу при його переміщенні по нерівній поверхні (схилам, уклону).

Пристрій зміни конфігурації гусениць має лівинці, блоки яких підтримують ролики і кронштейни гусеничних рушіїв встановлені в вертикальних рамах бортових синхронізаторів. При зміні геометрії гусеничних обводів шляхом повороту бортових синхронізаторів у вертикальній площині довжина гусеничних обводів залишається незмінною. Опорні катки гусеничних рушіїв, лівинці і блоки підтримують ролики і постійно перебувають у взаємодії з внутрішніми поверхнями кожного гусеничного обводу, а величина кліренсу змінюється пропорційно куту повороту бортових синхронізаторів за допомогою диференціального механізму. Можливість зміни кутів атаки переднього гусеничного схилу, зміна кліренсу, зміна площі опорної поверхні гусениці та переміщення ребра перекидання при роботі в екстремальних ситуаціях значно збільшує надійність всієї системи, живучість і ймовірність виконання поставленого завдання, а зміна геометрії гусеничних обводів при єдиному замкнутому контурі на відміну від багатогусеничних систем має більш високий ККД і, отже, більш високий запас ходу. Комплекс має в своєму складі маніпулятор, який в процесі роботи постійно змінює момент перекидання, зміщує центр мас, в залежності від вантажу, що піднімається змінює питомий тиск на опорну поверхню, що особливо проявляється при роботі в екстремальних ситуаціях.

При роботі комплексу його виконавчий орган розташовується в різних областях робочого простору (рис. 1.20).

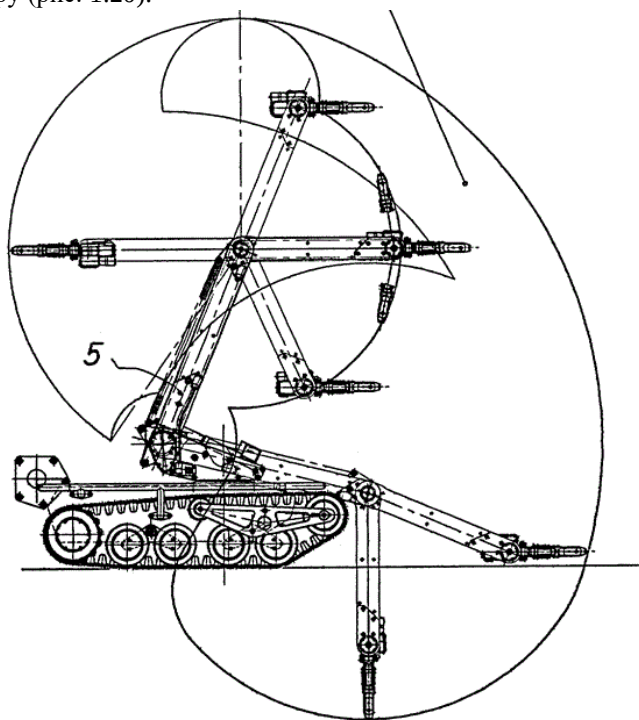


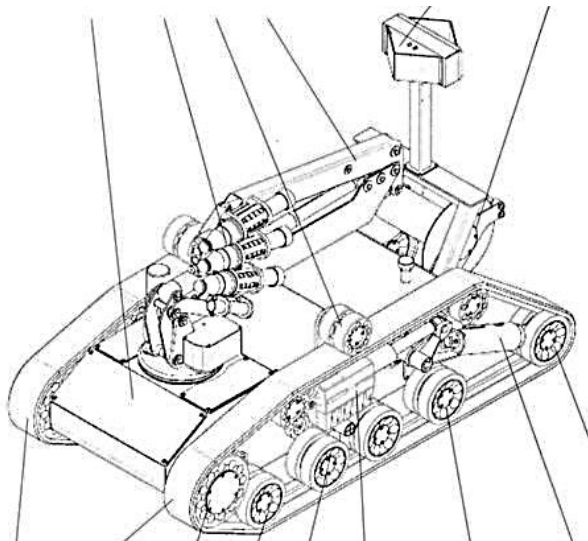
Рис. 1.20. Робочий простір робототехнічного комплексу

Робочий простір розповсюджується на ділянку, що знаходиться нижче рівня

грунту.

Зміна гусеничного обводу часто застосовується у конструкціях наземних роботизованих комплексів.

В [49] описано наземний роботизований комплекс, який має гусеничне шасі із змінюваним гусеничним обводом (рис. 1.21).



*Рис.1.21. Ізометричне зображення наземного роботизованого комплексу*

Комплекс має автономне живлення та систему дистанційного керування. Він призначений для пошуку, евакуації або руйнування підозрілих предметів на місці їх виявлення. Комплекс містить мобільний робот, який складається з маніпулятора з навісним обладнанням, що встановлюються на гусеничному шасі. Шасі включає з'єднаний з ходовою частиною корпус, на який з обох бортів всередині замкнутого гусеничного обводу встановлені приводні мотор-зірочки. Всередині кожного замкнутого гусеничного обводу на корпус і встановлено два опорних повзуні і балансирний візок з катками. По верхньому краю обводу розміщено підтримуючий каток і механізм зміни геометрії гусеничного обводу. Із зовнішнього боку гусеничного обводу на корпусі шасі встановлюють кронштейн з притискним катком, що забезпечує зчеплення гусеничного обводу з приводною мотор-зірочкою. Механізм зміни геометрії гусеничного обводу складається з лінійного приводу з рухомим штоком, сполученим з лінивцем, на одному кінці якого встановлена роликова опора, а на іншому - механізм натягу з опорним катком, які постійно перебувають в контакті з гусеничним обводом. Комплекс має підвищену прохідність і стійкість.

Наведена раніше схема наземного роботизованого комплексу відповідає крайньому нижньому положенню лінивця. При спрацюванні привода лінивець підіймається переходячи у вертикальне положення (рис. 1.22).

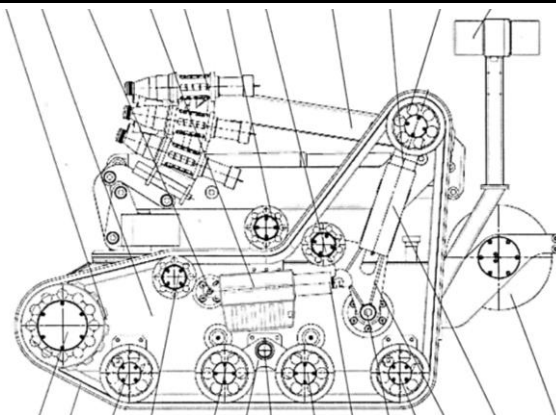


Рис. 1.22. Схематичне зображення комплексу із лівцем у верхньому положенні

Комплекс і пост дистанційного керування містять енергетичні установки, наприклад акумулятори, блоки електроавтоматики і телемеханіки і блоки ЕОМ.

При зміні геометрії гусеничних обводів збільшується опорна і профільна прохідність комплексу (подолання уступів, ухилів і підйомів), а також підвищується поздовжня стійкість комплексу особливо при виконанні вибухотехнічних робіт за допомогою маніпулятора. Зміна геометрії гусеничного обводу дає можливість маневрування комплексу в обмеженому просторі (сходові марші, дверні отвори і т.д.).

Наземні роботизовані комплекси, в яких в якості рушія використовуються гусеничні шасі, мають всі переваги і недоліки, які притаманні на гусеничному ходу.

У [49] описано роботу технічний комплекс для проведення технічної розвідки. Комплекс має гусеничне шасі (рис. 1.23).

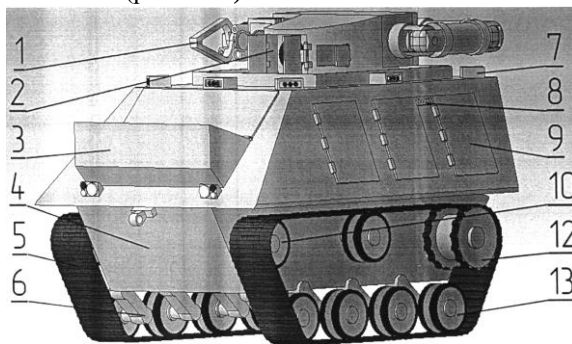


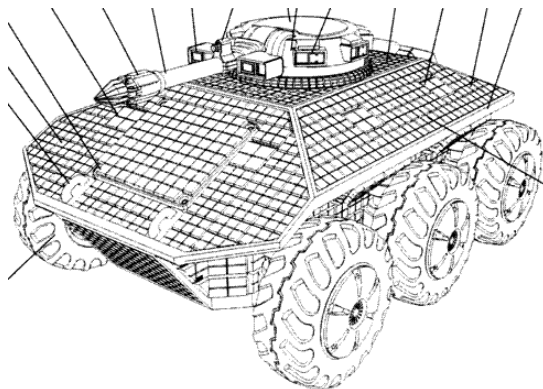
Рис. 1.23. Загальний вигляд комплексу

Комплекс встановлено на чотирьохкатковий борт. Гусеничне шасі містить броньований корпус, який включає паливні баки, дизель-електричний генератор, акумуляторні батареї, електродвигуни, захищений блок управління з програмним забезпеченням, системи кругового огляду і технічного зору, і броньовану башту, що включає квантовий далекомір, відеокамери, активно-пасивний прилад нічного

бачення, інфрачервоний прожектор, апаратуру радіаційної та хімічної розвідки і маніпулятор з механічним захопленням і відеокамери. Комплекс доставляється машиною-носієм, обладнаною автоматизованими робочими місцями і системами дозаправки і підзарядки. Комплекс має розширений час автономної роботи і радіус дії, а також можливості ведення технічної розвідки в умовах радіоелектронної протидії противника в повністю автоматичному режимі роботи.

Комплекс (див.рис.1.23) включає: 1 - маніпулятор з механічним захопленням, системою відеоспостереження і датчиками апаратури радіаційної та хімічної розвідки; 2 - броньовану башту кругового обертання з броньованими захисними кришками камер, далекоміра і прожектора, блоком управління роботом, інфрачервоним прожектором, квантовим далекоміром, відеокамерою широкого огляду, відеокамерою з трансфокатором і активно-пасивним приладом нічного бачення; 3 - захищений контейнер з кришкою; 4 - броньований корпус; 5 - гусенична стрічка; 6 - балансир; 7 - захищений блок системи кругового огляду і технічного зору РТК, що містить дві камери системи кругового огляду і ультразвуковий датчик відстаней системи технічного зору робота; 8 - вихлопної патрубок дизель-електричного генератора; 9 - броньований технічний люк; 10 - натяжний каток; 12 - провідний каток; 13 - опорний каток.

В [50] описано дистанційно керований мобільний робот на колісному шасі (рис. 1.24).



*Рис. 1.24. Ізометричне зображення мобільного робота*

Робот включає броньований корпус з поворотною баштовою установкою і ходовою системою, що включає електромотори-колеса, автономне джерело енергії. Наявні системи автоматичного зовнішнього спостереження, блоки управління, розташовані на мобільному роботі, і дистанційна система управління. Поворотний механізм баштової установки виконаний у вигляді високомоментного електродвигуна, що включає розташований на верхній площадці броньованого корпусу стіл з обмоткою статора, закріпленої в столі, і корпусу ротора, розташованого у внутрішній порожнині столу і пов'язаного зі столом за допомогою

кульових підшипників, а в корпусі ротора розташовані постійні магніти з можливістю взаємодії з обмоткою статора. Ходова система комплексу забезпечена телескопічними стійками дев'яносто дев'ять електродвигунів коліс. Колеса ходової системи, встановлені на дисках, виконані у вигляді покришки, заповненої пористим матеріалом (спіненою гумою), а центральна частина колеса з розташованим в ній електромотором з зовнішньої сторони обладнана броньованим ковпаком. Колісне шасі робота має можливість автономного повороту кожного колеса відносно вертикальної вісі (рис. 1.25).

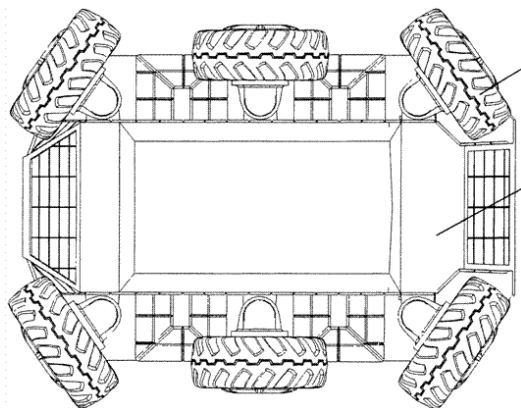


Рис. 1.25. Схематичне зображення схеми повороту коліс мобільного робота

Висота мобільного робота не перевищує 1,5м

Бойовий пристрій для пострілів сферичними гранатами, включає ствол з механізмом зміни його положення, встановлений на башті, і розташовані всередині корпусу мобільного робота контейнери зі сферичними гранатами. Контейнери забезпечені гвинтовими розподільниками і пов'язані з гвинтовим конвеєром для подачі сферичних гранат до пускового механізму.

Робот має броньований корпус виконаний з керамічних пластин. Також наявний додатковий бойовий пристрій розташований в задній зоні корпусу, що включає контейнер з відсіками для зарядів типу РПГ-2. Кожен відсік контейнера забезпечений захисними поворотними кришками, розташованими на вхідному і вихідному кінцях відсіків, а контейнер розташований на телескопічній рамі і забезпечений приводом приведення в бойове положення і приводом системи наведення. Додатковий бойовий пристрій забезпечений розташованими всередині корпусу мобільного робота блоками зарядів.

Наведене в [50] технічне рішення свідчить про значні проблеми із схемним і конструктивним виконанням колісного шасі. Забезпечення прохідності і маневреності колісного робота ускладнено його незначною масою і габаритами.



## **1.2. Найбільш поширені конструкції наземних роботизованих комплексів**

В даний час наявна інформація про сотні розробок діючих наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. Вони суттєво розрізняються по масо-габаритним параметрам. Відомі наземні роботизовані комплекси масою порядку 10 т і вище та роботи масою менше 1 кг.

Наземні роботизовані комплекси значної маси формуються на базі автомобіля або танка (рис. 1.26).



*Рис. 1.26. Великогабовий наземний роботизований комплекс спеціального призначення на базі КРАЗ*

Великогабові комплекси, як правило, є керованими і мають значне число службових пристроїв. Серед них: трали, маніпулятори, відеокамери, водяні гармати, стрілецьке і артилерійське озброєння. Дані комплекси не є повністю автономними. Великогабаритні важкогабові комплекси мають значні габарити.

Перевагою великогабових, крупногабаритних комплексів є висока прохідність при переміщенні по дорогам різного виду. Відомий шестиколісний комплекс даного виду («чавилка») (рис. 1.27).



*Рис. 1.27. Робототехнічний комплекс Crusher*

Комплекс являє собою колісний автомобіль масою 6,5 тонни. Його особливістю є висока прохідність і здатність долати значні перешкоди. Crusher обладнаний декількома відеокамерами, лазерним далекоміром, тепловізором, на нього можна встановлювати різні види озброєння.

Для проведення робіт із радіоактивними речовинами використовується роботизований комплекс РТС-РР, ЦНДІ РТК, Росія (рис. 1.28).



*Рис.1.28. Роботизований комплекс для роботи в умовах підвищеної радіації*

Комплекс має шестиколісне шасі з підвищеною прохідністю. Має захист від радіоактивного випромінювання.

Спеціалізовані наземні роботизовані комплекси військового призначення оснащені автоматичним стрілецьким озброєнням калібром 23...37 мм відносяться до роботів середньої маси і габаритів. Типовий комплекс має броньований корпус та гусеничні рушії.

В корпусі знаходяться приводи, системи керування та автоматична гармата Gatling калібру 23 мм, скорострільністю 2000 пострілів за хвилину.

Реалізація наземних роботизованих комплексів із кулеметним або артилерійським озброєнням є складною технічною задачею. В окремих випадках застосовуються самохідні установки безекіпажного типу. В них функції особового складу виконують спеціальні пристрої (автопілот, система дистанційного керування). Розроблення дистанційно керованих комплексів для виконання спеціальних робіт в небезпечних умовах є актуальним.

Гусеничні рушії дають можливість непомітного переміщення комплексу на місцевості. В подальшому поворот гусеничних блоків забезпечує підняття корпусу із гарматою для ведення прицільного вогню. Реалізовані різні модифікації військових роботів, орієнтованих на застосування стрілецької зброї.

Робот має підвищену прохідність і пристосований для ведення прицільного вогню із кулеметів та гармат.

Використання гусеничних рушіїв для підвищення прохідності використовується в наземних роботизованих комплексах середньої маси. Універсальний робот спеціального призначення забезпечує роботу із небезпечними речовинами, зокрема хімічно активними, радіоактивними та біологічно небезпечними. Робот має маніпулятор та гусеничний рушій підвищеної прохідності (рис. 1.29).



Рис. 1.29. Конструктивне виконання наземного роботизованого комплексу для роботи з токсичними, радіоактивними та біологічно небезпечними речовинами

Даний наземний роботизований комплекс може використовуватись при проведенні антитерористичних операцій, відеоспостереження, при виконанні бойових операцій.

Для підвищення прохідності даний комплекс може рухатись у кроковому режимі, долаючи перешкоди і бездоріжжя.

Серед вітчизняних розробок мобільний роботизований комплекс «Піранья».

Комплекс призначено для виконання транспортних операцій, виконання функцій станції зв'язку або брандера.

Розвідувальні функції комплексу полягають в охороні периметра військових підрозділів, розвідки місцевості, виявлення вогневих точок супротивника по сейсмічним, акустичним, оптичним, тепловим та радіосигналам, а також по параметрам лазерного випромінювання для виявлення лазерних пристроїв супротивника. Комплекс може виконувати функції корегування артилерійського вогню, визначення координат цілей, фіксації і передачі даних про навколишні умови.

Габаритні розміри комплексу 1500x982x500 мм. Кліренс 190 мм. Кут підйому 30°. Максимальний кут крену 25°. Висота вертикальної перепони – 200 мм. Максимальна швидкість 20...25 км/год. Запас ходу 20 км. Загальна маса до 100 кг.

Озброєння: кулемет калібр 7,62 мм або 12,7 мм або 40 мм, гранатомет УАГ-40. Діапазон кутів наведення в горизонтальній площині -90°...+90°, а у вертикальній площині -6°...+60°. Швидкість наведення при швидких рухах до 22 град/с. При повільних рухах від 0,05 град/с.

Система навігації забезпечує визначення координат на місцевості з точністю 2 м, визначення  $\alpha$ -вісі машини з точністю 0,3° град визначення поздовжнього і поперечного кутів нахилу платформи відносно поверхні землі з точністю 0,1 град (6').

Наземні робототехнічні комплекси спеціального призначення мають шасі та маніпулятор. Типовою і найбільш поширеною конструкцією є комплекс Andros F6A (рис. 1.30).

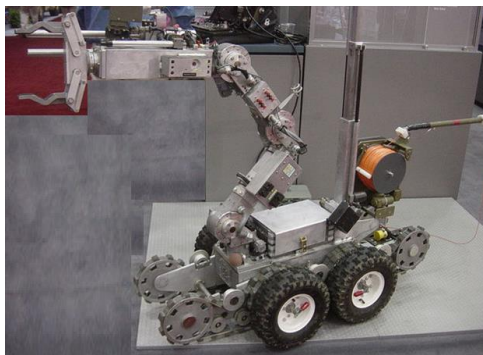


Рис. 1.30. Робототехнічний комплекс для виконання спеціальних операцій

Комплекс може рухатись по схилах (до  $37^\circ$ ), долати канави до 0,5 м та перешкоди до 0,45 м висотою. Маса комплексу 220 кг. Відноситься до пристроїв середньої вагової категорії. Габаритні розміри комплексу: довжина - 1300 мм, ширина - 700 мм, висота – 1500 мм. Швидкість переміщення комплексу до 5,6 км/год. Вантажопідйомність – 27 кгс (270 Н) при повному випрямленні маніпулятора. Маніпулятор має сім керованих координат. Схват маніпулятора має два пальці із сенсорами.

Даний наземний роботизований комплекс використовується інженерними військами. Його основна функція – первинний огляд небезпечних предметів. Він має оптичну систему, зокрема чотири відеокамери спостереження.

Аналогічну конструкцію має робот для розмінування MarkV-A1 (рис. 1.31).



Рис. 1.31. Робототехнічний комплекс MarkV-A1

Комплекс розроблено американською компанією Northrop Grumman Corporation. На ньому встановлено кілька відеокамер, а також водяна гармата для знищення бомб. В даний час MarkV-A1 використовується спеціальними підрозділами США, Ізраїлю та Канади.

Високими технічними характеристиками відрізняється наземний роботизований комплекс Andros FX (рис. 1.32).



Рис.1.32. Роботизований комплекс Andros FX

Комплекс призначено для пошуку мін та розмінування. Шасі робота має гусеничні сегменти. Маніпулятор має дев'ять керованих координат. Система керування робота має сенсорний екран з підтримкою 3D-графіки.

Модифікацією комплексу є Remotec Andros HD (рис. 1.33).

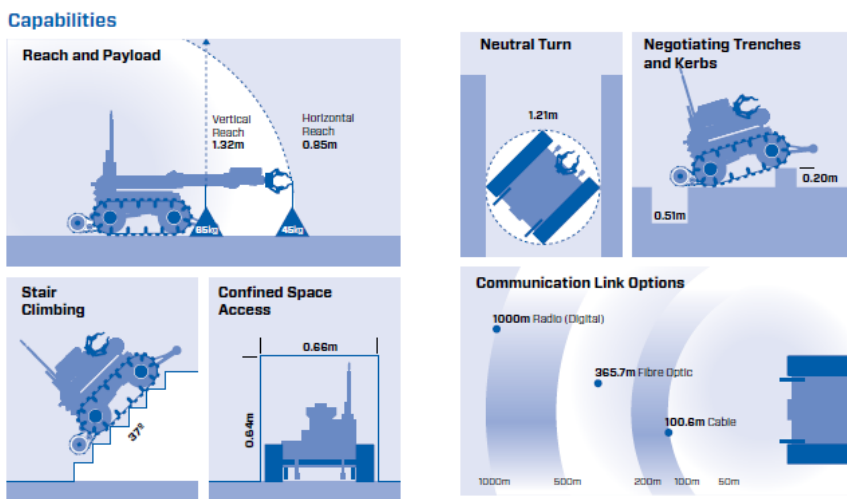


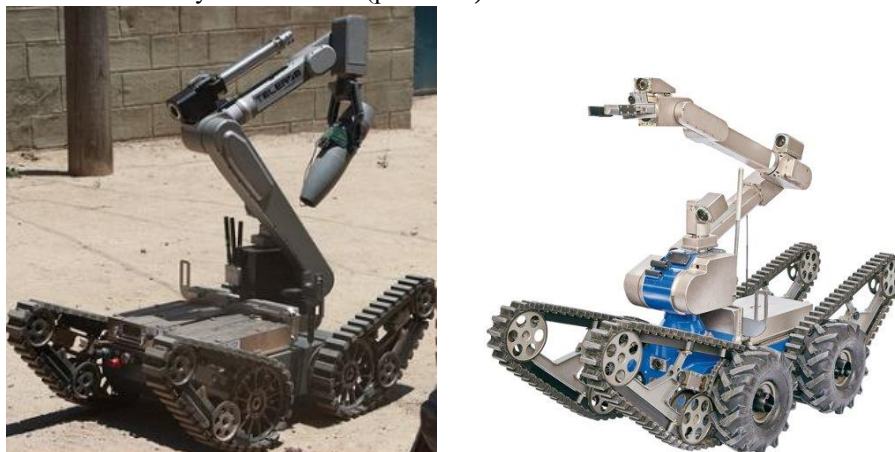
Рис. 1.33. Роботизований комплекс Remotec Andros HD

В машині простежуються риси популярного у військових сімейства F6 Remotec історія якого налічує вже близько 20 років практичного використання. Операційна



система телекерованого робота забезпечує оператора великим набором інформації, включаючи дані з сенсорів хімічної і радіаційної небезпеки.

Наземний роботизований комплекс Cobham TeleMAX EOD/IEDD має комбіноване колісно-гусеничне шасі (рис. 1.34).



*Рис. 1.34. Роботизований комплекс Cobham TeleMAX EOD/IEDD*

Він являє собою телекерований робот первинного огляду. На шасі розташована транспортна платформа. Комплекс розроблено європейською компанією Cobham. Комплекс здатний долати ухили до 45°. Комплекс має автоматичний сканер навколишнього простору.

Більш компактною конструкцією шасі відрізняється комплекс Cobham tEODor (рис. 1.35).



*Рис. 1.35. Роботизований комплекс Cobham tEODor*

Комплекс має маніпулятор та необхідні засоби для виконання різноманітних функцій. Застосовуються різні робочі органи маніпулятора (рис. 1.36).



Рис. 1.36. Модифікації робочих органів маніпулятора

Вантажопідйомність маніпулятора визначається розташуванням виконавчого органа відносно шасі і складає 20...100 кгс (200...1000 Н) (рис. 1.37).

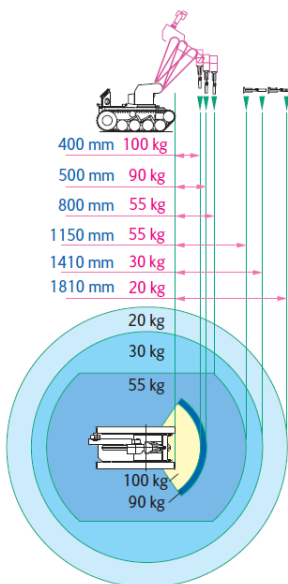


Рис. 1.37. Зміна вантажопідйомності маніпулятора в залежності від його положення та технічних характеристик

Комплекс має наступні технічні характеристики. Габаритні розміри 1300 x 685 x 1240 мм. Маса 375 кг. Максимальна швидкість 3 км/год. Кут нахилу максимальний – 45°, вантажопідйомність – 350 кгс (3500 Н). Розміри робочого простору по вертикалі – 2860 мм по горизонталі 1860 мм. Кут повороту маніпулятора в горизонтальній площині  $\pm 205^\circ$ , в вертикальній площині -  $85^\circ \dots +144^\circ$ , транспортний засіб: довжина / ширина / висота: 1300/685/1240 мм. Мінімальний радіус повороту – 1460 мм.

Діапазон кутів повороту виконавчого органу  $+120^\circ \dots -95^\circ$ . Осьовий поворот виконавчого органу необмежений. Розмір між пальцями схвата 300 мм, сила затиску 600 Н.

Наземний роботизований комплекс оснащений маніпулятором розроблено фірмою Digital Vanguard (Канада) (рис. 1.38).



*а*



*б*

*Рис. 1.38. Мобільний роботизований комплекс фірми Digital Vanguard:  
а- при піднятому маніпуляторі; б – при захваті об'єкта*



Комплекс призначений для багатоцільового використання. Може зокрема, виконувати функції спостереження та виконувати тактичні завдання. Може працювати у важкодоступних місцях, зокрема у вантажних відсіках, автомобілів та літаків, під транспортними засобами. Однією із його функцій є операції розмінування. Він має засоби для спостереження, сенсори хімічної, радіаційної та біологічної ситуації. Має засоби для руйнування вибухових пристроїв.

Платформа має озброєння – кулемет калібру 7,62 мм, оптичний блок, систему керування і зв'язку, автономне живлення і боекомплект. Кут повороту ствола у вертикальній площині  $-20...+60$ . Кут повороту по азимуту  $240^\circ$ .

Оптичний блок має дві відео камери широкого та вузького поля зору, тепловізор та лазерний далекомір. Система керування забезпечує автоматичне супроводження цілі та стабілізацію положення платформи. Оптичні засоби забезпечують дальність визначення цілі 1000 м. Дальність стрільби до 1000 м. Швидкість повороту платформи складає 60 град/с. Діапазон робочих температур  $-20...+60^\circ\text{C}$ . Габаритні розміри модуля в зібраному стані:  $1200 \times 1000 \times 1200$  мм. Маса модуля 110 кг.

Наземний роботизований комплекс ТМЗ, КБ ПА (ВАТ Спеціальне Конструкторське бюро Приладобудування та Автоматики), Росія відноситься до комплексів надлегкого класу (рис. 1.39).



*Рис.1.39. Мобільний робототехнічний комплекс надлегкого класу*

Наземний роботизований комплекс призначений для проведення аудіо-відеорозвідки об'єктів і територій в умовах місцевості з невеликими перешкодами, міської інфраструктури та в приміщеннях. Може здійснювати огляд днів салонів і багажних відділень транспортних засобів. Забезпечує доставку, установку і дистанційне приведення в дію руйнівників вибухонебезпечних пристроїв при будь-якій освітленості. Забезпечує проведення вибухотехнічних операцій. Маса комплексу - 40 кг. Максимальна швидкість пересування комплексу - 1 м/с.

В світовій практиці більше 20 років використовуються універсальні робототехнічні комплекси з гусеничним шасі та багатокоординатним маніпулятором.

На базі ідентичного гусеничного шасі фірмою Foster-Miller Inc. створено ряд наземних роботизованих комплексів типу TALON. Комплекс TALON є високотехнологічною універсальною мобільною машиною. Комплекс має

водостійкість і захищений від проникання води еквівалентній важкій зливі. По паспортним даним він призначений для роботи в різних кінематичних зонах, при різній погоді та температурі середовища. Може працювати в гірських умовах, пустині, на сніговому або льодовому покриві, на ґрунтах різного виду, зокрема щаблі, болотистій місцевості.

Існує кілька модифікацій даного комплексу. Універсальним є TALON Standart (2DOF) (рис. 1.40).



а



б

Рис. 1.40. Робототехнічний комплекс TALON Standart (2DOF):

а – вертільна модель; б – загальний вигляд

Він має наступні технічні характеристики. Висота з маніпулятором у складеному стані 427 мм. Ширина – 572 мм, довжина – 864 мм. Загальна довжина - 1300 мм, кліренс – 70 мм. Вага комплексу – 52 кг. Максимальна швидкість руху – 8,3 км/год. Комплекс може рухатись по схилу до 45°. Товщина снігового покриву, по якому може рухатись комплекс – до 38 см. Вантажопідйомність комплексу складає 10...40 кгс в залежності від виду виконання.

Маніпулятор має вантажопідйомність 4,5 кгс (45 Н) при розгорнутому маніпуляторі. Максимальна вага вантажу при складеному маніпуляторі 9 кгс (90 Н).

Зусилля на губках схвата 13,6 кГс (136 Н), розмір об'єкта, який затискається маніпулятором 101,6 мм. Робочий простір маніпулятора знаходиться межах 630...2184 мм по вертикалі. По горизонталі – 1900 мм. Комплекс має засоби закріплення вогнепальної зброї, інструмент для різання дріт'яних загороджень, контейнери для транспортування і зберігання необхідних деталей, комплектуючих, тощо, набір змінних інструментів і пристосувань.

Наявна модифікація комплексу підвищеної вантажопідйомності TALON (3DOF) (рис. 1.41).



*Рис. 1.41. Модифікація комплексу TALON (3DOF)*

Він має маніпулятор вантажопідйомністю 4,5 кГс (45 Н) при витягнутому маніпуляторі та 22,7 кГс (227 Н) при складеному маніпуляторі. Схват маніпулятора має зусилля на губках 36,2 кГс (362 Н) при діаметрі об'єкта, що затискається 157,5 мм. Максимальна швидкість переміщення 4,67 км/год.

Для роботи в екстремальних умовах пристосовано спеціальне виконання комплексу TALON CBRNE/HAZMAT (рис. 1.42).



*Рис. 1.42. Спеціальне виконання робототехнічного комплексу TALON*

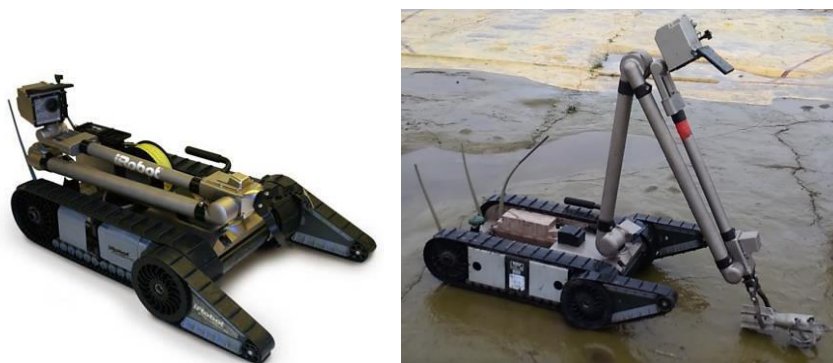
Спеціальне виконання має прилади для визначення рівня радіації, температури аналізу газового середовища. Комплекс оснащено приладами для хімічних і біологічних досліджень, а також радіологічних вимірів та ізотопного аналізу.

Створений на базі платформи TALON робот SWORDS, здатний нести снайперську гвинтівку, гранатомет і кулемет. Дані роботи отримали повноцінне озброєння, на них встановлюється автоматична гвинтівка M249 калібру 5,56 мм. або кулемет M240 калібру 7,62 мм.

Даний наземний роботизований комплекс виконаний на мобільному гусеничному шасі і має ґрунтовний комплекс озброєнь. МРК-27-БТ має два реактивних вогнемета «Шмель», кулемет «Печеніг» калібру 7,62, два реактивно-штурмових гранатомета і 6 димових гранат. Солдати зможуть самостійно встановлювати зброю на нову систему, а при необхідності знімати зброю з робота. Даний робот, як і його заокеанські аналоги, володіє дистанційним управлінням. Управління ним здійснюється за допомогою двох джойстиків з дистанції в 200 метрів в кабельному варіанті або 500 метрів при використанні радіоуправління.

Наземні роботизовані комплекси успішно застосовуються в арміях різних держав. Роботи Pack Bot (фірма iRobot) застосовуються близько 15 років. Роботи застосовують для розмінування території, прокладення комунікацій, виконання бойових дій. Загалом роботи даного типу виконують різноманітні складні і небезпечні роботи.

Робот Pack Bot має гусеничну платформу та маніпулятор (рис. 1.43).



*а*

*б*

*Рис.1.43. Загальний вигляд робота Pack Bot 510:*

*а – комплекс у зібраному стані: б – виконання операції маніпулювання*

Робот Pack Bot має незначну масу (до 20 кг). Несуча система робота має міцну конструкцію, що забезпечує можливість його падіння з висотної будівлі без втрати працездатності. Роботи Pack Bot допускають рух в середині будівель, долають сходи або інші суттєві перепони. Можуть рухатись у тунелях, печерах. В окремих випадках роботи оснащуються стрілецьким озброєнням.

Модифікацією комплексу Pack Bot є система REDOWL (Червона сова) (рис. 1.44).

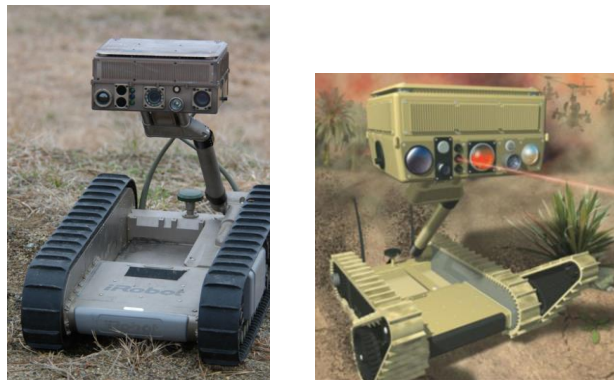


Рис. 1.44. Роботизований комплекс REDOWL

Компанія iRobot спільно з Бостонського університетом розробила прототип робота, основним завданням якого є знаходження снайперів супротивника. Пристрій одержав назву REDOWL (Robotic Enhanced Detection Outpost With Lasers). Даний робот здатний виконувати пошук ворожих снайперів і вести оперативну відеозйомку за допомогою вбудованої камери. Робот оснащується лазерним далекоміром, тепловізорами, звукопоглинаючим обладнанням, 4-ма автономними відеокамерами і GPS-приймачем. Робот знаходить місце розташування снайпера по звуку пострілу з ймовірністю до 94%. Програмне забезпечення REDOWL дозволяє відсіювати помилкові звукові сигнали. Всі пристрій важить близько 20 кг. Основним вузлом комплексу REDOWL є чутливий блок, встановлений на одноважільному маніпуляторі. Блок може підніматися і повертатися у відповідному напрямку, а додатковий підйом забезпечується підняттям платформи (рис. 1.45).



Рис. 1.45. Забезпечення поворотного руху чутливого блока (а) та додаткове підняття блока за допомогою фліперів платформи робота (б)

Сенсори наземного роботизованого комплексу мають значну роздільну здатність. Графічна інформація розпізнається з відстані понад 100 м. Звукові сенсори



визначають і аналізують постріл стрілецької зброї на відстані близько 2000 м. В комплексі поєднано оригінальну систему слухання, яка обробляє звук, отриманий чотирма мікрофонами, для визначення напрямку та висоти шуму - з набором датчиків, прожекторів та лазерного далекоміра. При пострілі снайпера комплекс REDOWL визначає локалізацію пострілу. За допомогою тепловізора визначається наявність снайпера додатково освітлюючи його інфрачервоним прожектором. Постріл снайпера реєструється стереосистемою складеною із 4-х мікрофонів. Процесор аналізує дані і точно визначає джерело звуку в інтервал часу порядку мілісекунди. Система ідентифікує постріл визначаючи вид і характер зброї. Таким чином можна ігнорувати постріли із певного виду зброї.

Система реалізує біометричні технології обробки сигналів. Це забезпечує надійний засіб локалізації звуку в умовах шуму. Система розроблена фірмою BioMimeticSystems. Відеокамера дозволяє оператору відслідковувати панораму та напрямок руху наземного роботизованого комплексу. Система масштабування відео дає можливість ідентифікувати цілі на значній відстані. Лазерні системи комплексу визначають ціль на відстані 1...2 км. Застосування інфрачервоного лазера робить процес сканування цілі невидимими. Лазерна система визначає відстань до цілі. Використання власної системи GPS навігації та магнітного компаса дає можливість встановити точні координати цілі на відстані до 1 км.

Один із найбільш ефективних наземних роботизованих комплексів на базі колісного шасі є CUTLASS (рис. 1.46).



*Рис. 1.46. Наземний роботизований комплекс CUTLASS*

Розмір шасі комплексу близько 1,2 м. Висота 1,5 м. Система має відеосупровід із дальністю спостереження до 1 км із повністю захищеним цифровим бездротовим зв'язком. Швидкість руху комплексу до 12 км/год, кут підйому 37°, сходинка до 0,5 м. Наявна система регулювання стійкості. Магазин робочих засобів включає 8

позицій. Маніпулятор має 9 ступенів вільності. Можливе використання спрощеного маніпулятора з вантажопідйомністю до 100 кгс.

Відеокамери мають засоби освітлення та систему мікрофонів. Комплекс придатний для використання в різних кліматичних умовах при температурах - 15°C...+60°C. Може використовуватись в умовах запилення, дощу. Забезпечена стійкість вібрацій та ударних навантажень.

CUTLASS розроблений і виготовлений компанією Nortroop Gumman (США). Виготовлено понад 2000 мобільних наземних роботизованих комплексів.

Більш поширеними є малогабаритні наземні роботизовані комплекси, в яких маса і габарити маніпуляційної системи є порівняними із масою і габаритами шасі.

Маніпулятори наземних роботизованих комплексів середньої маси відрізняються складною конфігурацією. Вони включають різноманітні пристрої, оптику, зброю, системи наведення та демпфування. Дані пристрої мають значну масу і габарити у порівнянні із шасі наземних роботизованого комплексу (рис. 1.47).



*Рис. 1.47 Наземний роботизований комплекс MRC-02*

При переміщенні робота виникають значні динамічні навантаження просторового виду.

Визначення динамічних навантажень на наземний роботизований комплекс являє собою складну проблему. Це обумовлено невизначеністю положення комплексу на дорозі, значними швидкостями руху комплексу, наявністю ударних та вібраційних впливів. Маса комплексу є незначною, тому динамічні навантаження суттєво впливають на його рух. Можливі негативні впливи на мобільний роботизований комплекс, що може привести до втрати його статичної або динамічної стійкості. Динамічні навантаження суттєво залежать від співвідношення мас маніпулятора і шасі.

В окремих випадках масогабаритні параметри маніпуляторів перевищують масу і розміри шасі (рис. 1.48).



*Рис. 1.48. Наземний роботизований SNIBOT, який має розвинену маніпуляційну систему*

Наявність маніпулятора значної маси змінює центрування робота. Це особливо проявляється при переміщенні маніпулятора по нерівній дорозі. Відповідно має місце суттєва зміна конфігурації маніпулятора. При цьому змінюється положення його центра мас (рис. 1.49).



*Рис. 1.49. Наземний роботизований комплекс KAPLAN EOD*

Переміщення важелів маніпулятора змінює характеристикних навантажень. При цьому можлива втрата стійкості шасі. Дані питання не висвітлені в інформаційних джерелах.

Причини і наслідки втрати статичної стійкості розглянуті в статті [145]. Відзначено значний вплив геометрії дорожніх умов на втрату стійкості мобільного робота. Показано, що втрата стійкості визначається положенням центру мас комплексу із врахуванням конфігурації його маніпулятора. Показана, що втрата стійкості залежить від маси вантажу який переміщує маніпулятор наземного роботизованого комплексу. Питання стійкості особливо актуальні для роботів із маніпуляторами значної довжини (рис. 1.50).





а



б

Рис. 1.50 – Наземний роботизований комплекс AVENGER ROV: загальний вид (а) та проникнення маніпулятором в салон замінованої машини (б)

Крім проблеми статичної стійкості має місце збільшення динамічних навантажень при зміні конфігурації маніпулятори. Як правило, мобільні роботи мають багатоважільний маніпулятор розімкненого виду.

Маніпулятор розімкненого виду має значну масу і обмежену жорсткість. Це приводить до виникнення значних динамічних навантажень. Навантаження можуть бути знижені застосуванням маніпуляторів на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами (гексаподів).

Це поліпшує компактність наземного роботизованого комплексу у складеному стані при забезпеченні необхідного робочого простору маніпулятора (рис. 1.51).



а



б

Рис. 1.51. Наземного роботизованого комплексу Dragon Runner в ході виконання бойових задач (а) та у складеному стані (б)

Вантажопідйомність маніпулятора залежить від положення його схвату. Як правило, дані параметри регламентуються в технічній характеристиці наземного роботизованого комплексу [120] (рис. 1.52).

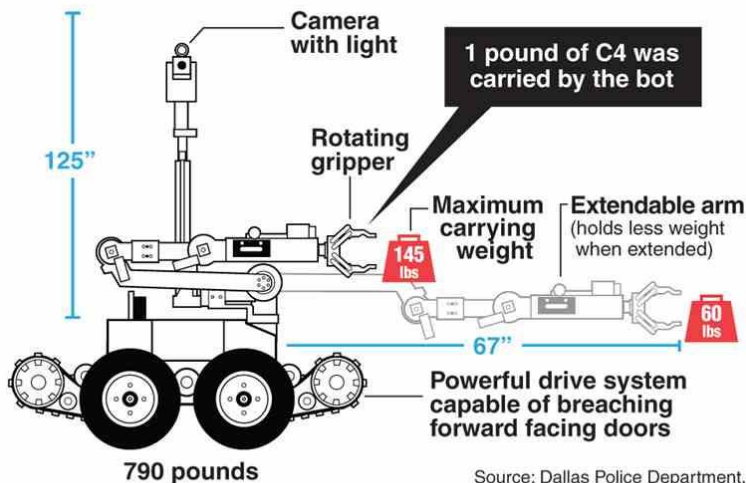


а

## 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



6

Рис. 1.52. Наземний роботизований комплекс Andros MarkV-A1, його загальний вигляд і технічні характеристики

Регламенти статичних характеристик наземного роботизованого комплексу відображають проблему забезпечення статичної і динамічної стійкості робота в цілому. Проблема вирішується різними способами. Одним із них є введення конструктивних елементів, що збільшують розмір опорної площі шасі. Одним із варіантів є застосування додаткових гусеничних рушіїв (фліпперів).

Вказані проблеми пов'язані із масштабним фактором, який особливо проявляється в наземних роботизованих комплексах середнього і малого класів. Обмежена габарити комплексів суттєво знижують їх прохідність. Застосування спеціальних пристроїв у колісних і гусеничних рушіїх значно ускладнює конструкцію шасі та утруднює процеси дистанційного керування наземним роботизованим комплексом. Суттєвим фактором є обмежені поля оптичних систем роботів. Одним із напрямків вирішення вказаних проблем є застосування інноваційних схемних і конструктивних рішень, наприклад, використанням динамічного гусеничного рушія, або інерційних рушіїв чи демперів коливань. Дослідження в напрямку вирішення вказаних проблем є актуальними.

Вказані проблеми вирішуються застосуванням наземних роботизованих комплексів, які мають базову платформу середніх розмірів та високої прохідності, яка несе додаткові малогабаритні мобільні роботи, тобто наземний роботизований комплекс утворює сімейство роботів різного класу (рис. 1.53).

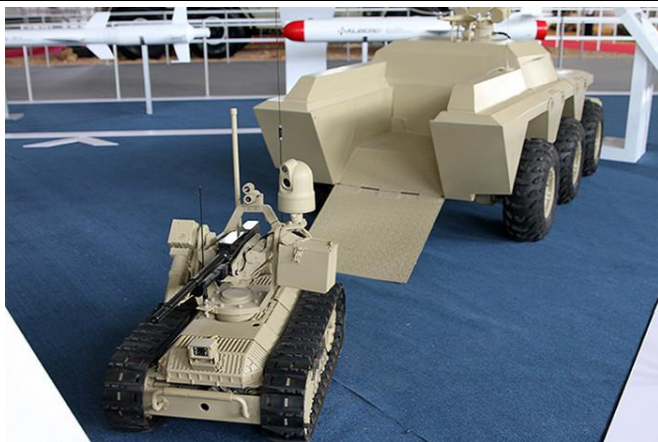


Рис. 1.53. Сімейство роботів SHARP CLAW 1 (знизу) та SHARP CLAW 2 (вище)

В окремих джерелах описані конструктивні рішення характерних вузлів і пристроїв мобільних роботів. Зокрема, наведені конструктивні схеми шарнірів та редукторів. В якості підшипників шарнірів, як правило, застосовуються голчасті підшипники. Редуктори об'єднуються з електроприводом та шарніром. Характерним є застосування хвильових, планетарних та циклоїдальних редукторів та високомоментних малогабаритних електродвигунів. Схеми і конструктивні рішення відповідають традиційним пристроям та деталям машин. Наявна значна кількість оригінальних технічних і технологічних рішень, застосування високоефективних матеріалів. Інформація про інноваційні рішення, як правило, є мінімальною.

Одним із перспективних варіантів мобільного робота легкого класу є MTGR. Він має колісне шасі з додатковими гусеничними рушіями, маніпулятор та систему відеоспостереження (рис. 1.54).

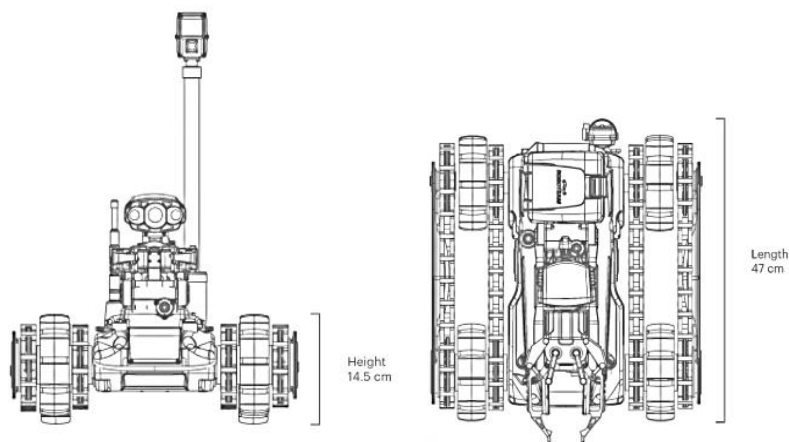


Рис. 1.54. Легкий наземний роботизований комплекс MTGR

Комплекс призначено для розвідувальних операцій. Він забезпечує огляд місцевості на 360°, має систему нічного бачення. Комплекс прийнято на озброєння в 2012 році в США, Ізраїлі, Польщі. Він в основному використовується підрозділами спеціального призначення та розвідки.

Робот MTGR (Mini-UGV) розроблений фірмою Robot Team (Ізраїль). Власна маса робота 7,3...8,6 кг, а корисне навантаження 100 Н. Чес неперервної роботи 2...4 год. Відстань до оператора в межах 500 м. Діапазон робочих температур -20...+60°C. Застосовується на відкритому повітрі, на дорогах різного виду та на бездоріжжі. Може працювати в приміщеннях та в підземних умовах.

В зібраному стані є ранцевим варіантом з габаритами 46x37x15 см (рис. 1.55).



*Рис. 1.55. Наземний роботизований комплекс MTGR в зібраному стані*

Робот має маніпулятор із чотирма ступенями вільності. Даний робот являє собою одну із найбільш ефективних конструкцій надлегкого класу.

Наведені конструкції роботів легкого і надлегкого класу мають ряд особливостей. Вони мають специфічні схемні рішення. Модульна конструкція забезпечує можливість зміни конфігурації робота в процесі його експлуатації. Конструкції роботів мінімізовані по масі. Широко практикується застосування неметалевих матеріалів та прогресивних композитів.

### **1.3. Наземні роботизовані комплекси оригінальної конструкції та міні-роботи**

Наземний роботизований комплекс з двома маніпуляторами HDMS 551s1 розроблений компанією Resquared, спін-оффом Університету Карнегі-Меллон (рис. 1.56).



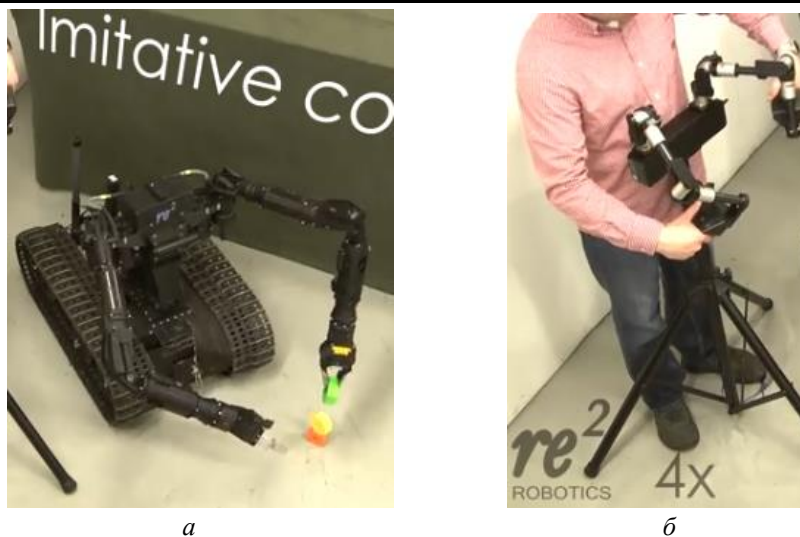


Рис. 1.56. Робот HDMS 551s1 з двома маніпуляторами (а) та пульт його керування (б)

Комплекс призначено для точного маніпулювання об'єктами. Для поліпшення керування роботом застосовується спеціальний пульт керування, що використовує аватар принцип. Маніпулятори робота повторюють рухи пристрою яким рухає оператор. Це забезпечує спрощення керування при роботі з небезпечними об'єктами.

В окремих випадках розробники промислових роботів використовують мобільні платформи для їх установки. Таким роботом є розробка фірми KUKA (рис. 1.57).



Рис. 1.57. Промисловий робот KUKA встановлений на рухомій платформі

Реалізовані і використовуються наземні роботизовані комплекси з оригінальним рушієм. До таких роботів відноситься сферичний робот-розвідник (рис. 1.58).



Рис. 1.58. Сферичний мобільний робот спеціального призначення:  
а – вид збоку; б – вид спереду; в – рух по воді

Робот розроблено корпорацією GuardBot Inc. Він має розмір близько 1 м і масу близько 25 кг. Даний робот-амфібія може ефективно працювати на дорогах різного виду, у піску, болоті, снігу, похилих поверхнях та воді. Швидкість переміщення по суші до 35 км/год., рух по воді забезпечується зі швидкістю до 6 км/год. Робот долає підйом 30°. Може нести вантаж до 20 кг. Робот призначений для виконання спеціальних операцій. Серед них: розвідка, охорона, доставка вибухових речовин, роботи по виявленню вибухонебезпечних предметів та операції розмінування. Робот має відеокамери спостереження, розташовані з обох боків основної сфери. Наявна розвинена система вимірювачів різного виду. Камери мають поле зору 360°.

Робот має інерційний рушій у вигляді маятникової системи, що налічує 9 ступенів вільності. Керування роботом здійснюється набором алгоритмів, що регулюють положення центра мас робота. Робот є автономним. Джерело електроживлення забезпечує неперервну роботу протягом 8 год.

Різновидом даної конструкції є наземні роботизовані комплекси, що мають ланцюг елементів з поворотними приводами.

Розроблено ряд складених із однотипних модулів з'єднаних послідовно [65]. Вони призначені для маніпулювання об'єктами в замкнених об'ємах.

Пристроєм-аналогом є система у вигляді шарнірної лінійної структури типу «робота-змій» (рис. 1.59).

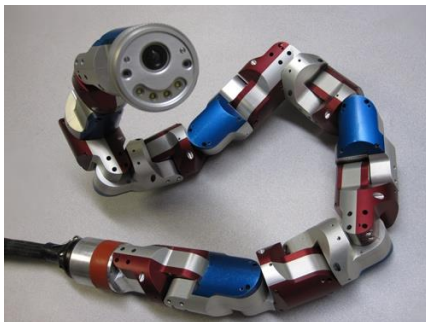


Рис. 1.59. Наземний роботизований комплекс у вигляді шарнірної лінійної структури призначений для маніпулювання об'єктами в обмежених об'ємах



а



б

Рис. 1.60.. Переміщення робота у вигляді лінійної структури по зовнішній циліндричній поверхні: а – циліндрична поверхня великого діаметра; б – циліндрична поверхня малого діаметра

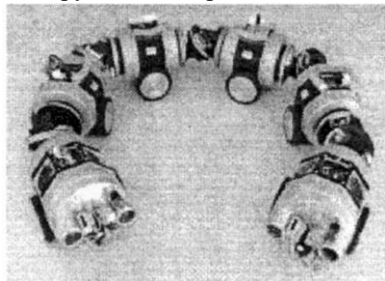
Для переміщення робота даного типу необхідно забезпечити значні сили тертя.

Наведена конструкція не є ефективною для маніпулювання об'єктом в трубопроводі. Стінки трубопровода як правило є гладенькими, що утруднює переміщення мобільного робота. Практично неможливо забезпечити доступ робота до бокових вертикальних стінок та верхньої стінки трубопровода.

Цих недоліків позбавлена розроблені модульні конструкції роботів для роботи в обмежених об'ємах.



Для контролю стану каналізаційних труб використовується робот MAKRO (рис. 1.61 а). Він є мультисегментним роботом, для автономного пересування у стічних трубах діаметром 300-600 мм.



а



б

Рис. 1.61. Робот MAKRO (а) та його переміщення в трубопроводі(б)

Робот MAKRO складається з шести сегментів, пов'язаних між собою п'ятьма рухомими з'єднаннями з приводом від двигуна (рис. 1.19 б).

Це дозволяє йому повертатися при зміні напрямку руху по трубчастому колектору. Він оснащений комп'ютерною системою, в якій закладена топологічна карта колектора, а програмне забезпечення дозволяє розрахувати весь шлях пересування робота від початкового пункту до кінцевого. Робот розрахований на дві години безперервної роботи. Контроль та зв'язок з роботом відбувається через відкриті люки з поверхні.

Одним із роботів типу «змій» є робот "Snakebot" (США) (рис. 1.62).



Рис. 1.62. Загальний вигляд робота Snakebot

Робот складається з однакових модулів, які з'єднуються один з одним за допомогою шарнірного з'єднання. "Snakebot" має головний комп'ютер для збору інформації та управління роботом. Кожен з модулів оснащується мініатюрним комп'ютером, який управляє рухом даного модуля за сигналами від головного комп'ютера.

Наземна роботизована «змія» може просуватися вперед як черв'як, піднімати себе, щоб подолати низькі перешкоди, звиватися і повертатися. Перспективні розробки направлені на те, щоб змія могла ставати антеною, щоглою або захоплювальним механізмом для виконання яких-небудь дій.

Аналогічний робот з такою ж назвою "Snakebot" розроблено в Англії. Цей робот-розвідник здатний адаптуватися до швидкозмінних умов зовнішнього середовища. Він нагадує черв'яка: його довгасте тіло складається з безлічі окремих сегментів, пронизаних "штучними м'язами" з нікель-титанового сплаву, що має ефект пам'яті. Пропускаючи по "м'язах" електричний струм, можна змінювати їх форму, викликаючи скорочення окремих сегментів і, зрештою, рух всієї конструкції.

Робот-змія "OmniTread" (США). Має інше конструктивне виконання (рис. 1.63).

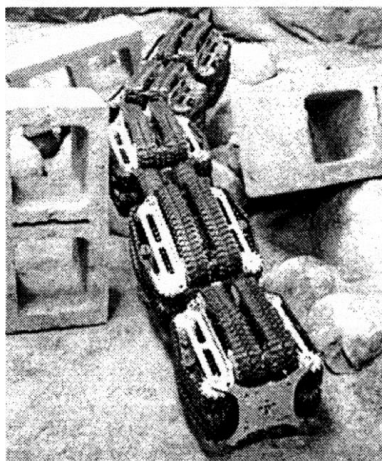


Рис. 1.63. Конструктивне рішення робота Omni Tread

Робот переміщається за рахунок гусениць, що рухаються і займають 80 відсотків поверхні корпусу. Ці гусениці дозволяють роботів не знижувати швидкість і не зупинятися на нерівних поверхнях. Людина-оператор управляє роботом за допомогою джойстика і шнура з електророзривним з'єднувачем, який також є кабелем електроживлення. Джойстик передає команди оператора спеціально розробленому програмному забезпеченню.

"OmniTread" поділений на п'ять прямокутних сегментів, з'єднаних по центру довгим приводним валом (своєрідним "хребтом" змій), який приводить в рух гусениці всіх сегментів. Пневматичні сильфони, що знаходяться в зчленуваннях, які з'єднують сегменти, забезпечують поворот або підйом потрібного сегмента. Вони створюють обертальний момент, достатній для підйому двох передніх або двох задніх сегментів робота, за допомогою чого він долає перешкоди.

Маса робота сягає 13 кг, висота - приблизно 20 см, а довжина - 132 см. Він може долати перешкоди висотою до 45 см, канами шириною 66 см.

Для прокладення волоконно-оптичних кабелів через підземні колектори, розроблені спеціальні роботи. Наприклад, робот SAM фірми "Ka-TeSystem AG" (Швейцарія) (рис. 1.64) встановлює в колекторі спеціальні кільця, через які протягує волоконно-оптичний кабель. Робот може переміщатися в колекторах змінного перетину діаметром не менше 200 мм.

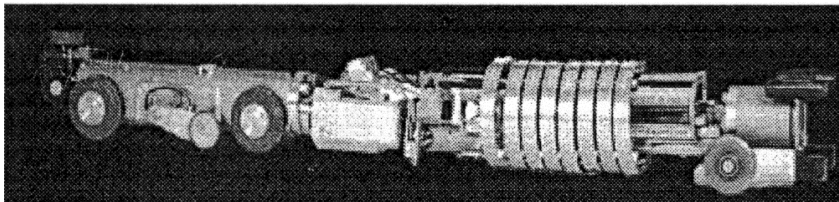


Рис. 1.64. Конструкція робота SAM

В патентних матеріалах [Пат. СССР В25J11/00, 5/02 Манипулятор для осмотра внутренних поверхностей Шкаленко В.А., Борисенко Л.А, Шкаленко А.А., заявл. 04.02.91, опубл. 15.04.93, бюл. №14] наведено схемне рішення маніпулятора для роботи у замкнених об'ємах типу трубопровода (рис. 1.65).

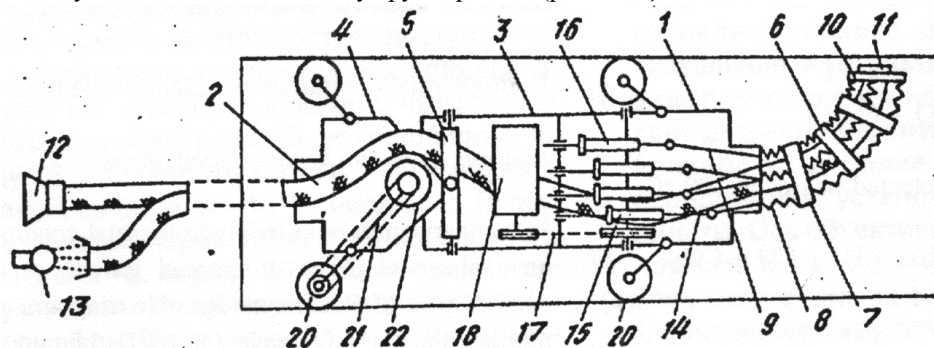


Рис. 1.65. Схемне рішення маніпулятора для роботи у внутрішній частині трубопровода

Манипулятор має шасі з роликми, які забезпечують його переміщення вздовж трубопровода. Виконавчий орган маніпулятора встановлено на пружній ланці із спеціальною системою керування. На виконавчому органі розміщені необхідні пристрої для огляду та обробки внутрішньої поверхні трубопровода.

В результаті загального огляду і аналізу систем маніпулювання встановлено, що в даний час розроблено значну кількість сучасних стаціонарних та мобільних промислових роботів. Тому необхідно розглянути більш детально основні параметри роботів та їх вузлів. Найбільш високого ступеню розвитку набули маніпулятори промислових роботів, які розглянуті нижче.

Манипулятори наземних роботизованих комплексів будуються в основному по розімкненій схемі. Важелі маніпуляторів мають композитні приводи переміщень у вигляді мотор-редукторів оригінальної конструкції. Застосовуються хвильові та циклоїдальні редуктори із значними коефіцієнтами редукції.

Останнім часом набули поширення наземні роботизовані комплекси (swarm), складені із однотипних роботів. Як правило, складові роботи мають малі розміри, обладнані засобами переміщення і допускають стиковку і з'єднання між собою. Мініатюрні роботи утворюють організовану групу («рій») роботів (рис. 1.66).



*Рис. 1.66. Мініатюрні роботи, які утворюють організовану групу, здатну до об'єднання за певними законами*

Об'єднання мініатюрних роботів здійснюється за певним законом із утворенням ланцюгових структур різного виду (рис. 1.67).



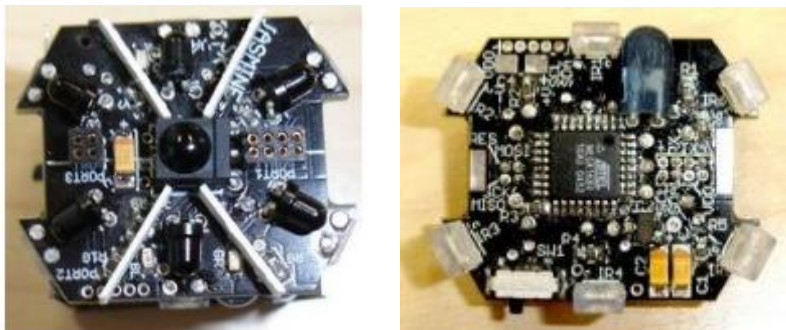
*Рис. 1.67. Приклад формування ланцюгової структури із мініатюрних роботів*

Мініатюрні роботи мають незначні розміри (до 5 см) і включають засоби пересування, автономне живлення і керування. Пересування забезпечує колісний рушій з приводами (рис. 1.68).



*Рис. 1.68. Характерна конструкція мініатюрного робота*

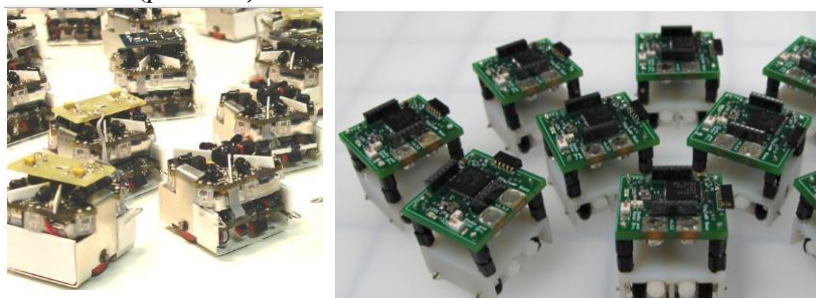
Кожний мініатюрний робот має складну конструкцію і являє собою автономну мехатронну систему із енергоживленням, ходовою частиною і системою керування (рис. 1.69).



*Рис. 1.69. Внутрішня структура мініатюрного робота*

Система сенсорів і стиковочні вузли забезпечують самостійне орієнтування роботів у складі групи. Інтелектуальний блок робота забезпечує формування його окремої позиції в складі групи та визначає його задачі в складі системи.

Мініатюрні роботи мають різне виконання, яке обумовлене специфікою задач, які виконують організовані системи роботів. Кожен мініатюрний робот має пристрої для стиковки між собою (рис. 1.70).



*Рис. 1.70. Варіанти реалізації мініатюрних роботів призначених для формування колективних організованих наземних роботизованих комплексів*

В даний час реалізується кілька напрямків розробки SWARM роботів. Основними з них є наступні: Sambots – створення самоформуючих систем роботів у вигляді лінійних, плоских та просторових структур; I-SWARM – створення мікроскопічних наземних роботизованих комплексів, орієнтованих в основному на медичне застосування; iRobot-SWARM – високонадійні наземні роботизовані комплекси, які допускають регенерацію системи при втраті функцій окремим роботом; Kobot Project – системи визначення параметрів та ефективної навігації; Kilobot – системи, що реалізують алгоритми групової дії, зокрема повернення окремих роботів, забезпечення живлення, тощо.

Розробки SWARM-роботів є перспективними. На цій основі будуть реалізовані нові інтелектуальні самоорганізуючі системи.

Корпорацією Rolls Royce розроблено мініатюрні наземні роботизовані комплекси спеціального призначення. Вони застосовуються для проведення діагностики і ремонтних робіт складних технічних систем, зокрема газотурбінних авіаційних двигунів. Мініатюрний робот (рис. 1.71) має діаметр близько 10 мм і є повністю автономним.



*Рис. 1.71. Мініатюрний робот призначений для діагностики газотурбінних двигунів*

Робот реалізує систему SWARM і включає набір мініатюрних роботів, які базуються в роботі «змій». Мініатюрний робот має елементи, які забезпечують огляд важкодоступних ділянок і формують відео в режимі реального часу. Відео аналізується оператором і є основою для діагностики технічного стану працюючого двигуна.

Корпорацією Boston Dynamics розроблено ряд конструкцій повзаючих роботів, які реалізовані у вигляді дослідних зразків. Робот Rise V2 має шість ніг, які дають можливість роботу повзати по вертикальним стінкам (рис. 1.72).



*Рис. 1.72. Переміщення крокуючого робота по вертикальній стінці*



Робот має розмір близько 600 мм. Шість ніг робота оснащені спеціальними опорами, які забезпечують надійний контакт і зачеплення із шорсткою стінкою (рис. 1.73).



*Рис. 1.73. Конструктивне виконання опори крокуючого робота*

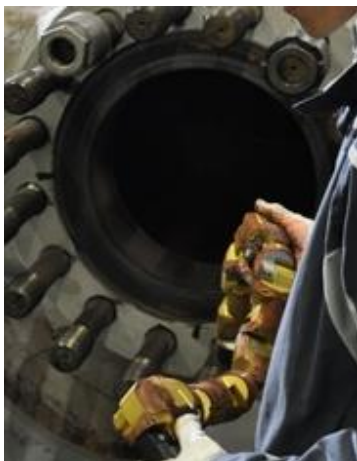
Модифікація даної конструкції забезпечує рух робота по вертикально розташованому стовпі (рис. 1.74).



*Рис. 1.74. Крокуючий робот Rise V3, який перміщується по вертикальному стовпі*

Робот поміщається в середину замкненого об'єму через невеликий отвір (рис. 1.75).





*Рис. 1.75. Введення робота у вигляді лінійної шарнірної структури в замкнений об'єм типу трубопровода*

Робот-амфібія у водозахищеному варіанті має традиційну колісну схему. Легкий магнітний робот призначений в основному для огляду поверхонь металевих суден розроблено дослідниками Німецького дослідницького центру штучного інтелекту (German Research Center for Artificial Intelligence ) GmbH. Робот має двоколісне шасі із додатковою колісною опорою, встановленою в поворотному хвості (рис. 1.76).



*а*



*б*

*Рис. 1.76. Легкий робот з магнітними колесами (а) та переміщення робота по вертикальній стінці (б)*

Робот призначено для огляду магнітних поверхонь: стін, стелі. Габаритні розміри робота 38x28x15 см. Маса 670 г. Швидкість руху по вертикальним поверхням до 0,5 м/с. Колеса мають по своїй периферії потужні магніти (неодим). Робот має відеокамеру з джерелом світла. Акумулятор напругою 11,1 В–800 мА год. Використані двигуни постійного струму напругою 12 В.

Наведені конструкції реалізовані у вигляді ефективних експериментальних зразків. Підтверджена їх працездатність в реальних умовах експлуатації. Для даних роботизованих комплексів має місце проблеми їх точної орієнтації на рівній поверхні і визначення точного розташування робота.

Роботи невеликих розмірів і маси (міні-роботи) широко використовуються у світовій військовій практиці. Типовим зразком комплексів даного виду є Eye Drive – Міні-робот з дистанційним керуванням (рис. 1.77).



*Рис. 1.77. Загальний вигляд міні-робота Eye Drive*

«Eye Drive» - це малогабаритний робот з телекеруванням, розроблений компанією «ODF Optronics». Міні-робот «Eye drive» призначений для виконання пошукових робіт і обстеження приміщення, які становлять небезпеку. Робот являє собою радіокерований чотириколісний міні автомобіль, на колеса якого можуть бути встановлені гусениці. Робот має невеликий кузов. Робот має систему керування, модуль зв'язку, акумулятор живлення, електродвигун, чотири стаціонарні і одну поворотну відеокамери. Невеликі розміри і вага міні-робота дозволяють легко закинути його в приміщення. «Eye Drive» здатний самостійно долати вертикальні перешкоди, підніматися по сходах. Міні-робот чіпляється гусеницями за виступи і перекидає себе через перешкоди. «Eye Drive» - це спеціальна військова розробка, призначена для ведення розвідувальних операцій на місцевості, а також веденні антитерористичних спецоперацій.

«Eye Drive» має дистанційне керування, що дозволяє вести спостереження і розвідку з безперервним оперативним відео - і аудіостеженням з полем зору в 360 °. Система відеоспостереження складається з 4х стаціонарних відеокамер і однієї поворотної. Така кількість камер дозволяє оператору бачити все, що діється навколо робота-розвідника. Відео- і аудіоінформація, отримана сенсорами робота, передається на комп'ютер оператора через Wi-Fi. Програмне забезпечення автоматично створює архіви всієї інформації отриманої сенсорами робота, а інтелектуальна система самостійно обробляє всю візуальну і аудіоінформацію. При виявленні підозрілого сигналу вона оповіщає оператора. Система відеоспостереження робота забезпечує можливість безперервного спостереження за місцем розвідки на 360 ° без «сліпих зон».

Система навігації міні-робота Point 'n Go робить процес керування роботом простим і зрозумілим. В системі навігації застосована інноваційна технологія керування. Оператор вказує напрямок руху робота на екрані керуючого пристрою з

панорамним зображенням навколишнього оточення. Цим виключається необхідність обладнати систему управління джойстиком або іншим додатковим пристроєм, а оператору дозволяє не зосереджуватися на управлінні міні-роботом.

Маса міні-робота - 3 кг. Таку ж вагу він може нести на собі. Його можна використовувати для переміщення газоаналізаторів, димових шапок, і доставки вибухових пристроїв. «Eye Drive» знаходиться на озброєнні силових структур Російської Федерації і багатьох інших країн.

Міні-робот застосовується в комплекті з одного або двох міні-роботів. Робот дає точні і чіткі зображення і звук в режимі реального часу в радіусі 360 ° навколо робота-розвідника. Робот має 4 стаціонарні відеокамери кругового огляду і одна похила, масштабована відеокамеру. Робот має стійку систему відео виявлення руху. Система здійснює автоматичний запис і архівування відео і аудіоінформації, для звітів про виконання операції. Ударостійкий, простий і компактний міні-робот може використовуватися вдень і вночі, за будь-яких погодних умов. Додатковий змінний акумулятор забезпечує швидку заміну живлення в польових умовах. Встановлена ​​додаткова IR-камера (з масштабом X10), дозволяє вести спостереження в інфрачервоному діапазоні. В разі необхідності на шасі встановлюється роботизований маніпулятор. Комплект захисту міні-робота забезпечує захист робота при закиданні в віддалені місця. Міні-робот самостійно виходить із захисного комплексу після приземлення. Відеокамера робота має роздільну здатність 2,500X570 пікселів. Відстань передачі інформації: в приміщенні 50 метрів, на вулиці: 300 метрів. Мікрофон робота забезпечує виміри звукових сигналів до 5 метрів від міні-робота. Режим освітлення дозволяє розділяти предмети на відстані до 10 м. Застосовується інфрачервоне випромінювання (ближня область спектра) у всіх напрямках або видимий спектр випромінювання (біле світло). Час активного режиму роботи міні-робота 3 год., а час в режимі очікування 24 год. Час зарядки акумулятора максимум 4 год. Швидкість переміщення міні-робота до 10 км / год. Габаритні розміри: 0,28мX 0,25мX0,11м. Інтерфейс підключення до комп'ютера: USB. Пристрій керування має габаритні розміри: 0,185м x 0,11м x 0,073м і масу 1 кг. Використовується керуючий блок, що включає центральний процесор: 1-ядерний 3GHz або 2-х ядерний 1,2 GHz, ОЗУ: 1,5 GB, Video-карта: 128 MB (нерозподілений), HDD: 80 GB.

Міні-роботи є прогресивним видом наземних роботизованих комплексів. У даний час розроблена ​​значна кількість роботів даного класу. Напрямами вдосконалення міні роботів є створення більш ефективних конструкцій шасі та систем керування. Використання в системах керування елементів штучного інтелекту суттєво поліпшує статичні та динамічні характеристики міні-роботів в цілому.

Аналогічну конструкцію і застосування має багатоцільова безпілотна наземна роботизована машина Nerva LG розроблена і створена NEXTER Robotics, дочірньою компанією NEXTER Group. Вона призначена для використання збройними силами. Дана роботизована система вперше була представлена ​​в ході виставки Eurosatory 2012 відбулася в Парижі і DSEi 2013 Лондоні. Проста у використанні і повністю водонепроникна безпілотна наземна машина Nerva LG захищена до рівня стандарту

IP65, з можливістю підвищення до рівня класу IP67. Основою міні-робота Nerva LG є колісне шасі симетричного виконання (рис. 1.78).



*а*



*б*



*в*

*Рис. 1.78. Колісне шасі, яке є основою міні-робота Nerva LG: а – вид збоку; б – вид згори; в – вид ззаду*

Якщо на роботі не встановлено додаткове обладнання, то Nerva LG повністю реверсивний і готовий до роботи відразу після викидання. Встановлена ззаду рукоятка полегшує перенесення і кидання робота. Його можна скинути з висоти три метри і кинути на сім метрів у довжину. Допускаються протяжні стрибки міні-робота при його переміщенні (рис. 1.79).



*Рис. 1.79. Відео фіксація стрибка міні-робота при його виїзді із труби*

Міні-робот Nerva LG має два діапазони швидкостей: з нуля до 4 км / год. і другий з 0 до 15 км / год. Перший режим стандартний, дозволяє виконувати точне керування і орієнтування робота. Коли необхідна висока швидкість, оператор на кінці перемикає апарат в швидкісний режим.

Стандартні колеса мають діаметр 150 мм. Можуть встановлюватися спеціальні колеса для піску з більш широкими протекторами та поперечними захопленням, при необхідності доступний також комплект гусениць (рис. 1.80).



а



б

Рис. 1.80. Застосування коліс із спеціальними протекторами і комплект гусениць (а) та конфігурація шасі міні-робота при встановленні гусениць (б)

Для спеціальних операцій є комплект для плавання з поплавковими елементами і гребними колесами. В разі необхідності міні-робот використовується в комплекті із безпілотним літальним апаратом (рис. 1.81).



Рис. 1.81. Застосування міні-робота в комплекті з дроном NX110 Robot NERVA

В даній конструкції міні-робота реалізовані сучасні підходи до реалізації наземної робототехніки. Повністю модульний робот базується на концепції «одне включення», що дозволяє швидко замінити колеса і акумулятор.

Робот оснащений штовхачем для механічного впливу на підозрілі об'єкти і двостороннім аудіо зв'язком. Канал зв'язку частотою 2,4 ГГц гарантує радіус дії один кілометр на відкритій місцевості і 300 метрів в межах міста. Акумулятор в системі подає напругу 24 вольт при силі струму 1 ампер.

Тривалість роботи Nerva LG складає дві години, роботом можна керувати за допомогою змінних комп'ютерів, планшетів або смартфонів. В останньому випадку стандартний канал змінюється на канал стандарту Wi-Fi 100 мВт з набагато меншим радіусом дії (рис. 1.82).





Рис. 1.82. Пристрій керування міні-роботом

Робот Nerva LG звичайно використовується як дистанційно керована система, але, може отримати також напівавтономні можливості, наприклад рух за заданими координатами GPS, автоматичне повернення додому або режим «Йди за мною». Робот має довжину 350 мм, ширину 310 мм, висоту 150 мм. Габаритні розміри робота з гусеницями 700х400х200 мм. Маса робота 4,5 кг. Діапазон робочих температур - 20°C...+55°C.

Nerva LG оснащений стандартними сенсорами, які за рахунок чотирьох камер забезпечують круговий огляд (передня камера з високою роздільною здатністю має систему підсвічування), всі звуки оператор чує завдяки неорієнтованому мікрофону (рис. 1.83).

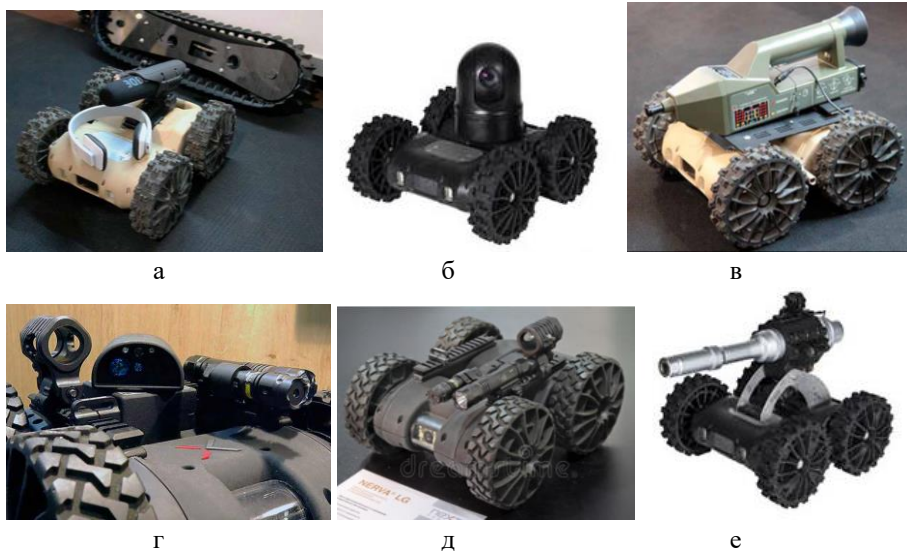


Рис. 1.83. Встановлення різноманітного обладнання на шасі міні-робота: а – передня камера робота та неорієнтований мікрофон; б – PTZ-камера; в – хімічний сенсор; г, д – система освітлення і розвідки; е – захисна система (disruptor support)

Робот Nerva LG може бути обладнаний до 20 різними спеціалізованими комплектами для проведення різних операцій. Напрявні «пікатінні» або планки що

конфігуруються забезпечують механічний інтерфейс з пристроями. На нього можуть встановлюватися такі системи, як детектор радіо, біохімічного зараження, системи освітлення, розвідки і визначення місця розташування, набір інструментів для знешкодження саморобних вибухових пристроїв, нелетальні гранати і димогенератор.

Ряд ефективних конструкцій міні-роботів розроблено фірмою RoboTeam.

Легкий наземний роботизований комплекс IRIS виконує функції тактичного спостереження (рис. 1.84).



*Рис. 1.84. Загальний вигляд міні-робота IRIS (а)  
та його схематичне зображення (б)*

Габаритні розміри робота 23х20х11 см. Маса 1,65 кг. Найбільше корисне навантаження 1 кгс. Максимальна швидкість переміщення 5 км/год. Радіус дії при керуванні до 200 м. Акумуляторна батарея робота має напругу 12 В і допускає безперервну роботу на протязі 1...2 год. Діапазон температур навколишнього середовища: -20°C...60°C.

Робот має систему кругового відеоспостереження при денному світлі та камери інфрачервоного діапазону. При необхідності включається освітлення.

Реалізовано ряд полегшених варіантів робота-розвідника (рис. 1.85).



*Рис. 1.85. Полегшені варіанти чотириколісного робота (а)  
та триколісного робота (б)*

Наведені конструкції міні-роботів мають по 4 колеса. На їх основі розроблені більш легкі і компактні двохколісні міні-роботи.



Міні-робот NERVA S призначений для виконання розвідувальних функцій. Робот являє собою двоколісну платформу з хвостом-рукою (рис. 1.86)



*Рис. 1.86. Загальний вигляд міні-робота NERVA S*

Робот оснащений відеокамерою високої чіткості, термокамерою інфрачервоного бачення та мікрофоном.

Робот допускає значні динамічні навантаження, ударостійкий, водонепроникний. Його можна кидати на відстань кілька метрів. Робот має компактну конструкцію, може інтегруватись в бойову систему. Простий в користуванні. Керується наявним обладнанням (смартфон, тощо).

Аналогічний по конструктивному виконанню і використанню мобільний міні-робот MOLE (рис. 1.87).



*а*



*б*

*Рис. 1.87. Міні-робот MOLE (а) та пристрій його керування (б)*

Робот використовується у військовій практиці багатьох країн. Він призначений для операцій інтелектуального спостереження та розвідки. Широко використовується антитерористичними підрозділами в якості мобільного спостерігача. Вага - 1,3 кг. Швидкість руху мініатюрного робота до 5 м/с (18 км/год).

Мобільні наземні роботизовані комплекси реалізовані у різних варіантах і типорозмірах. Застосовуються мобільні роботи різноманітного виду. Як правило, мобільні промислові роботи мають модульну конструкцію і складені із окремих однотипних елементів.

Модуль у вигляді двоколісного робота (рис. 1.88) має окремі приводи коліс.

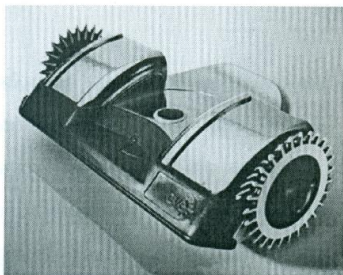


Рис. 1.88. Двоколісний модуль мобільного робота із диференціальними приводами коліс

Крім гусеничного і колісного рушія в мобільних роботах реалізуються і інші види засобів для реалізації переміщень. Зокрема, реалізовані повзаючі наземні роботизовані комплекси, складені із однотипних шарнірно-з'єднаних елементів.

Даний пристрій також має можливість переміщуватись по поверхні. Робот у вигляді лінійної структури використовується для маніпулювання об'єктами в обмежених об'ємах типу трубопровода. Маючи незначні розміри в поперечному напрямку дана система приводів легко проходить в невеликий отвір замкнутого об'єму. Для переміщення робота необхідні значні зусилля. Тому він ефективно переміщується по шорсткій поверхні із виступами.

Робот може переміщуватись по зовнішній циліндричній поверхні різного діаметра: стовпах, канатах, балках.

В міні роботах застосовуються різноманітні типи рушіїв. Невеликі розміри роботів утруднюють долання перешкод. Один із напрямків підвищення прохідності – це стрибкоподібні рухи. Дослідний зразок мобільного робота SandFlea має чотири колеса для переміщення по рівній поверхні і спеціальну важільну систему для здійснення стрибків на висоту до 10 м (рис. 1.89).



а

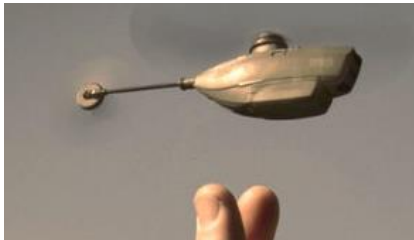


б

Рис. 1.89. Дослідний зразок міні-робота (а) та важільна система (б) для забезпечення стрибкоподібного руху

Колеса і осі робота під час стрибка стабілізують його політ як гіроскопічні системи. Це дає можливість стабілізувати положення бортової камери і забезпечити приземлення на 4 колеса. Заряд акумулятора достатній для здійснення 25 стрибків.

Реалізовано ряд варіантів мікроскопічних роботів. Як правило, вони виконані у вигляді літальних апаратів (рис. 1.90).



*Рис. 1.90. Літаючий мікро-робот розвідник*

Даний мікро-робот PD-100 має назву Black Hornet (Чорний шершень). Він розроблений норвезькою фірмою Prox Dynamics. Фірма заснована в 2007 р. Вона спеціалізується на аеродинамічних, механічних, програмних та операційних інноваціях. Розробка міні-робота здійснена в 2012 р. Вона використовується поряд з американською розробкою CP-ISR міні БЛА. Мікро-робот використовується для спостереження і рекогносцировки в рамках програми Cardo Intelligence Program. Мініатюрний робот Black Hornet має габарит до 10 см. Тривалість його польоту до 25 хв. при дальності 1,6 км. Система зв'язку дозволяє візуальну ретрансляцію в режимі реального часу та індивідуальні фото знімки. Маса мініатюрного робота 18 г.

Розглянуті особливості конструкції та технічні характеристики наземних роботизованих комплексів послужили основою для їх класифікації. Запропоновані класифікаційні принципи та розроблена класифікація комплексів по геометричним та по масо-габаритним параметрам. Наведена класифікація наземних роботизованих комплексів по масо-габаритним показникам і функціональному призначенню є попередньою. В процесі розвитку даного напрямку робототехніки класифікація буде уточнена і деталізована.

Мікро-роботи є перспективним напрямком розвитку робототехніки. Слід очікувати суттєвого розвитку даного напрямку у недалекому майбутньому. Прогнозується використання різного виду рушіїв мікро-роботів. При вдосконаленні джерел енергії буде суттєво збільшена тривалість автономної роботи мікро-робота та розширені його функціональні можливості. Є значні перспективи розвитку систем керування роботів даного виду. Як правило, для керування мікро роботом використовується типовий смартфон. Це суттєво спрощує питання експлуатації мікро-робота та знижує вартість системи. Можливе застосування мікро-роботів у системах ройових технологій в поєднанні із роботизованими комплексами іншого виду.

### 1.4. Класифікаційні принципи та класифікація по геометричному принципу

Із результатів проведених патентно-інформаційних досліджень випливає, що в даний час наявна значна кількість наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. Вони суттєво розрізняються за параметрами. Розмірні параметри наземних роботизованих комплексів запропоновано оцінити характерним розміром у вигляді середнього габариту  $L_c$ . Габаритні розміри комплексу складають: довжина –  $L$ ; ширина –  $B$ ; висота –  $H$ .

Середній габаритний розмір доцільно визначити у вигляді середньоарифметичного габаритних розмірів:

$$L_c = (L + B + H) / 3.$$

Для окремих робіт доцільно використати середній розмір як ребро еквівалентного куба:

$$L_c = \sqrt[3]{L \cdot B \cdot H} = \sqrt[3]{w},$$

$w$  – об'єм роботи.

Наприклад, для наноробота довжиною 10 см і перетином 1х1 см середній габаритний розмір:  $L_c = \sqrt[3]{10} = 2,15$  см.

Для градації наземних роботизованих комплексів по середньому габариту та масі доцільно використати головний розмірний ряд рекомендованих чисел R5, а саме: 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10,0.

Відповідно межі габаритних розмірів та маси наземних роботизованих комплексів вибрані із даного ряду чисел. Серед розглянутих в попередніх підрозділах конструкцій наземних роботизованих комплексів наявні: малі комплекси («кишенькові»); невеликі («ручні»); комплекси середнього розміру («переносні»), які може перенести одна людина або двоє, троє чи четверо чоловік; великі, які можна переміщувати додатковими механізмами або автономно і дуже великі, які рухаються самостійно.

Відповідно визначеним функціональним характеристикам введені класифікаційні групи габаритних розмірів наземних роботизованих комплексів (рис. 1.91).

| Групи мобільних роботизованих наземних комплексів,<br>розподілені по габаритним розмірам та діапазони їх габаритів |                                      |                                                   |                                                         |                                                |                                     |                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Nano<br>мініатюрні<br>до 2,5 см                                                                                    | Мікро<br>«кишенькові»<br>2,5...10 см | Mini, малі<br>«ручні»,<br>переносні<br>10...40 см | Midі, середні,<br>переміщувані<br>вручну<br>0,4...1,6 м | Maxi,<br>великі,<br>саморухомі<br>1,6 ...4,0 м | Mega,<br>дуже<br>великі<br>4...10 м | Giga,<br>величезні<br>більше 10 м |

Рис. 1.91. Класифікаційні групи габаритних розмірів наземних роботизованих комплексів

Класифікаційні групи введені по запропонованій градації комплексів по їх функціональним характеристикам: «кишенькові», «ручні», «переносні», тощо.

Тому для групи Micro вибрано розмір не більше 10 см. Такі предмети можна вільно носити в кишені. Для групи Mini прийнято межі габаритів 10...40 см. Комплекси таких розмірів зручно носити в руках або використати ранцевий варіант. Для групи Midi (середні) прийнято межі габаритів, які є характерними для відомих в даний час наземних роботизованих комплексів, які мають розміри від 40 до 120 см.

Серед наявних в даний час розробок вибрані типові представники роботів по групам габаритних розмірів (табл.1.4)

Таблиця 1.4

Типові представники роботів по групам габаритних розмірів

| Номер групи | Назва групи                     | Представник                                                                         | Габарит | Примітка                                       |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------|
| 1           | Nano,<br>Мініатюрні             |    | 2,5 см  | Розвідувальні операції                         |
| 2           | Micro,<br>«кишенькові»          |    | 10 см   | - « -                                          |
| 3           | Mini,<br>«ручні»,<br>переносні  |   | 40 см   | - « -                                          |
| 4           | Midi,<br>Переміщувані<br>вручну |  | 100 см  | Розвідка,<br>можливе<br>бойове<br>застосування |
| 5           | Maxi,<br>Великі,<br>саморухомі  |  | 2,5 м   | - « -                                          |

Таблиця 1.4 (продовження)

| Номер групи | Назва групи          | Представник                                                                       | Габарит | Примітка            |
|-------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------|
| 6           | Mega,<br>дуже великі |  | 6 м     | Бойове застосування |
| 7           | Giga,<br>величезні   |  | 16 м    | - « -               |

Габаритні розміри наземних роботизованих комплексів обумовлюють специфіку їх експлуатаційних характеристик та виконуваних функцій. Комплекси із незначним габаритом до 40 см призначені для індивідуального використання. Можливість індивідуального або колективного використання значною мірою залежить від маси комплексу.

### 1.5. Класифікація комплексів по масо-габаритним параметрам

Для введення меж класифікаційних груп по масовим характеристикам враховані ергономічні параметри ручного переміщення вантажів. Відповідно введені класифікаційні групи комплексів по масовим параметрам (рис. 1.92).

| Групи наземних наземних роботизованих комплексів,<br>розподілені по масі та діапазони їх масових характеристик |                                              |                                  |                  |                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|------------------|--------------------------------|
| Nano, Мікро мініатюрні,<br>«кишенькові»<br>до 1 кг                                                             | Mini, малі «ручні»,<br>переносні<br>1...6 кг | Midi, середні, переміщувані      |                  |                                |
|                                                                                                                |                                              | Однією<br>людиною                | Двома<br>особами | Трьома та<br>більше            |
|                                                                                                                |                                              | б...25 кг                        | 25...63 кг       | 63...250 кг                    |
| Maki, великі,<br>саморухомі 250...1000<br>кг                                                                   |                                              | Mega,<br>дуже<br>великі 1...10 т |                  | Giga, гіганські<br>більше 10 т |

Рис. 1.92. Класифікаційні групи масових характеристик наземних роботизованих комплексів

В даний час реалізовані наземні роботизовані комплекси відповідні введеним масовим групам (табл. 1.5).

Таблиця 1.5

Типові представники роботів по різних масовим групам

| Номер групи | Назва групи                             | Представник                                                                         | Маса   | Примітка |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------|
| 1           | Nano, Мікро, мініатюрні та «кишенькові» |    | 0,6 кг |          |
| 2           | Mini, «ручні», переносні                |    | 3 кг   |          |
| 3           | Midi, переміщувані однією людиною       |    | 20 кг  |          |
| 4           | Midi, переміщувані двома особами        |   | 60 кг  |          |
| 5           | Midi, переміщувані чотирма особами      |  | 150 кг |          |



Таблиця 1.5(продовження)

| Номер групи | Назва групи                    | Представник                                                                       | Маса   | Примітка |
|-------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------|----------|
| 5           | Махі,<br>великі,<br>саморухомі |  | 800 кг |          |
| 6           | Mega,<br>дуже великі           |  | 12 т   |          |
| 7           | Giga,<br>величезні             |  | 25 т   |          |

Середні за розмірами комплекси Midі відносяться до різних груп по масі. Дана обставина є принциповою тому, що обумовлює умови використання комплексів та умови їх експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

Таким чином сформовані дві системи класифікаційних груп наземних роботизованих комплексів: по габаритам і по масі. Введені по масовим параметрам класифікаційні групи є більш детальними, ніж групи введені по габаритним параметрам.

Класифікація комплексів по масо-габаритним параметрам повинна враховувати специфіку їх застосування.

Області застосування пов'язані із масо-габаритними параметрами наземних роботизованих комплексів. Звичайно малі роботи призначені для виконання розвідувальних операцій, а середні як для розвідки, так і для маніпулювання об'єктами. Стрілецькі операції характерні для роботів середніх та великих розмірів і маси, а операції транспортування доцільні для великих та важких роботів.

Із врахуванням даних обставин розроблена класифікаційна таблиця наземних роботизованих комплексів, яка оснований на відмінності їх масо-габаритних параметрів (табл. 1.6).

Таблиця 1.6

| № | Умовна назва класифікаційної групи                        | Середній габарит, м | Маса, кг      | Область застосування                                                                   | Примітки                                                              |
|---|-----------------------------------------------------------|---------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1 | Nano (мініатюрні)                                         | до 0,025            | менше 100 г   | Спеціальні операції                                                                    | Використовуються із застосуванням ройових технологій                  |
| 2 | Micro («кишенькові» )                                     | 0,025...0,1         | до 1 кг       | Спостереження, розвідка, виконання спецоперацій, службові операції                     | Можливо застосування роїв, екстремальні задачі, медична служба        |
| 3 | Mini (малі, «ручні») переносні                            | 0,1...0,4           | 1...6 кг      | Індивідуальний розвідник короткого радіусу дії, обмежені бойові операції, розмінування |                                                                       |
| 4 | Midi (середні, основні) переміщувачі:<br>- однією людиною | 0,25...1,6          | 6...25 кг     | Розвідка, маніпулювання об'єктами, стрілецькі операції, розмінування, бойові операції  |                                                                       |
| 5 | - двома                                                   |                     | 25...63кг     |                                                                                        |                                                                       |
| 6 | - чотирма                                                 |                     | 63...250кг    |                                                                                        |                                                                       |
| 7 | Maxi (великі) саморухомі                                  | 1,6...4,0           | 250...1000 кг | Розвідка, бойові операції, транспортування                                             | Мають обмежене застосування по причині складності та високої вартості |
|   | Mega (дуже великі)                                        | 4,0...10,0          | 1...10 т      | Транспортування вантажів, бойові операції                                              |                                                                       |
|   | Giga (величезні, гігантські)                              | більше 10           | більше 10 т   | Комплексні роботи, транспортування, розмінування, бойові операції                      |                                                                       |

### 1.6. Функціональне призначення наземних роботизованих комплексів

Проведено аналіз функціонального призначення роботизованих комплексів по різних класифікаційним групам. Можливі функції роботизованих комплексів розділені на основні та другорядні (рис. 1.93).

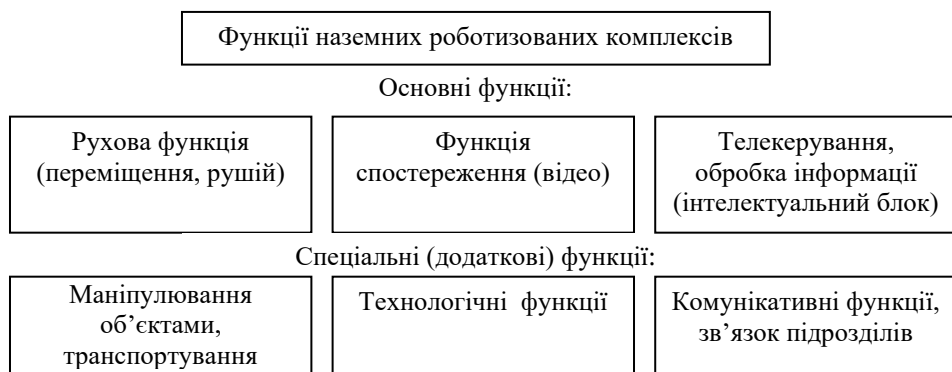


Рис. 1.93. Функції наземних роботизованих комплексів

Функції комплексів формуються в залежності від масо-габаритних параметрів. Для мікроскопічних (Nano) та мініатюрних (Micro), «кишенькових» рухомих роботів типовими є спостереження, розвідка, відео фіксація, ідентифікація об'єктів. Мікроскопічні та мініатюрні (Nano і Micro) роботи виконуються з різними схемами руху. Малі розміри роботів обумовлюють різноманітні можливості їх переміщення. Мініатюрні та «кишенькові» роботи можуть бути на шасі або літаючі, повзаючі, стрибаючі, ті, які переміщуються кантуванням (котяться). Можуть запускатися як м'яч, або із праці, катапульти чи іншого метального знаряддя. Вистрілюються із пневматичного пістолета. Переміщуються на аеростаті, мінідирижаблі, квадрокоптері, безпілотному комплексі. Можуть мати пасивні пристрої для польоту (планер, парашут, гвинт). Застосовуються в екстрених ситуаціях. Як правило, використовуються у вигляді роїв. Виконують функції спостереження, маяка, сигналізують про ситуацію. Можуть використовуватись в довготривалому чеканні у сплячому стані. Можуть мати і бойове застосування. Для цього передбачені засоби ураження: аерозольні, мінівибухові пристрої, запалювальні пристрої та інше.

Мініатюрні (Nano і Micro) роботи забезпечують функції обробки інформації і мають потужний інтелектуальний блок. Роботи малих розмірів (мініатюрні) здатні з успіхом виконувати комунікаційні функції та підтримувати зв'язок між підрозділами. В перспективі прогнозується підвищення ефективності виконання даних функцій.

В цілому прогнозується значний розвиток індивідуальних мініатюрних (Nano і Micro) роботів у майбутньому. В перспективі у кожного військового буде набір мініатюрних роботів-аналогів смартфонів із широкими функціональними можливостями. Тому розробка мініатюрних роботизованих комплексів є актуальною технічною проблемою.

Розробка нових технологій ведення бойових дій також підвищить важливість розроблення мініатюрних роботів. Це в першу чергу пов'язано із ройовими способами застосування роботів.

Основні особливості принципу ройової протидії реалізують технології, які, як вважають їх автори, повинні в корені перетворити усю тактику ведення наземних і повітряних боїв. Йдеться про систему swarm (рій), що дозволяє керувати роєм (групою) роботизованих бойових одиниць. Бойові swarm-технології частково імітують принципи спільних дій групи комах, які обмінюються інформацією і виконують загальне завдання, використовуючи способи, визначені поняттям так званого "колективного розуму".

Бойовий рій, про який йде мова в сучасній військовій науково-технічній літературі, керується одним оператором. При цьому такі завдання, як побудова бойових одиниць, маневри всередині рою, дозарядження та перезарядження вирішуються без участі людини. Їх забезпечує система штучного інтелекту, побудована на принципах "колективного розуму". В даний момент ця бойова технологія найбільш актуальна для безпілотних літальних апаратів, хоча її результати з успіхом будуть застосовані у бойових діях найближчого майбутнього з широкою участю наземних військових роботизованих систем.

Основні позитивні якості бойових swarm-технологій в застосуванні до беспілотників можуть бути пояснені таким чином. Рівень розвитку сучасних систем ППО серйозно перешкоджає діям авіації. Подальше вдосконалення бойових літаків занадто обтяжливе з економічної точки зору.

Сотні недорогих беспілотників, об'єднаних в рої за допомогою автономних мереж, здатні прорвати навіть найпотужнішу і ешелоновану протиповітряну оборону. При цьому координація атаки рою відбуватиметься незалежно від якості управління. Беспілотники завдаватимуть ударів по ворогу самостійно, виходячи із заздалегідь заданих алгоритмів. Бойове застосування БПЛА особливо корисно в перші, найважчі години і добу конфлікту. Протидіяти тактиці рою дуже скрутно, оскільки рої БПЛА, на відміну від пілотованих винищувачів, можуть діяти як камікадзе, виділяючи одного з членів рою для розкриття системи ППО противника і потім знищуючи її вогнем ударних беспілотників. Окрім цього рої беспілотників можуть ефективно здійснювати підтримку наземних патрулів, пошуково-рятувальні місії, завойовувати перевагу в повітрі та ін. При цьому практично зводиться до нуля можливість втрат серед особового складу військових підрозділів.

Ройові технології ефективні не лише для мініатюрних роботів (Nano і Micro), а і для роботів більших розмірів. Малі або «ручні» переносні (Mini) роботи в основному призначені для виконання розвідувальних операцій. Вони переміщуються за допомогою колісного рушія. Для підвищення прохідності встановлюються додаткові гусеничні рушії. Практикується технологія руху основана на обмежених польотах. Роботи такого типу скидаються з висоти 2...5 м. Можуть викидатись на відстань 5...10м. окремі роботи здійснюють стрибки на висоту до 5 м і вище. В ряді випадків для переміщення малого робота застосовують квадрокоптер або інший беспілотний чи пілотований літальний апарат.

Малі («ручні», переносні, Mini) роботи також можуть використовуватись для операцій транспортування невеликих вантажів, зокрема вибухівки масою до 1...5 кг. В окремих випадках малі роботи можуть виконувати стрілецькі функції. Доцільним є застосування малого робота для транспортування міни. Саморухома міна може підтримуватись дистанційно. В окремих випадках робот виконує функцію камікадзе. Малі роботи можуть бути застосовані в ройових технологіях. При цьому в рої об'єднуються як однотипні роботи, так і роботи відмінні по своїм масо-габаритним параметрам. В останньому випадку реалізується синергетичний ефект застосування організованої групи роботів. Наприклад, застосування одного робота для відеоспостереження часто приводить до втрати інформації по причині невеликого кута спостереження або ракурсу. Застосування кількох роботів, розташованих по спеціальній геометричній схемі, дає можливість суттєво підвищити якість відеоспостереження. Доцільним є синергетичне об'єднання роботів задіяних по тандемній або кільцевих схемах. При цьому можна компенсувати недоліки низької прохідності малих роботів. Ройова організація групи малих роботів по кутовій (древовидній) схемі реалізують технологію «організована зграя».

Малі роботи доцільно використовувати разом із беспілотними літальними апаратами. БПЛА використовується для корегування руху малого робота, захищає

його від ворожих дій, ретранслює інформацію, яку передає малий робот, збільшуючи дальність його дії. Наземний роботизований комплекс служить як база для БПЛА. Може виконувати функції підзарядки, тимчасового укриття для БПЛА, резервної лінії зв'язку.

Перспективними є ройові технології, де в рої об'єднуються різномірні об'єкти, наприклад Mini-роботи та БПЛА.

Середні по масо-габаритним параметрам наземні роботизовані комплекси (Midi) є найбільше поширеними. В основному вони призначені для виконання функції активної розвідки із маніпулюванням небезпечними об'єктами. Дані роботизовані комплекси мають маніпулятор, розгалужені відеосистему та ходову частину у вигляді гусеничного чи колісного шасі. В окремих випадках середні (Midi) комплекси виконують стрілецькі функції або функції самозахисту. До функцій даних роботів відносяться: транспортування вантажів невеликої маси, виконання комунікативних функцій та ряду спеціальних операцій. Загалом комплекси Midi є широко функціональними. Це є причиною їх найбільшого поширення.

До недоліків таких наземних роботизованих комплексів слід віднести: низьку прохідність по причині малих розмірів і маси робота; складність підтримання рівноваги при маніпулюванні об'єктами значної маси; складність точного маніпулювання об'єктами.

Для підвищення прохідності застосовуються додаткові пристрої, зокрема комбіновані колісно-гусеничні шасі.

Для підтримання рівноваги при переміщенні робота по нерівній поверхні та при маніпулюванні об'єктами значної маси застосовуються додаткові ланки шасі.

Складність точного маніпулювання об'єктами обумовлена тим, що полярна система координат та точкова полярна система відеосупроводу ускладнює координацію дій оператора при керуванні маніпулятором. Оператору важко візуально оцінити відстань до об'єкта або сцентрувати вісь обертання схвата і об'єкта маніпулювання.

Даного недоліку можна уникнути застосуванням лазерного 3D сканування об'єкта або використанням додаткових роботів-спостерігачів.

Наземні роботизовані комплекси середніх масо-габаритних параметрів доцільно застосовувати групами. Об'єднання легкого робота-розвідника із кількома більш важкопідйомними спеціалізованими роботами середнього класу значно підвищує ефективність роботи з небезпечними об'єктами.

Одним із недоліків роботів середніх типо-розмірів є недостатня потужність приводів виконавчих органів. Як правило, зусилля затиску схвата роботає незначним. Це не дає можливості жорстко закріпити об'єкт. Губки схвата погано тримають тверді деталі (оброблені плоскі металеві поверхні). Гумові виступи а схваті розташовані в одній площині і погано тримають циліндричну деталь. Є можливість перекошу схвата і його губок. Для компенсації цих недоліків необхідно використати спеціальний робот із потужним виконавчим органом. Доцільно застосувати мобільні верстати-роботи, які мають широкий набір засобів для роботи з об'єктами.

Застосування наземних роботизованих комплексів (верстатів-роботів) для обробки небезпечних об'єктів радикально змінює організацію та проведення робіт по ліквідації надзвичайних ситуацій, ремонту військової техніки, утилізації вибухонебезпечних об'єктів, токсичних та радіоактивних речовин. Це має велике значення для організації робіт в надзвичайних ситуаціях.

Для базування виконавчого органу верстата-робота на об'єкті застосовується спеціальний маніпулятор. Він має ряд схватів, які забезпечують жорстке з'єднання платформи верстата-робота із оброблюваним об'єктом. При цьому рухомий інструмент встановлюється на платформі робота і забезпечує обробку об'єкта з необхідною точністю.

Конструкція маніпулятора дає можливість закріпити оброблюваний об'єкт на платформі верстата-робота. Відповідно при необхідності та можливості верстат-робот здійснює переміщення небезпечного об'єкта, його поворот або видалення окремих частин об'єкта чи сторонніх предметів, що заважають технологічному процесу обробки.

Для обробки застосовується шпindelна головка. Шпindelна головка із інструментом здійснює обмежені переміщення відносно платформи верстата, забезпечуючи обробку об'єкта. Контроль обробки забезпечується відеосупроводом процесу та спеціальними системами вимірів.

На платформі робота автоматично можуть бути встановлені необхідні пристрої із магазину пристроїв. Застосовуються пристрої для ідентифікації об'єктів та пристрої обробки об'єктів. Зокрема, пристрої огляду об'єкта: відеокамери, лазерні сканери, вимірювальні щупи, тактильні пристрої, аналізатори хімічного складу, твердості та інших властивостей об'єкта. Пропонуються пристрої очищення об'єкта, зокрема піскоструменеві та гідроструменеві.

Основним методом обробки деталей наземним роботизованим комплексом-верстатом є високоточна механічна обробка. Для механічної обробки об'єкта використовуються шпindelні головки із одним або декількома шпindelями, призначеними для установки інструментів: дискових пил, фрез, свердел, мітчиків та інших. Можливе використання щіток та голкофрез для очищення поверхонь.

В якості можливих пристроїв механічної обробки пропонуються роботомеханічні пристрої типу автоматизованих ключів, викруток, поворотних лещат. Можливе застосування гідрофікованих пресових пристроїв для видавлювання, гнуття та різання, прошивки отворів, тощо.

Пропонуються до застосування різноманітні пристрої для реалізації інженерно-фізичних методів обробки. Зокрема, різакі газові, різакі плазмові, різакі лазерні. Зварювальні апарати для точкового зварювання, газового та електрозварювання.

Верстати-роботи відносяться до спеціалізованих інженерних наземних роботизованих комплексів. Іншим класом спеціалізованих роботів є комплекси, обладнані стрілецьким озброєнням: кулеметами та гранатометами. Наявні в даний час наземні роботизовані комплекси середніх масо-габаритних розмірів розділяються на групи відповідно по спеціалізації роботів (рис. 1.94).

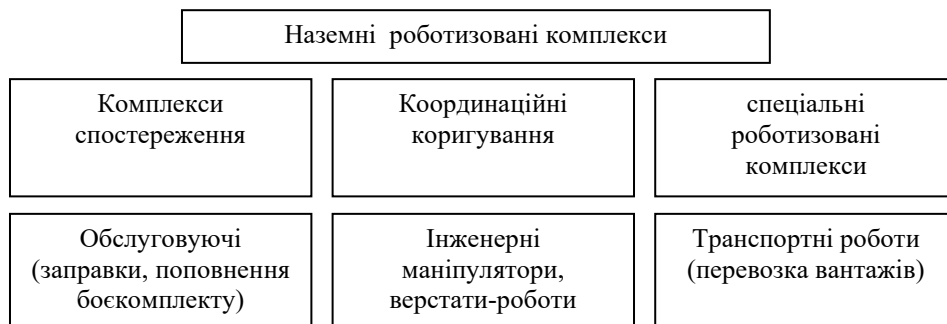


Рис. 1.94. Розділення спеціалізованих робіт середнього рівня по групах

Група робіт середніх розмірів може бути об'єднана з роєм мініатюрних або малих робіт. При цьому є можливість уникнути втрат високоякісного обладнання, яке являють собою середні (Midi) роботи.

Наземні роботизовані комплекси середніх розмірів ефективно реалізують окремі ройові технології. Серед наземних роботизованих комплексів спеціального призначення виділяються наземні касетні контрроботи з підривними елементами ройової протидії. Вони є новим зразком робототехнічного озброєння і військової техніки, яка призначена виключно для надійного, жорсткого і швидкого пригнічення бойової активності різних типів наземних багатоцільових наземних роботизованих комплексів супротивника на основі застосування найбільш перспективних, сучасних технологій ведення бойових дій.

Великі наземні роботизовані комплекси (Махі) масою більше 250 кг є саморухоми. Їх основними функціями є активна розвідка і бойове застосування. Комплекс оснащується стрілецьким озброєнням та керованими ракетами. Комплекс має колісне або гусеничне шасі і побудований по модульному принципу. Бойовий модуль має засоби ураження, засоби виявлення цілей із системою технічного зору. Вона включає відеокамери, сенсори, локаційні установки. Комплекси оснащені системами дистанційного керування, системами орієнтування, навігації та топографічної прив'язки. В склад інтелектуального блока, який здійснює оперативне керування наземним роботизованим комплексом, входять компоненти, що реалізують принципи штучного інтелекту. Це обумовлено тим, що виконання складних операцій керування наземного роботизованого комплексу потребує спеціальних підходів та відповідних інформаційних технологій.

У наземних роботизованих комплексах спеціального призначення широко застосовуються інформаційні технології розвитку штучного інтелекту. Серед них можна виділити наступні: застосуванням штучних нейронних мереж; еволюційні алгоритми керування; елементи нечіткої логіки.

Штучні нейронні мережі здатні накопичувати інформацію, а потім використовувати її для одержання раціональних рішень [47].

Еволюційні алгоритми керування включають синтез алгоритмів та програм для їх реалізації шляхом їх зміни (мутації) та обміну частинами (схрещення). Після цього



відбувається їх тестування при виконанні спеціальних тестових завдань. На основі тестування відсіюються неефективні алгоритми. Таким чином при виконанні різноманітних задач забезпечується еволюційний відбір найбільш ефективних законів керування.

Значну увагу останнім часом приділяється можливості реалізації алгоритмів на принципах притаманним живим істотам. Враховуються досягнення психофізіології та біоніки. Застосовуються біоміметичні технології, зокрема для сприйняття та аналізу звукових хвиль різних частотних діапазонів та розпізнавання запахів. Біоміметичні сенсори ефективно застосовуються у випадках значних шумів і збурень вхідних сигналів, великих діапазонів зміни вимірювальних величин, наявності фонових сигналів невизначеного типу. Ці проблеми є характерними для наземних роботизованих комплексів у реальних умовах експлуатації.

Бойові модулі роботизованих комплексів включають системи наведення озброєння та оптико-електронні прицільні пристрої (з тепловізійними та радіолокаційними засобами). Системи наведення ракет включають дальномір, лазерний канал керування і інтегровані з системою керування стрільбою та стабілізатором озброєння. Передбачені системи виявлення, супроводження та розпізнавання цілей і ситуацій. При цьому є можливість передачі в реальному часі інформації оператору. Для забезпечення точності стрільби бойовий модуль має систему стабілізації положення у двох площинах.

Система дистанційного керування комплексом забезпечує відео зображення маршруту, визначення і фіксацію параметрів руху, керування озброєнням.

Великі наземні роботизовані комплекси можуть виконувати функції ройових технологій, працювати в складі групи із комплексами різних масо-габаритних параметрів.

Наземні роботизовані комплекси віднесені: до класу Mega (дуже великі) з масою 4...10 т та віднесені до класу Giga масою понад 10 т, мають спеціальне застосування. Вони мають підвищену прохідність, застосовуються для транспортування вантажів та виконання бойових операцій. Значна вартість вказаних комплексів обумовлює незначне їх поширення в даний час.

В результаті аналізу наявних конструкцій наземних роботизованих комплексів спеціального призначення встановлено, що вони задовольняють групі вимог відповідно виконуваних функцій. Дані вимоги враховують умови експлуатації мобільних роботів, особливості небезпечних об'єктів та перспективи розвитку робототехніки спеціального призначення. Вимоги є результатом узагальнення проведених досліджень і є основною для розвитку основних положень проектування мобільних роботів спеціального призначення, адаптованих для роботи з небезпечними об'єктами. Вимоги обґрунтовують можливість розроблення наземних роботизованих комплексів із врахуванням технологічних можливостей підприємств України.

## **РОЗДІЛ 2**

### **Маніпулятори наземних роботизованих комплексів**

#### **2.1. Загальна характеристика систем маніпулювання**

Наземні роботизовані комплекси є важливим технологічним обладнанням. Вони застосовуються в багатьох виробничих галузях. В загальному вигляді наземний роботизований комплекс призначено для виконання технологічних операцій подібних до тих, які виконує людина. Основними функціями роботів є: виконання навантажувально-розвантажувальних робіт; маніпулювання об'єктами; транспортування об'єктів; керування машинами і механізмами, ремонтні операції; операції складання вузлів і механізмів; застосування в системах обробки металів тиском (гаряча і холодна обробка); системи обробки металів різанням (подача, встановлення заготовок); зварювальні операції різного виду; військова справа (роботи-мінери, роботи-сапери, роботи-розвідники), бойові роботи різного виду (в тому числі антропоморфні); медицина (діагностика хвороб, хірургічні операції, догляд за хворими); іграшки різного виду; космічні роботи, підводні роботи [16,69].

Згідно визначення наземний роботизований комплекс – це автоматична машина, стаціонарна або рухома, яка містить маніпулятор, виконавчий орган та пристрій програмного керування і виконує рухові або керуючі функції. Головною частиною наземного роботизованого комплексу є маніпулятор. Він являє собою пристрій для виконання рухових функцій, аналогічних функціям руки людини. Маніпулятор має виконавчий орган – пристрій для виконання технологічних операцій (схват).

Стаціонарно встановлений наземний роботизований комплекс виконує операції перенесення та встановлення у відповідному місці деталей, обладнання, виконання окремих технологічних операцій таки як очищення об'єктів, фарбування та інші.

Наземний роботизований комплекс, як правило, являє собою робототехнічний комплекс, що включає систему переміщення (шасі) на якій встановлено маніпулятор з виконавчим органом, систему енергозабезпечення і керування. Наземні роботизовані комплекси виконують ряд спеціальних функцій. Це робота з небезпечними об'єктами, військові операції. Серед них: розвідка, розмінування, стрілецькі функції, тощо.

Наземні роботизовані комплекси виконують різноманітні операції. В залежності від цього формуються вимоги до характеру їх роботи та особливостей закону переміщення виконавчого органу. Основними функціями є маніпулювання об'єктами. Також наземні роботизовані комплекси виконують функцію переносу і установки об'єкта. Наземні роботизовані комплекси здійснюють різноманітні операції, зокрема перенос, установку, поворот деталей, інструменту, допоміжних матеріалів, різноманітних об'єктів, у тому числі небезпечних. Особливістю виконання даної функції є точне переміщення виконавчого органу наземного роботизованого комплексу на початку та в кінці цикла маніпулювання. Вид траєкторії та закон руху виконавчого органу вибирається із умови забезпечення

мінімального часу переміщення або обмеження на пришвидшення виконавчого органу робота при його русі.

Розглянемо особливості функції наземних роботизованих комплексів по забезпеченню заданих просторових законів руху виконавчого органу. Вони реалізовані в технологічному обладнанні для маніпулювання пристроями чищення (щітками, соплами для формування струменів миючих засобів), маніпулювання електричними, електромеханічними та логістичними об'єктами, маніпулювання пристроями для обдува, полива, фарбування, а також роботи з небезпечними об'єктами.

Особливістю функціонування даних систем є реалізація необхідних законів руху виконавчого органу робота. При цьому точність початкового і кінцевого положення не регламентується.

Важливою є функція по забезпеченню точного руху виконавчого органа на обмеженій (невеликій) ділянці загальної траєкторії. Дані функції реалізуються в обладнанні для маніпулювання об'єктами при збиранні вузлів, сортування деталей та їх правильного розташування. Також реалізується обладнання для маніпулювання універсальним ручним інструментом: ключі, викрутки, засуви, фіксатори, тощо.

Розглянута функція має своєю особливістю забезпечення переміщення виконавчого органу робота в невеликих межах зміни його положення.

Наземні роботизовані комплекси є поширеним технологічним обладнанням. Світове виробництво універсальних наземних роботизованих комплексів сягає 1,5...3,0 млн. в рік. Виробництво наземних роботизованих комплексів зосереджено в технічно розвинених країнах. Наявна інформація про фірми виробники та кількість виготовлених наземних роботизованих комплексів за рік: Yaskawa (300 000 шт.), Fanuc (250000 шт.), ABB (250000 шт.), Kawasaki (120000 шт.), Hachi Fujikoshi (100000 шт.), Denso (80000 шт.), Kuka (80000 шт.), Epson (45000 шт.), Comau (32000 шт.), Adept (25000 шт.).

Виробництво наземних роботизованих комплексів спеціального призначення налагоджено у США, Німеччині, Франції, Японії, Китаї, Росії. В Україні розроблені окремі дослідні зразки наземних роботизованих комплексів такого типу [30-32].

Наявність значного числа конструктивних рішень наземних роботизованих комплексів ставить задачу аналізу відомих та розроблення нових наземних роботизованих комплексів, зокрема розроблення конструкторської документації на наземні роботизовані комплекси. Для цього необхідні знання принципів побудови наземних роботизованих комплексів, основ розрахунку їх геометричних, кінематичних та динамічних характеристик, елементів конструювання роботів; вміння здійснити геометричний, кінематичний і динамічний аналіз та проектні розрахунки (синтез) типових представників наземних роботизованих комплексів; компетенції практичної роботи по аналізу конструкції і функціональних можливостей роботів та їх вузлів, проектних розрахунків і конструювання наземних роботизованих комплексів різного виду.

Для вирішення поставлених задач необхідно здійснити: класифікацію, визначити типи і технічні характеристики наземних роботизованих комплексів; геометричні

співвідношення в механізмах наземних роботизованих комплексів, робочий простір; конструкції основних вузлів; робочі органи наземних роботизованих комплексів; закони маніпулювання, точність наземних роботизованих комплексів; кінематичний аналіз маніпуляторів наземних роботизованих комплексів; динаміку маніпуляторів наземних роботизованих комплексів; пристрої керування наземних роботизованих комплексів; інформаційні системи наземних роботизованих комплексів; вирішити питання реалізації наземних роботизованих комплексів різного виду.

В даний час сформована ідеологія конструювання стаціонарних наземних роботизованих комплексів із вибором раціональних схемних і конструктивних рішень.

Розглянемо типовий наземний роботизований комплекс KUKA KR1000 (рис. 2.1).

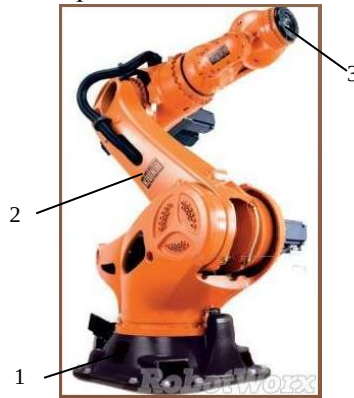


Рис. 2.1. Типовий маніпулятор наземного роботизованого комплексу:

1 – основа; 2 – маніпулятор; 3 – виконавчий орган

Основними складовими наземного роботизованого комплексу є стаціонарна сервісна частина 1(основа) з джерелом живлення. На ній встановлено маніпулятор 2 з приводами. На кінці маніпулятора встановлено виконавчий орган 3 (схват). Рух вузлів і деталей робота забезпечує система керування. В літературних джерелах та мережі інтернет наведена класифікація, визначено типи і технічні характеристики наземних роботизованих комплексів. Введені основні класифікаційні ознаки, зокрема : кількість маніпуляторів (1м, 2м, ...); число ступенів вільності (1м3); тип робочої зони маніпулятора (плоска, циліндрична, просторова); вантажопідйомність маніпулятора, тощо.

Наземні роботизовані комплекси розрізняються на серії по виду вантажопідйомності: надлегка серія 0,1...кГс (1...10Н); середня 1,6...100 кГс (16...1000Н); важка 100...1000 кГс (1000...10000Н); надважка більше 1000 кГс (10000Н).

В промислових роботах застосовуються різні типи приводів і систем керування: електромеханічні, пневматичні, гідравлічні, комбіновані. Важливою характеристикою наземних роботизованих комплексів є точність. Встановлено чотири класи точності маніпулятора наземного роботизованого комплексу – 0, 1, 2, 3. Класи

відповідають відносній похибці позиціювання: кл  $0 \rightarrow 0,01\%$ ,  $1 \rightarrow 0,01 \dots 0,05\%$ ,  $2 \rightarrow 0,05 \dots 0,1\%$ ,  $3 > 0,1\%$ .

Наземні роботизовані комплекси розрізняються за ступенем захисту: нормальне, пилозахищене, водозахищене.

Наявні наземні роботизовані комплекси розрізняються по виду схемних рішень на роботи з розімкненими кінематичними ланцюгами та роботи із паралельними кінематичними ланцюгами. В основному використовуються роботи із розімкненими кінематичними ланцюгами. Вони будуються за різними схемами із реалізацією переміщень у різних системах координат [19]. Наземний роботизований комплекс порталного типу забезпечує переміщення виконавчого органа в декартовій прямокутній системі координат  $x, y, z$  (рис. 2.2).

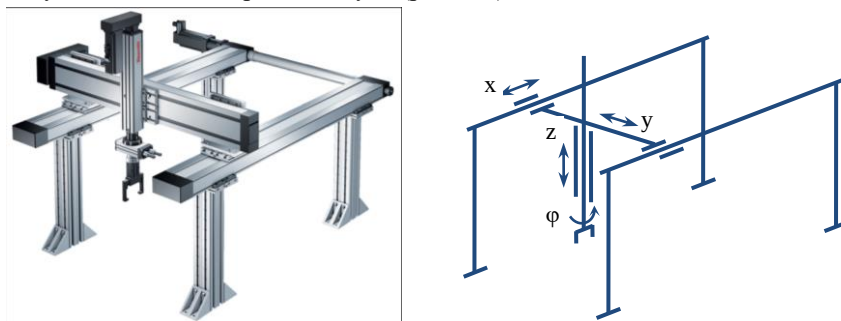


Рис. 2.2. Наземний роботизований комплекс порталного типу в якому реалізовані рухи в напрямках вісей декартової прямокутної системи координат  $x, y, z$

Даний наземний роботизований комплекс має три приводи поступальних переміщень. В конструкції робота додатково реалізована четверта регульована координата  $\phi$  у вигляді повороту схвата навколо вісі  $z$ .

Роботи порталного типу застосовуються в складі робототехнічних комплексів металообробки, в логістичних системах та інших. Роботи, що реалізують переміщення виконавчого органа в циліндричній системі координат  $z, R, \phi$  мають два приводи поступального руху та один привід обертального руху (рис. 2.3).

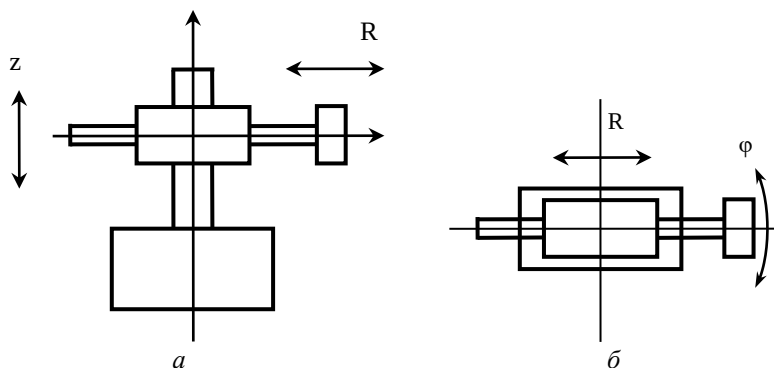


Рис. 2.3. Схема маніпулятора робота, що реалізує рухи в циліндричній системі координат:  $a$  – вид збоку;  $b$  – вид згори

Аналогічно побудовано робот, що реалізує переміщення у сферичній системі координат (рис. 2.4).

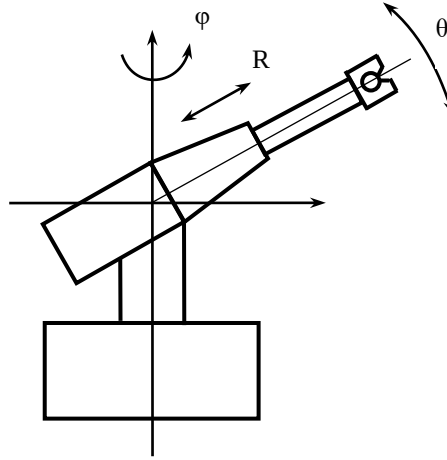


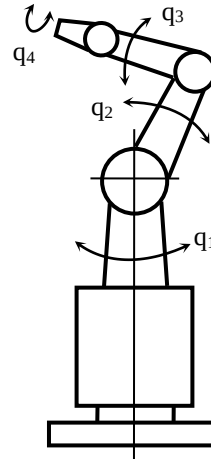
Рис. 2.4. Схема маніпулятора робота, що реалізує переміщення виконавчого органу визначені у сферичній системі координат  $R$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$

Конструктивне рішення даного робота включає один привід поступального руху та два приводи поворотного руху.

Найбільш поширеними схемними і конструктивними рішеннями є роботи важільного типу, що визначають положення виконавчого органу в спеціальній системі координат (рис. 2.5).



а



б

Рис. 2.5. Наземний роботизований комплекс важільного типу в якому реалізується спеціальна система координат: а – загальний вид; б – принципова схема

Положення виконавчого органу задається змінами кутових координат важелів  $q_1, q_2, \dots, q_4$ .

Наведені схемні рішення роботів мають розімкнені кінематичні ланцюги. В них дія вхідних координат  $q_i$  є незалежною. В роботах з паралельними кінематичними структурами положення виконавчого органу визначається спільною дією всіх кінематичних ланцюгів [12,72,93]. Реалізовані роботи з трьома штангами змінної довжини (рис. 2.6).

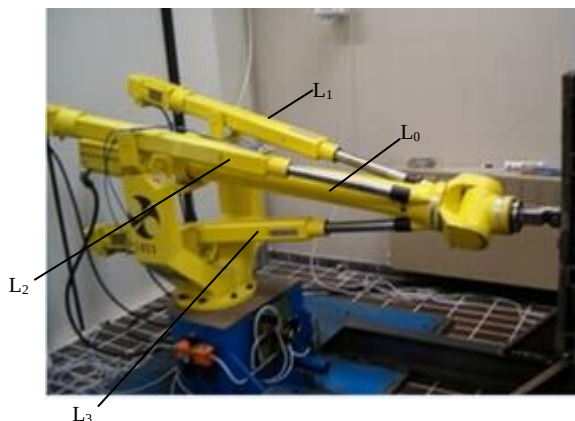


Рис. 2.6. Робот з паралельними кінематичними зв'язками, що має три штанги змінної довжини, побудований по схемі механізму-трипода

Робот має центральну штангу, яка встановлюється в необхідному положенні і має один привід поступального руху та два приводи поворотного руху. Дані приводи встановлюють кінець штанги в необхідне положення визначене у сферичній системі координат  $q_1=L_0, q_2=\varphi, q_3=\theta$ . Три штанги змінної довжини забезпечують поворот виконавчого органу відповідно змінам координат  $q_4=L_1, q_5=L_2, q_6=L_3$ .

Робот гексапод має шість штанг змінної довжини і забезпечує необхідне просторове положення платформи в просторі (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Робот на основі механізму з паралельними кінематичними зв'язками реалізований по схемі механізму-гексапода



Поширеними конструкціями роботів з паралельними кінематичними зв'язками є роботи побудовані по схемі дельта [88] (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Наземний роботизований комплекс з паралельними кінематичними зв'язками побудований по схемі дельта

Він має приводи поворотного руху 1, які встановлюють необхідне положення штанг 2 та виконавчого органу.

Для виконання спеціальних задач використовуються наземні роботизовані комплекси, що мають ланцюг однотипних елементів із приводами поворотного руху. Таку конструкцію має наземний роботизований комплекс ModuMan 100 розроблений фірмою Moog в 2013 р. Він призначений для утилізації ядерних об'єктів, проведення робіт з радіоактивними або біологічно небезпечними матеріалами, у тому числі, у недоступних зонах. Маніпулятор має вантажопідйомність до 100 кг (1000 Н) при довжині близько 2,3 м (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Наземний роботизований комплекс у вигляді ланцюгової конструкції складеної із окремих однотипних елементів з поворотними приводами

Передбачені різні варіанти керування, зокрема, ручний, з запам'ятовуванням траєкторії і запобіганням зіткнень. До складу маніпулятора входять приводи, датчики, сервоконтролери і програмно-математичне забезпечення. Всі елементи керування розташовані поза небезпечною зоною.

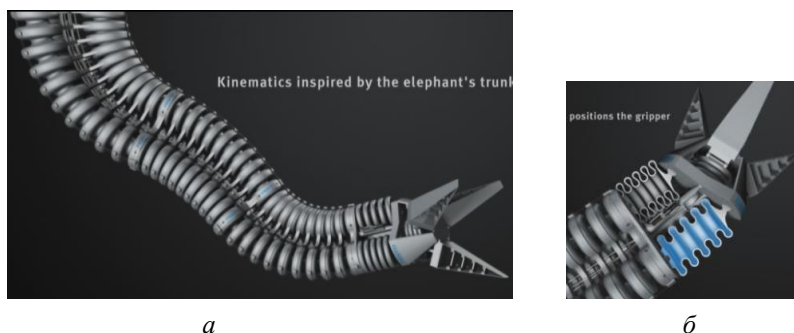
Останнім часом знайшли застосування багатоланкові наземні роботизовані комплекси. Для системи зарядки електромобіля застосовано багатокоординатні роботи складені із окремих послідовно з'єднаних елементів (рис. 2.10).



*Рис. 2.10. Робот консольного типу у вигляді ланцюга послідовно з'єднаних елементів*

Багатоланкові наземні роботизовані комплекси виконуються із значною кількістю ланок. Розширенням роботів даного типу є пристрій із гнучким маніпулятором в якому число ланок є нескінченно великим.

Застосовуються конструкції маніпуляторів із гнучкими елементами і сильфонними приводами (рис. 2.11).



*Рис. 2.11. Маніпулятор із гнучкими елементами і сильфонними пружними приводами (а) та робочий орган маніпулятора (б)*

Пружні елементи і приводи застосовуються в конструкціях маніпуляторів [71]. Перспективним є використання шлангових пневмодвигунів (пневмом'язів) у якості приводів маніпуляторів [44] (рис. 2.12).



*Рис. 2.12. Наземний роботизований комплекс фірми FESTO з приводами у вигляді шлангових пневмодвигунів*

Подібні роботи широко розвиваються. Вони призначені для роботи в екстремальних умовах, мають потужний інтелектуальний блок керування. Дані системи використовуються для вирішення практичних задач маніпулювання об'єктами.

## 2.2. Технічні характеристики маніпуляторів важільного типу

Найбільш поширеним видом маніпуляторів є маніпулятори важільного типу. Вони застосовуються як в стаціонарних, так і в мобільних промислових роботах. Фірма KUKA випускає широку гаму наземних роботизованих комплексів важільного типу. Серед них роботи легкого і надлегкого класів (рис. 2.13).



*Рис. 2.13. Роботи фірми KUKA віднесені до легкого і надлегкого класів:  
а – робот серії KR 16-2; б – робот серії KR AGILUS*

Типовим представником маніпуляторів наземних роботизованих комплексів важкого класу є універсальний робот (рис. 2.14).

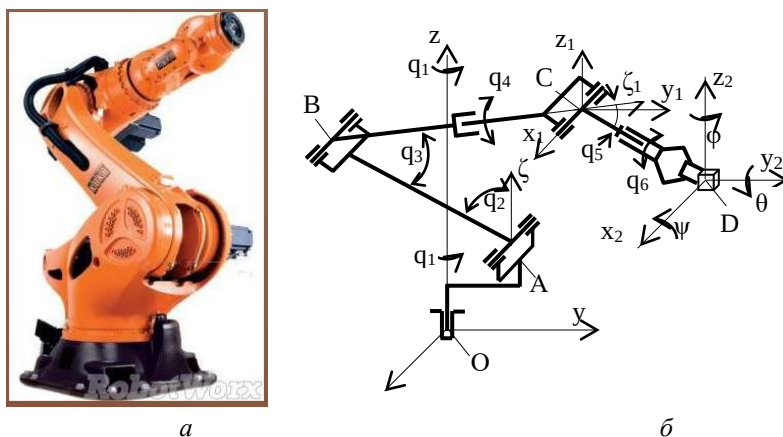


Рис. 2.14. Маніпулятор наземного роботизованого комплексу KUKA KR 1000:  
а – загальний вигляд; б – принципова кінематична схема

Робот має шість керованих координат. Вантажопідйомність 1000кГс (10000Н). Точність позиціонування  $\pm 0,2$  мм відповідає класу точності 0. Маса робота складає 4690 кг. Діапазони змін керованих координат  $q_1$ ,  $q_4$ ,  $q_6$  складають  $300 \dots 350^\circ$ , а зміни керованих координат  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_5$  знаходяться в межах  $120 \dots 175^\circ$ . Максимальна швидкість зміни керованих координат складає близько 1 рад/с ( $50 \dots 60$  град/с).

Робот має значний робочий простір (рис. 2.15).

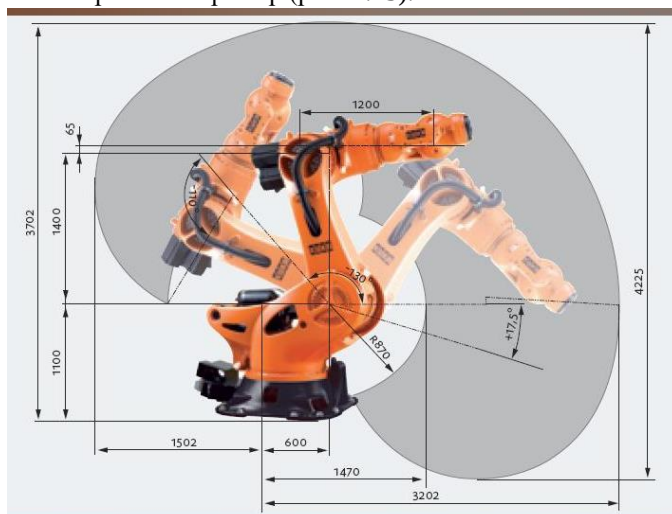


Рис. 2.15. Робочий простір маніпулятора робота KUKA KR 1000

Роботи середнього класу (рис. 2.16) допускають можливість високоточного маніпулювання об'єктами.

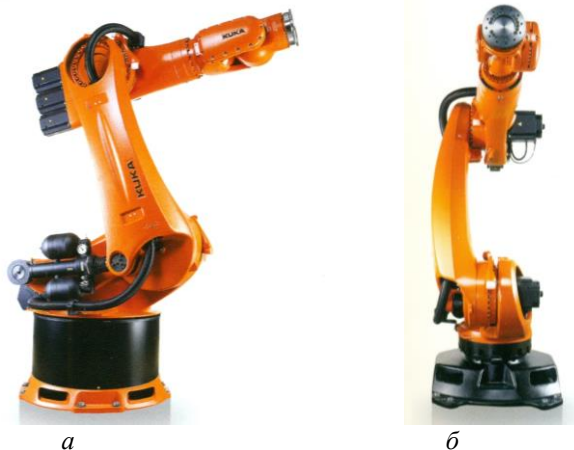


Рис. 2.16. Загальний вигляд робота середнього класу виробництва фірми KUKA: а – робот KR 3603; б – робот KR AGILUS

Робот KR 16-2 має зменшений по габаритам маніпулятор. Він має компактну конструкцію і потребує незначне за площею місце встановлення. Робот має значний робочий простір. Може працювати в обмежених об'ємах. Робот KR AGILUS має підвищені швидкості переміщення. Може виконуватись у волого- або водостійкому варіантах.

Дані роботи мають вантажопідйомність 200...600 кгс. При цьому точність позиціонування об'єктів знаходиться в межах  $\pm 0,08$  мм. Роботи характеризуються незначним розсіюванням при багатократному виході виконавчого органу робота в позицію. Дані роботи мають високі динамічні показники. Вузли забезпечують високу жорсткість конструкції при мінімальній масі та досконалому дизайні.

Роботи консольного виконання мають робочий простір значна частина якого знаходиться нижче основи робота (рис. 2.17).



Рис. 2.17. Робот консольного виконання KR QUANTEC K

Промислові роботи фірми KAWASAKI BX200L та BX100N мають ідентичну конструкцію, але відрізняються вантажопідйомністю (рис. 2.18).

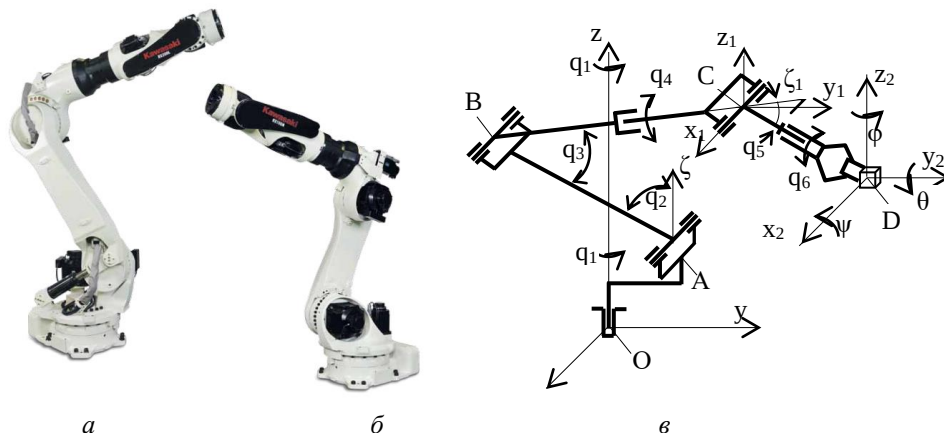


Рис. 2.18. Наземні роботизовані комплекси BX200L (а) та BX100N (б) і їх кінематична схема (в)

Роботи побудовані за важільною схемою і мають по шість керованих координат. Вантажопідйомність роботів Kawasaki BX200L та BX100N складає 200кГс (2000 Н) та 100кГс (1000 Н) відповідно. Маса роботів складає 930 кг та 740 кг. Точність позиціонування виконавчого органу роботів знаходиться в межах  $\pm 0,2$  мм. Максимальна лінійна швидкість об'єкта маніпулювання 5 м/с.

Діапазони зміни керованих координат робота BX200L складають:

$$q_1 = \pm 160^\circ, q_2 = +76 \dots -60^\circ, q_3 = +90 \dots -75^\circ, q_4 = \pm 210^\circ, q_5 = \pm 125^\circ, q_6 = \pm 210^\circ.$$

При цьому забезпечується швидкість відпрацювання керованих координат в межах:

$$\dot{q}_1 = \pm 105 \text{ град/с}, \dot{q}_2 = 90 \text{ град/с}, \dot{q}_3 = 100 \text{ град/с}, \dot{q}_4 = \dot{q}_5 = 120 \text{ град/с}, \dot{q}_6 = 200 \text{ град/с}.$$

Регламентовані моментні навантаження на привод керованих координат  $q_4, q_5, q_6$  складають відповідно:

$$M_4 = 1334 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_5 = 1334 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_6 = 588 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Моменти інерції рухомих вузлів відповідних координатам  $q_4, q_5, q_6$  складають:  $I_4 = 199,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; I_5 = 199,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; I_6 = 154,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Для робота меншої вантажопідйомності BX100N діапазони зміни керованих координат складають:

$$q_1 = \pm 160^\circ, q_2 = +120 \dots -65^\circ, q_3 = +90 \dots -77^\circ, q_4 = \pm 210^\circ, q_5 = \pm 125^\circ, q_6 = \pm 210^\circ.$$

При цьому забезпечується швидкість керованих координат в діапазонах:

$$\dot{q}_1 = 135 \text{ град/с}, \dot{q}_2 = 110 \text{ град/с}, \dot{q}_3 = 140 \text{ град/с}, \dot{q}_4 = \dot{q}_5 = 200 \text{ град/с}, \dot{q}_6 = 300 \text{ град/с}.$$

Моментні навантаження в приводах керованих координат  $q_4, q_5, q_6$  складають

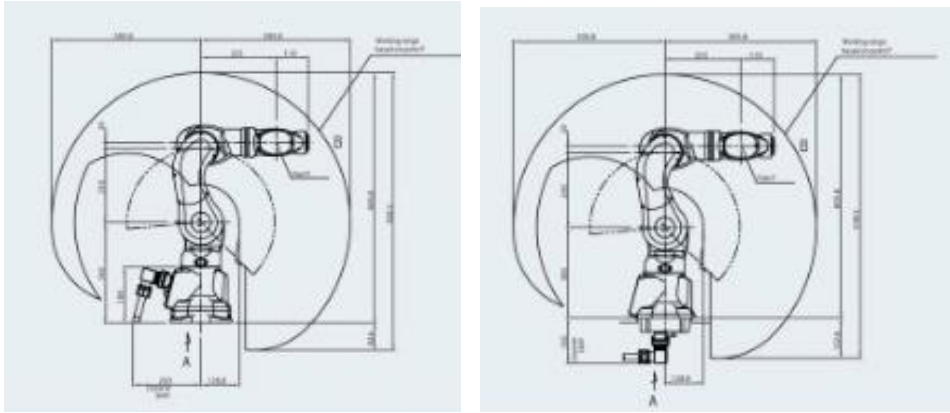
$$M_4 = M_5 = 588,4 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_6 = 294,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Моменти інерції рухомих вузлів відповідних координатам  $q_4, q_5, q_6$ :

$$I_4=I_5=60 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$I_6=30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Робочі простори роботів відповідають ділянкам між охоплюючою і охоплюваною сферами (рис. 2.19).

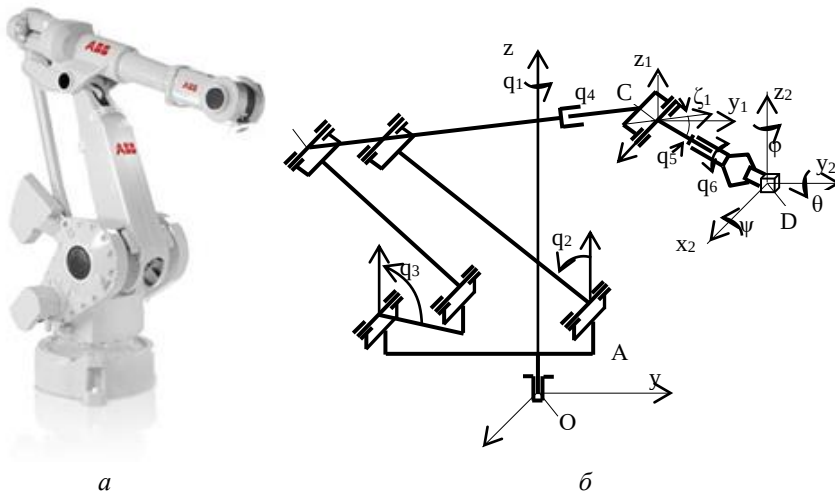


а

б

Рис. 2.19. Робочі простори роботів Kawasaki BX200L (а) та BX100N (б)

Універсальний робот IRB 4400-60 фірми ABB має паралелограмний механізм в системі основного важеля (рис. 2.20).



а

б

Рис. 2.20. Наземний роботизований комплекс IRB 4400-60:  
а – загальний вигляд; б – кінематична сема (орієнтовна)

Робот має шість керованих координат. Вантажопідйомність робота залежить від розташування робочого органу в межах робочого простору (рис. 2.21).



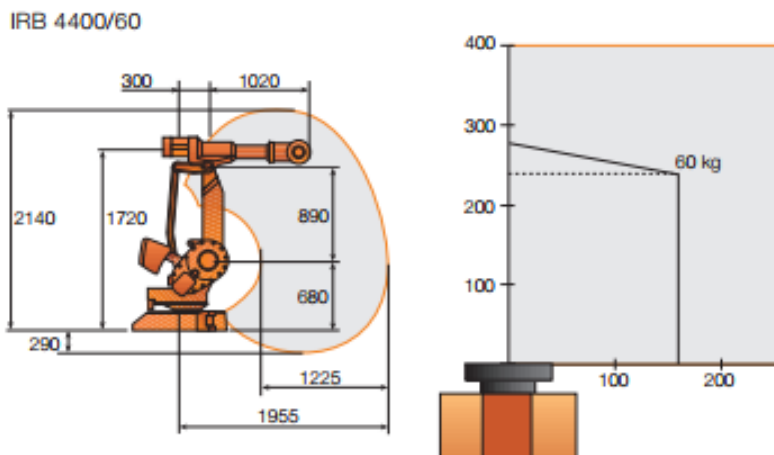


Рис. 2.21. Вантажопідйомність маніпулятора в межах робочого простору

На межах робочого простору вантажопідйомність складає 350, 150, 50 Н.

Точність позиціонування робота при незначних швидкостях складає 0,19 мм. При підвищених швидкостях (понад 1,6 м/с) похибки позиціонування збільшується до 0,56 мм. Маса робота складає 1040кг. При роботі має місце помірний рівень шуму (до 70 дБ).

Робот має тороподібний робочий простір (рис. 2.22).

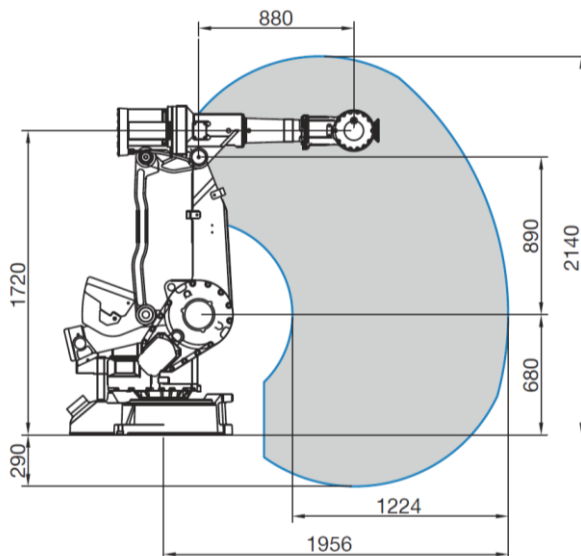


Рис. 2.22. Робочий простір наземного роботизованого комплексу IRB 4400/60

Наземний роботизований комплекс фірми COMAUSmart 5NI16-40-60series має несиметричну важільну систему (рис. 2.23).

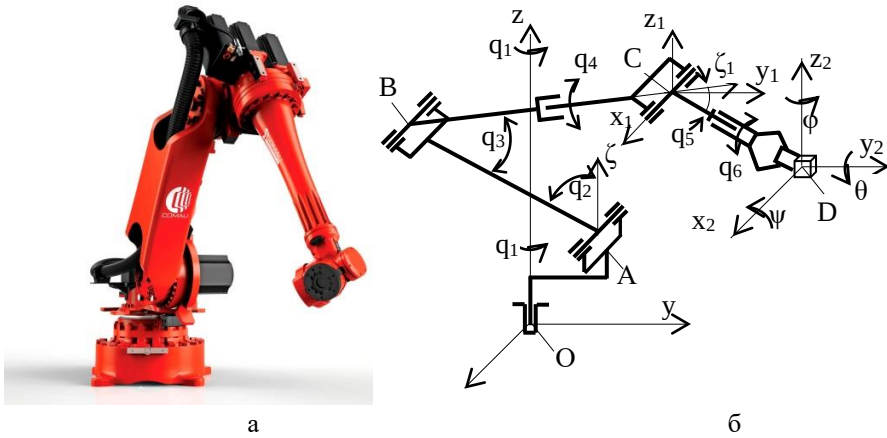


Рис. 2.23. Наземний роботизований комплекс COMAUSmart 5NI16-40-60series: а – загальний вигляд; б – кінематична схема

Робот має шість керованих координат. Його вантажопідйомність 40 кГс (400Н). Точність позиціонування робочого органу 0,06 мм. Робот призначено для виконання наступних операцій: плазмове різання, обробка, пакування, лазерне різання, дугове зварювання, лазерне зварювання, автоматизація операцій для складання та випробування вузлів і деталей машин.

Наземний роботизований комплекс середньої вантажопідйомності Mottoman MH50-35 фірми Yaskawa Robotics має важільну конструкцію із приводами поворотного руху (рис. 2.24).

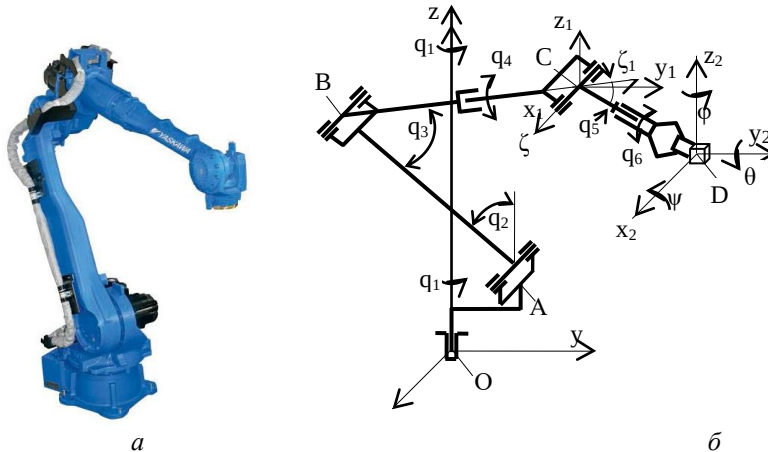


Рис. 2.24. Наземний роботизований комплекс Mottoman MH50-35: а – загальний вигляд; б – кінематична схема

Робот має шість керованих координат. Вантажопідйомність робота 35 кГс (350Н). Робот відзначається високою точністю позиціювання  $\pm 0,07$  мм. Загальна маса робота 570 кг. Діапазони зміни керованих координат робота складають:

$q_1 = \pm 180^\circ$ ,  $q_2 = +135 \dots -90^\circ$ ,  $q_3 = +296 \dots -160^\circ$ ,  $q_4 = \pm 360^\circ$ ,  $q_5 = \pm 125^\circ$ ,  $q_6 = \pm 360^\circ$ .

Швидкість зміни керованих координат є достатньо високою і складає:

$\dot{q}_1 = 180 \text{ град/с}$  (3,14 рад/с),  $\dot{q}_2 = 140 \text{ град/с}$  (2,44 рад/с),  $\dot{q}_3 = 178 \text{ град/с}$  (3,11 рад/с),

$\dot{q}_4 = 250 \text{ град/с}$  (4,36 рад/с),  $\dot{q}_5 = 250 \text{ град/с}$  (4,36 рад/с),  $\dot{q}_6 = 360 \text{ град/с}$  (6,28 рад/с).

Робот має значний робочий простір (рис. 2.25).

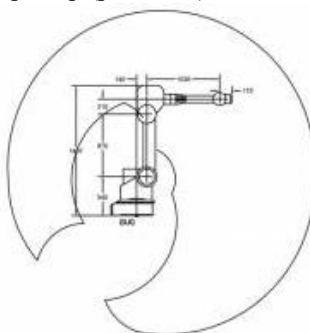


Рис. 2.25. Робочий простір робота МН 50-35

Різноманітні конструкції важільних роботів випускаються фірмою FANUC. Вони утворюють типорозмірний ряд. Він об'єднаний у кілька груп. Роботи, які мають незначну вантажопідйомність включають наступний ряд серій (рис. 2.26).



а

LR Mate 200iD/4SH

LR Mate 200iD/4S

LR Mate 200iD/4SC

LR Mate 200iD/7H

LR Mate 200iD/7C

LR Mate 200iD/7WP

LR Mate 200iD

LR Mate 200iD/7L

LR Mate 200iD/7LC

б

Рис. 2.26. Типові представники серії малих роботів LR Mate: а – загальний вигляд; б – модельний ряд

Роботи мають вантажопідйомність 40...70 Н; точність позиціювання  $\pm 0,02$  мм при загальній масі робота 20...27 кг. Число керованих координат складає 5...6.

Характерним представником роботів важільного типу є наземний роботизований комплекс FANUC LR Mate 200iC/5HS (рис. 2.27).

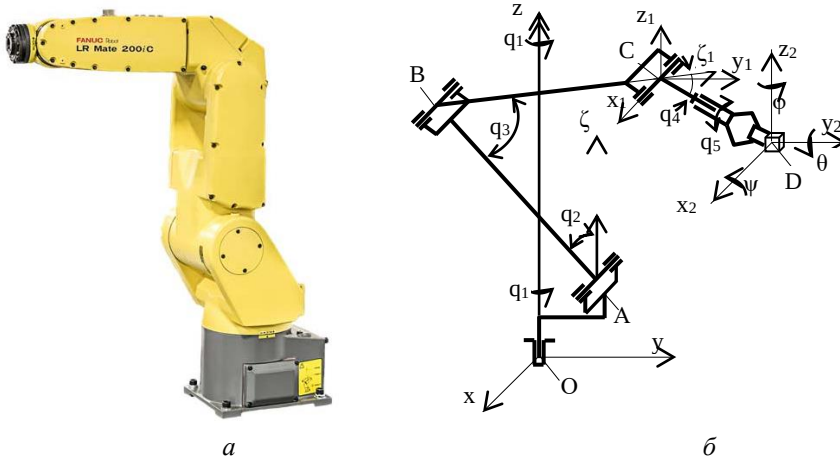


Рис. 2.27. Наземний роботизований комплекс FANUC LR Mate 200iC/5HS:  
а – загальний вигляд; б – кінематична схема

Робот має 5 керованих координат. Вантажопідйомність робота 5 кГс (50Н). Точність позиціонування робочого орган  $\pm 0,2$  мм. Маса робота складає 25 кг. Діапазони зміни керованих координат складають:

$$q_1 = \pm 340^\circ, \quad q_2 = \pm 200^\circ, \quad q_3 = \pm 380^\circ, \quad q_4 = \pm 240^\circ, \quad q_5 = \pm 720^\circ.$$

Швидкість зміни керованих координат складає:

$$\dot{q}_1 = 350 \text{ град/с (6,11 рад/с)}, \quad \dot{q}_2 = 350 \text{ град/с (6,11 рад/с)}, \quad \dot{q}_3 = 400 \text{ град/с (6,98 рад/с)}, \\ \dot{q}_4 = 450 \text{ град/с (7,85 рад/с)}, \quad \dot{q}_5 = 1200 \text{ град/с (20,94 рад/с)}.$$

Робот має робочий простір, що відповідає поверхні близькій до сферичної (рис. 2.28).

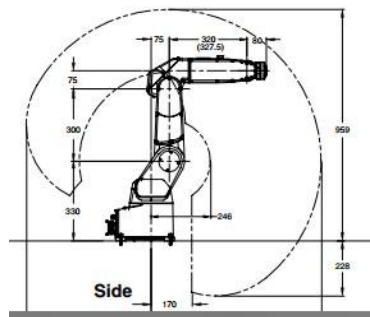


Рис. 2.28. Робочий простір наземного роботизованого комплексу FANUC LR Mate 200iC/5HS

Роботи серії М-430 фірми FANUC мають вантажопідйомність 20...40 Н при габариті робочого простору 900 мм. Роботи даної серії мають компактну конфігурацію (рис. 2.29).



Рис. 2.29. Наземний роботизований комплекс М-430iA/4FH (а) та представники даної серії (б)

Максимальна кутова швидкість переміщення важелів даних роботів складає: 300...500 град/с. Точність позиціонування складає:  $\pm 0,5$  мм.

Роботи серії М-10 (рис. 2.30) мають вантажопідйомність 70...120Н.



Рис. 2.30. Типовий представник серії М-10 робот М-10iA/12 (а) та модельний ряд роботів даної серії (б)

Габарити робочого простору даної серії роботів складають 1600...2000 мм при точності позиціонування  $\pm 0,08$  мм. Маса роботів 130 кг. Кутова швидкість переміщення важелів має порядок 250 град/с.

Роботи серії М-20 мають вантажопідйомність 120...350Н і побудовані по традиційній важільній схемі (рис. 2.31).



а

M-20iA/12L

M-20iA/20T

M-20iA

M-20iB/25

M-20iA/20M, /35M

M-20iA/20MT, /35MT

б

Рис. 2.31. Загальний вигляд типового представника серії робота M-20iA (а) та модельний ряд роботів (б)

Габарити робочого простору роботів у серії складають 1600...2000 мм, маса роботів 180...250 кг. Роботи серії мають 6 ступенів вільності. При цьому кутова швидкість руху важелів сягає 200...400 град/с.

Роботи серії M-410 мають паралелограмну важільну систему (рис. 2.32).



а

M-410iB/140H

M-410iB/450, /700

M-410iC/185, /315

б

Рис. 2.32. Загальний вигляд типового представника серії M-410 наземного роботизованого комплексу M-410iC/185 (а) та моделі роботів (б)

Маса роботів даної серії складає 1200-2700 кг. Вантажопідйомність роботів складає 140, 185, 375, 450, 700 кг. Точність позиціонування виконавчого органу складає  $\pm 0,2 \dots \pm 0,5$  мм, а кутова швидкість повороту важелів 60...140 град/с.

Роботи серії M-710 мають традиційну важільну конструкцію (рис. 2.33).



Рис. 2.33. Загальний вигляд робота M-710iC/50 (а) та модельний ряд роботів серії M-710 (б)

Роботи даної серії мають вантажопідйомність 12...70 кГс при масі близько 500 кг. Точність позиціонування даних роботів складає  $\pm 0,07... \pm 0,15$  мм, а максимальна кутова швидкість важелів 120...180 град/с.

Роботи серії M-900 мають окремі підтримуючі важелі (рис. 2.34).



Рис. 2.34. Представник серії M-900 наземний роботизований комплекс M-900iB/700 (а) та модельний ряд роботів (б)

Вантажопідйомність роботів у серії складає: 150; 200; 280; 340; 400; 700 кГс при габаритах робочого простору близько 3000 мм. Маса робота даної серії 2000...3000 кг. Точність позиціонування  $\pm 0,3$  мм. Максимальна кутова швидкість важелів 90...120 град/с.

Роботи серії M-2000 мають вантажопідйомність 900...2300 кГс (рис. 2.35).





Рис. 2.35. Типовий робот серії M-2000 вантажопідйомністю 1700 кгс моделі M-2000iA/1700L (а) та модельний ряд серії (б)

Габарит робочого простору роботів у серії складає 3700...4700 мм. Маса роботів 8600...12500 кг. Точність позиціонування  $\pm 0,5$  мм. Максимальна кутова швидкість повороту важелів складає 14...50 град/с.

Універсальний наземний роботизований комплекс фірми DENSO VS-060 реалізує традиційну важільну схему (рис. 2.36).

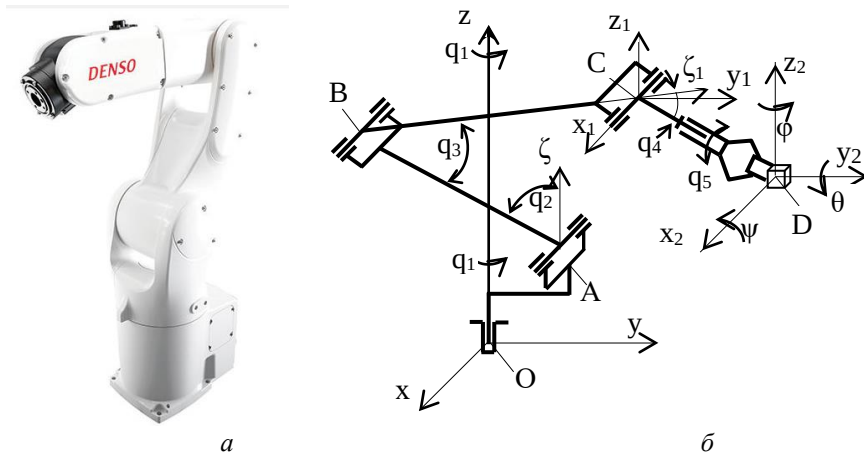


Рис. 2.36. Наземний роботизований комплекс DENSO VS-060: а – загальний вигляд; б – кінематична схема

Вантажопідйомність робота 4 кгс (40Н). Точність позиціонування 0,02 мм.

Значною швидкістю рухів відзначається наземний роботизований комплекс Motoman MN3BM фірми Yaskawa Robotics (рис. 2.37).

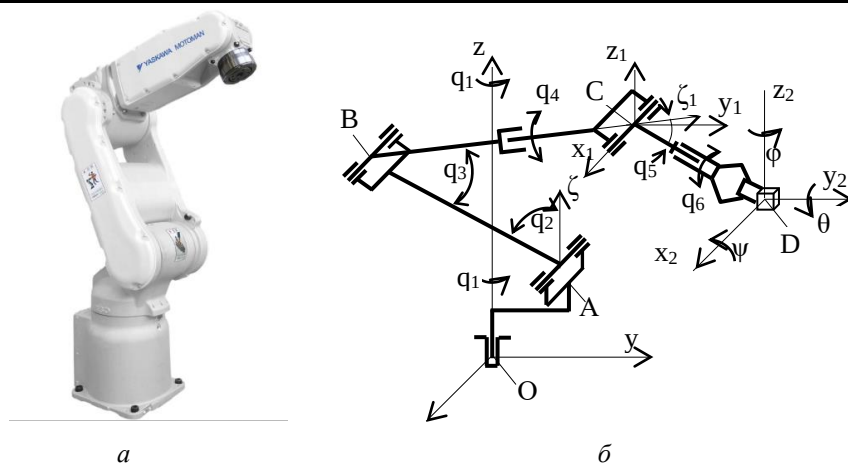


Рис. 2,37. Наземний роботизований комплекс Motoman МНЗВМ:

а – загальний вигляд; б – кінематична схема

Робот має шість керованих координат. Вантажопідйомність робота 3кГс (30Н). Точність позиціювання виконавчого органу складає  $\pm 0,03$  мм. Загальна маса робота складає 27 кг. Відношення маси об'єкта маніпулювання до маси робота складає:  
 $\mu = 3/27 = 0,11$ .

Діапазони зміни керованих координат робота складають:

$q_1 = \pm 180^\circ$ ,  $q_2 = +90 \dots -85^\circ$ ,  $q_3 = \pm 260 \dots -105^\circ$ ,  $q_4 = \pm 170^\circ$ ,  $q_5 = \pm 120^\circ$ ,  $q_6 = \pm 360^\circ$ .

Швидкість зміни керованих координат знаходиться в межах 2,5-7 рад/с і складає:

$\dot{q}_1 = 310 \text{ град/с}$  (5,41 рад/с),  $\dot{q}_2 = 150 \text{ град/с}$  (2,62 рад/с),

$\dot{q}_3 = 190 \text{ град/с}$  (3,32 рад/с),  $\dot{q}_4 = 300 \text{ град/с}$  (5,24 рад/с),

$\dot{q}_5 = 300 \text{ град/с}$  (5,24 рад/с),  $\dot{q}_6 = 420 \text{ град/с}$  (7,33 рад/с).

Робот має робочий простір близький до сферичного (рис. 2.38).

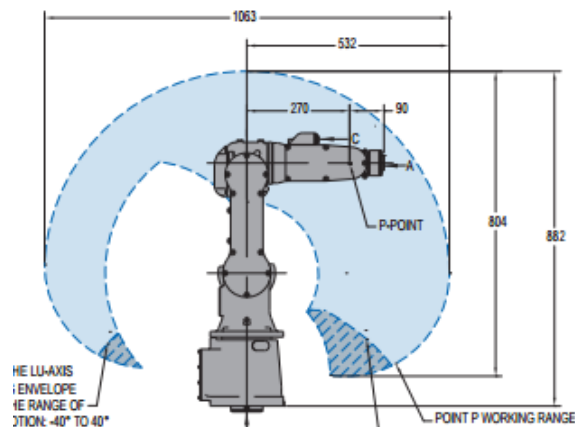


Рис. 2.38. Робочий простір робота Motoman МНЗВМ

Універсальний наземний роботизований комплекс TA-14000WGIII фірми Panasonic в основному призначено для виконання зварювальних робіт. Робот має традиційну важільну схему (рис. 2.39).

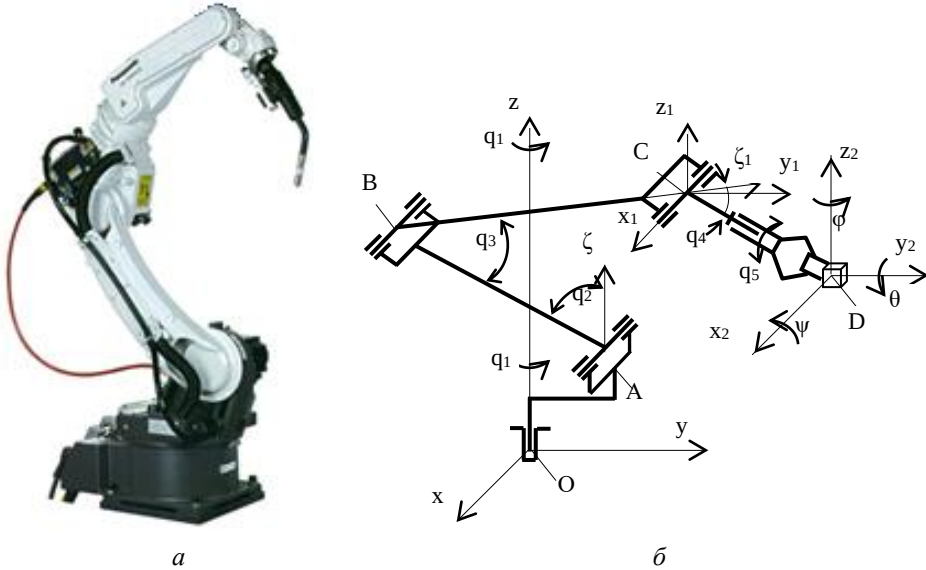


Рис. 2.39. Наземний роботизований комплекс TA-14000WGIII:

а – загальний вигляд; б – кінематична схема

Робот має шість керованих координат. Максимально допустима вантажопідйомність, 6 кг; Робоча зона: максимально припустима (2R), 2748 мм; мінімально припустима (2R), 704 мм; Точність позиціонування,  $\pm 0,1$  мм; маса маніпулятора – 161кг.

В [110] наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень маніпулятора із приводом мікропереміщень. (рис. 2.40).

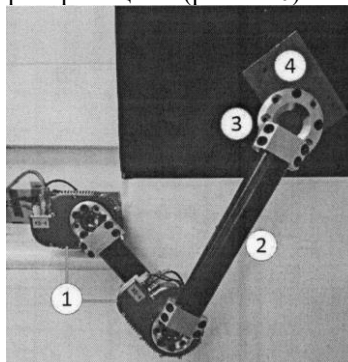


Рис. 2.40. Дослідний зразок наземного роботизованого комплексу з приводом мікропереміщень

Встановлені закономірності формування похибок при просторових переміщеннях виконавчого органу маніпулятора. Для цього використані матричні операторні моделі статичної і динамічної маніпуляції. Встановлені критерії мінімізації похибок шляхом їх компенсації за допомогою привода мікропереміщень із пружними елементами.

Визначені траєкторії переміщення виконавчого органу маніпулятора при ступінчастих змінах керованих координат. Підтверджено ефективність застосування приводів мікропереміщень для підвищення точності маніпулятора в статичному та динамічному режимах. Зроблено висновок про доцільність застосування приводу мікропереміщень в конструкції маніпулятора.

В інформаційних матеріалах [111] наведено результати теоретичних досліджень наземних роботизованих комплексів. Розглянута пряма і зворотня задачі кінематики наземного роботизованого комплексу і дано їх інтерпретацію (рис. 2.41).

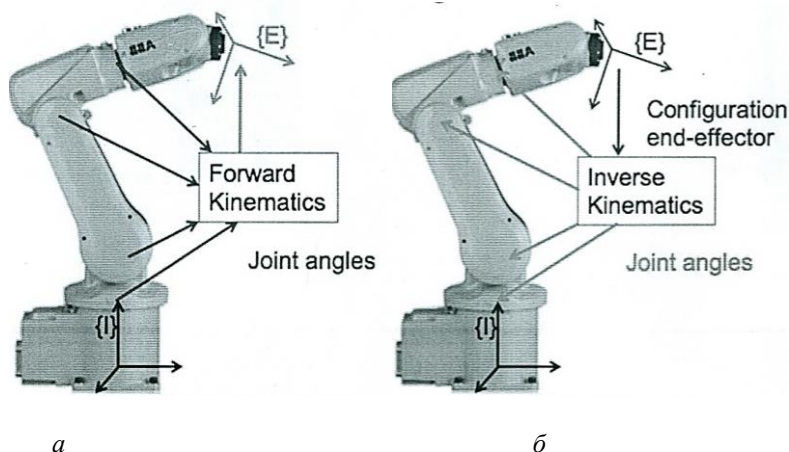


Рис. 2.41. Графічна інтерпретація розв'язку прямої (а) та зворотної (б) задачі кінематики наземного роботизованого комплексу

Розглянута проблема наявності сингулярних положень в маніпуляторах та методів їх досліджень. Для спрощених моделей наземних роботизованих комплексів (планарні моделі) визначені матриці Якобі. Для розв'язку зворотної задачі кінематики запропонована ітераційна процедура (рис. 2.42).

1.  $\mathbf{q} \leftarrow \mathbf{q}^0$  ▷ start configuration
2. while  $\|\chi_e^* - \chi_e(\mathbf{q})\| \geq \text{tol}$  ▷ while the solution is not reached
3.  $\mathbf{J}_{eA} \leftarrow \mathbf{J}_{eA}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \chi_e}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{q})$  ▷ evaluate Jacobian
4.  $\mathbf{J}_{eA}^+ \leftarrow (\mathbf{J}_{eA}(\mathbf{q}))^+$  ▷ compute the pseudo inverse
5.  $\Delta \chi_e \leftarrow \chi_e^* - \chi_e(\mathbf{q})$  ▷ find the end-effector configuration error vector
6.  $\mathbf{q} \leftarrow \mathbf{q} + \mathbf{J}_{eA}^+ \Delta \chi_e$  ▷ updated the generalized coordinates

Рис. 2.42. Ітераційна процедура для розв'язку зворотної задачі кінематики стосовно маніпулятора наземного роботизованого комплексу

В процедуру входить значення матриці Якобі. Вона обчислена для плоского важільного маніпулятора, що має три ступені вільності (рис. 2.43).

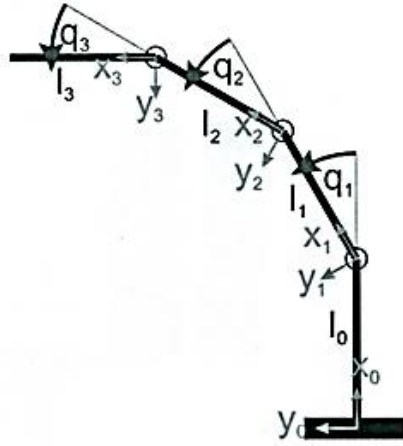


Рис. 2.43. Схема маніпулятора, що має три керовані координати

Для даного маніпулятора закон переміщення виконавчого органу визначено у вигляді:

$${}^0\mathbf{r}_{0E}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} l_0 + l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Матриця Якобі знайдена шляхом диференціювання і має вигляд:

$${}^0\mathbf{J}_{EP} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} {}^0\mathbf{r}_{0E}(\mathbf{q})$$

$$= \begin{bmatrix} -l_1 \sin(q_1) - l_2 \sin(q_1 + q_2) - l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) - l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) & -l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) & l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) & l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Роботи важільного типу є найбільш поширеними. Вони застосовуються як в стаціонарних, так і в мобільних роботах.

Мобільні наземні роботизовані комплекси, як правило, не вимагають високої точності маніпулятора, але мають жорсткі вимоги по масі маніпулювання. Даним умовам задовольняють механізми з паралельними кінематичними структурами: триподи, гексаподи, тощо. В даний час невідомі випадки застосування подібних пристроїв у мобільних роботах. В стаціонарних промислових роботах та іншому технологічному обладнанні дані пристрої мають обмежене застосування.

Нижче розглянуто технічні характеристики маніпуляторів на основі механізмів із паралельними кінематичними зв'язками.

### 2.3. Маніпулятори на основі механізмів із паралельними кінематичними структурами

Всі конструктивні схеми механізмів з паралельними кінематичними зв'язками розділено на дві групи: до першої групи віднесені повнопаралельні механізми, в яких кількість ступенів вільності робочого органу механізму дорівнює числу кінематичних ланок (штанг, які утворюють так звані І-координати та дорівнює кількості автономних приводів).

До другої групи віднесені механізми, в яких число ступенів вільності робочого органу більша, ніж число кінематичних ланок. При цьому одна кінематична ланка має один, два, а в деяких випадках і більше приводів [12,59,85].

Розрізняють механізми паралельної кінематики, які використовують штанги постійної довжини і механізми із штангами змінної довжини. Двохкоординатні механізми із штангами змінної довжини (біпод) та штангами постійної довжини (біглайд) забезпечують плоско-паралельне переміщення робочого органу в одній площині. На основі таких механізмів реалізовані прості конструкції наземних роботизованих комплексів, маніпуляторів та іншого технологічного обладнання.

Найбільш поширеними пристроями з паралельними кінематичними структурами є механізми з ланками змінної довжини: триподи і гексаподи. Маніпулятори наземних роботизованих комплексів побудовані по схемі механізма-трипода мають центральну штангу та три штанги змінної довжини (рис. 2.44).



Рис. 2.44. Загальний вигляд маніпулятора побудованого по схемі механізма-трипода

Зміна положення платформи робота відбуваються за рахунок зміни довжини і кута нахилу центральної штанги (три координати) та за рахунок зміни довжини трьох додаткових штанг. Робота механізма-трипода ілюструється схемою (рис. 2.45), де показана зміна поперечно-кутового положення платформи.

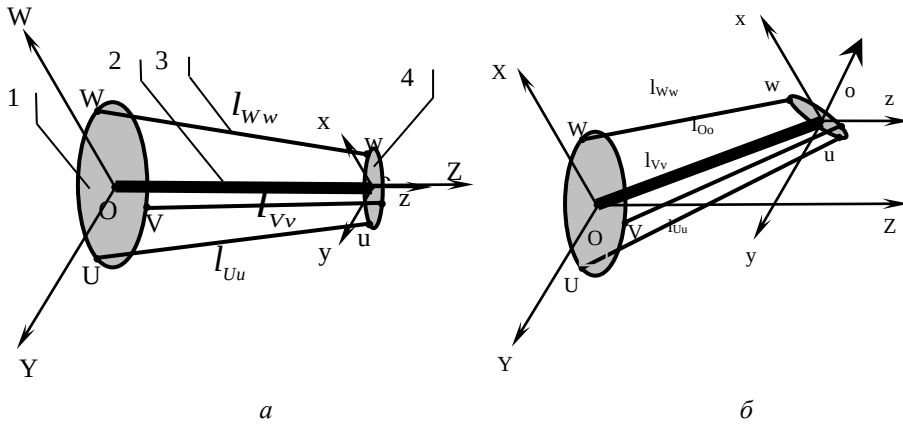


Рис. 2.45. Зміна поперечно-кутового положення платформи при зміні довжини штанг механізму-трипода: а – номінальне положення механізму; б – положення із зміщеною платформою

Центральна штанга 2 шарнірно з'єднана нерухомою основою 1 та рухомою платформою 4. Три штанги змінної довжини 3 забезпечують поворот платформи 4 відносно системи координат  $xyz$ . По схемі механізму-трипода реалізовано ряд варіантів технологічного обладнання. Зокрема, створені металорізальні верстати та мобільні наземні роботизовані комплекси.

Центральна штанга встановлюється вертикально або під кутом (рис. 2.46).

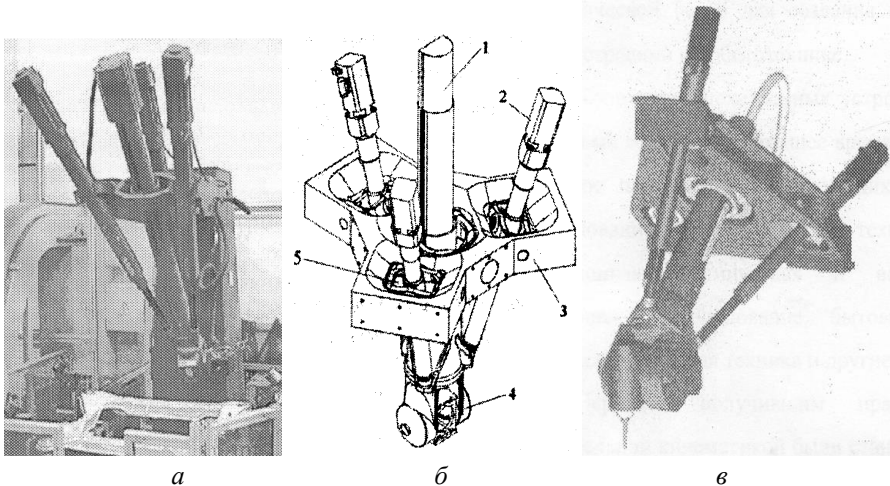


Рис. 2.46. Реалізовані практично конструктивні рішення механізмів-триподів: а, б- механізм мод. TRICEPT 600; в – TRICEPT 805

Перші зразки механізмів - триподів знаходяться в експлуатації з 90-х років. Вони підтвердили свою високу ефективність. Механізм наземного роботизованого комплексу мод. TRIECEPT 805 (див. рис. 2.46 б) має три штанги змінної довжини,

з'єднані з нерухомою шестикутною рамою за допомогою карданних підвісів. На нижніх кінцях штанг розташовані сферичні опори, з'єднані із рухомою платформою. Платформа має 5 ступенів вільності. Три з них забезпечено штангами змінної довжини, а дві забезпечуються центральною штангою. Центральна штанга має постійну довжину і обертається навколо двох осей в нерухомій шестикутній рамі.

Швидкість переміщення платформи сягає 1 м/с і вище, а пришвидшення до 2g. Максимальні кути повороту платформи механізму складають  $30..45^\circ$ , а точність позиціювання - 50мкм.

Більш широкі функціональні можливості мають механізми на основі шести штанг змінної довжини – механізми-гексаподи. Їх схемні рішення відомі 60...70 років. Наявні приклади практичного застосування даних механізмів.

На основі механізму-гексапода реалізовані маніпулятори наземних роботизованих комплексів.

Маніпулятор Данилевського має шість штанг змінної довжини, які забезпечують необхідне положення робочого органа маніпулятора (рис.2.47).

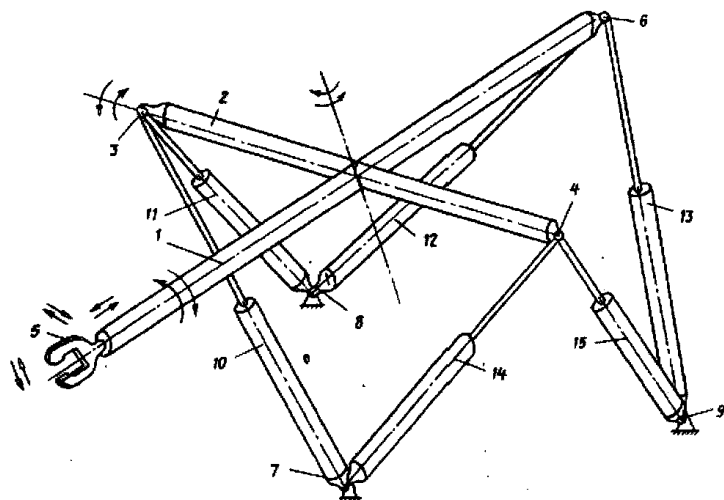


Рис. 2.47. Принципова схема маніпулятора на основі механізму з паралельною кінематикою типу гексапод.

Сферичні опори маніпулятора розміщені у вершинах рівностороннього трикутника. При цьому нерухомі опори зміщено відносно рухомих опор (в нейтральному положенні руки) на кут  $60^\circ$ . Механізми-гексаподи побудовані відповідно геометричній фігурі-октаедру реалізовані в якості прогресивних пристроїв просторових мікропереміщень. Згідно технічного рішення [40] штанги механізму виконані у вигляді пружних балок, які деформуються спеціальними приводами переміщень сильфонного типу.

Механізми гексаподи застосовуються в додаткових пристроях маніпулювання наземних роботизованих комплексів (рис. 2.48).



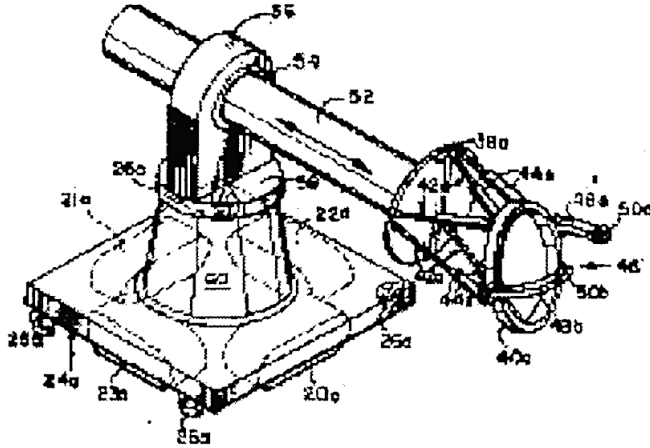


Рис. 2.48. Механізм–гексапод, використаний в якості додаткового пристрою маніпулювання наземного роботизованого комплексу

Приводи штанг змінної довжини дозволяють забезпечити переміщення робочого органу робота в просторі. Керування робочим органом відрізняється гнучкістю, має високі динамічні показники.

Опорні вузли штанг механізму мають різноманітне виконання. Зокрема, застосовуються карданні опорні вузли (рис. 2.49).

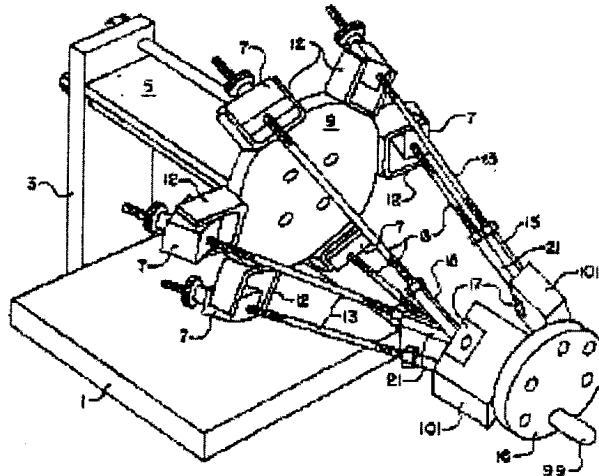
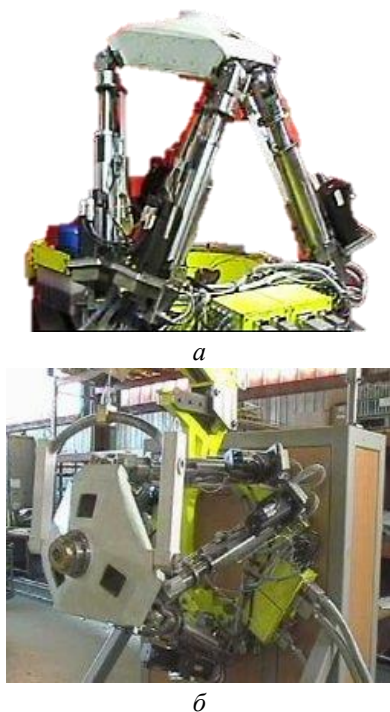


Рис. 2.49. Механізм позиціювання побудований по схемі гексапода робота із карданными опорами штанг постійної довжини

Незалежними координатами механізму є кути повороту шарнірних опор. В даному механізмі наявний ряд сингулярних положень, які обмежують його робочий

простір. Схемні рішення механізмів реалізовані в реальних системах маніпулювання об'єктами. Вони застосовуються в прогресивному технологічному обладнанні.

Маніпулятор рухомого стола побудований за схемою гексапода призначена для розширення функціональних можливостей фрезерних верстатів і може встановлюватись на верстат з заміною планшайби або фрезерної головки. Крім шести штанг змінної довжини, головка містить дві плити - рухому (діаметром 600 мм) для кріплення електрошпинделя з ріжучим інструментом і нерухому (діаметром 1100 мм) (рис. 2.50).



*Рис. 2.50. Маніпулятор рухомого стола мод. CMW 300 фірми CMW:  
а – вид збоку; б – вид згори*

Відстань між плитами регулюється в інтервалі 750-1050 мм. Робочий простір механізму обмежений наступними параметрами: максимальний діаметр 750 мм, максимальне переміщення по осі z - 330 мм. Максимальна швидкість переміщення поверхонь складає 50 м/хв, при переміщенні по колу -20 м/хв.

Маніпулятор гексапода у вигляді рухомого стола реалізовано в різних варіантах. Стіл Nехabot (рис. 2.51), побудований за схемою гексаподу, дозволяє розширити функціональні можливості традиційного фрезерувального верстату до можливостей п'ятикоординатного оброблюючого центру.



Рис. 2.51. Стіл-гексапод Hexabot (Hexel Corporation)

Стіл має висоту 1000 мм і діаметр 710 мм. Вантажопідйомність стола маніпулятора – 900 Н. Позиціювання столу відносно інструменту відбувається в робочому просторі 305x305x178 мм з точністю до  $\pm 0,025$  мм. Максимальна швидкість переміщення столу 85 мм/с. Керування здійснюється за допомогою персонального комп'ютера.

Аналогічні розміри і робочий простір має стіл маніпулятор Нехарод PAROS компанії Mikos (рис. 2.52).

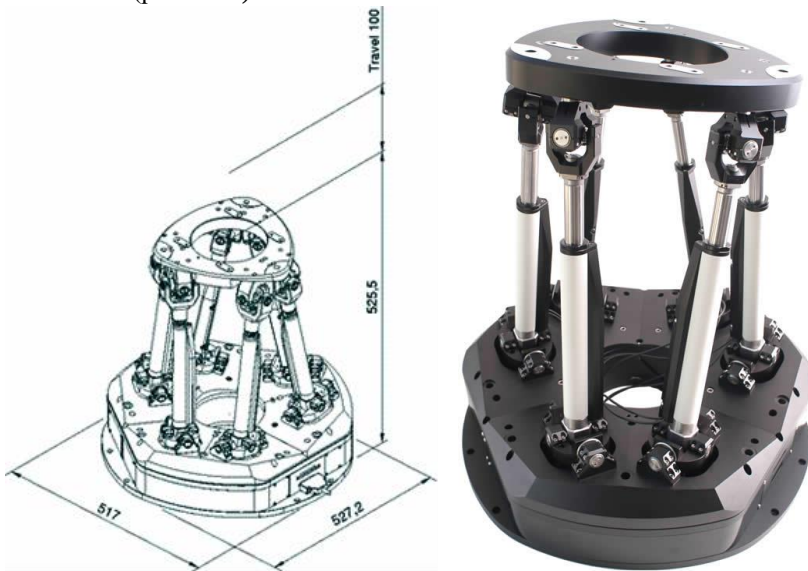


Рис. 2.52. Маніпулятор на основі механізм типу гексапод (Нехарод PAROS компанії Mikos)

Маніпулятор має масу до 20 кг і виконаний в захищеному варіанті. Ряд провідних виробників наземних роботизованих комплексів виготовляють маніпулятори побудовані по схемі механізму-гексапода.

Характерною розробкою фірми FANUK є робот гексапод F-200 і В (рис. 2.53).

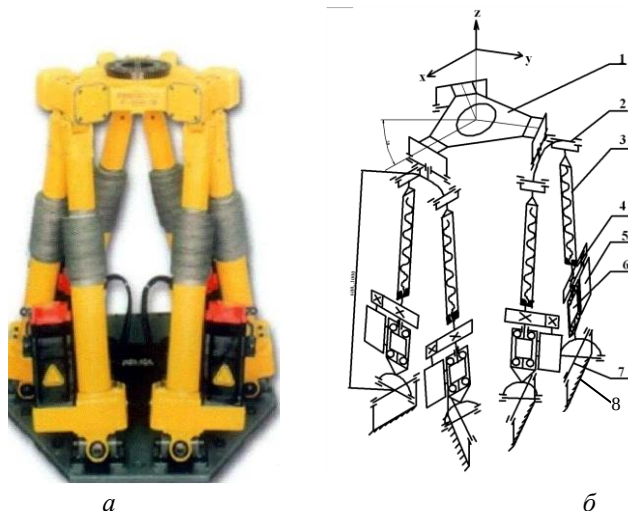


Рис. 2.53. Маніпулятор наземного роботизованого комплексу на основі механізму-гексапода із паралельними кінематичними зв'язками:  
а – загальний вигляд; б – кінематична схема

Робот має шість керованих координат відповідних зміні довжини штанг. Вантажопідйомність робота 500кГс (5000Н). Габаритні розміри робота 820×800×780. Габаритні розміри об'єкта маніпулювання у вигляді куба 250 мм, призми 450×450×120 мм, циліндра Ø600 мм, висоти 120 мм.

Рухома платформа 1 (рис. 2.53 б) має три складні карданні шарнірні вузли 2. До кожного вузла приєднується дві штанги 3. Штанга має привод зміни її довжини у вигляді передачі «гвинт-гайка». Обертання гвинта здійснюється редуктором 4 від електропривода 5. Для забезпечення вільного повороту гвинта служить спеціальний підшипниковий блок 6. Нижні карданні опори 7 встановлені на нерухомій основі 8.

Діапазон зміни довжини штанг (q координат) складає 400мм. Максимальне зусилля по осі z 40 кН, по осям x і y 25 кН. Точність позиціонування по лінійним координатам ±0,03 мм, по поперечно-кутовим координатам виконавчого органу ±20′′. Максимальне переміщення виконавчого органу по вісям x і y 760 мм, по вісі z – 460 мм.

Швидкість лінійних переміщень по вісям x і y:

$$V_x=V_y=0,025 \text{ мм/с} \dots 0,25 \text{ м/с по вісі z} - V_z=0,017 \text{ мм/с} \dots 0,17 \text{ м/с.}$$

Швидкість зміни поперечно-кутового положення виконавчого органу  $\omega=0,002 \dots 30$  град/с.

Робот має робочий простір складної форми (рис. 2.54).

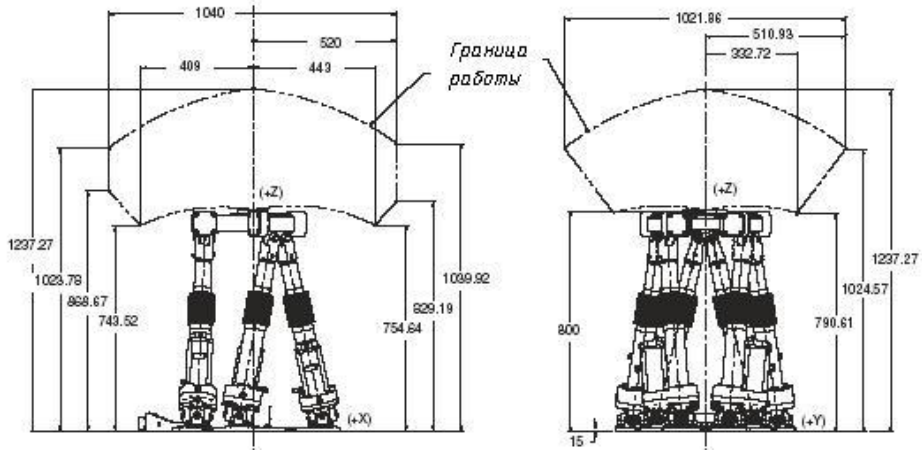


Рис. 2.54. Робочий простір маніпулятора робота F200iB

Розміщення електропривода на штанзі не є раціональним. Збільшується маса штанги, ростуть складові тензора моментів інерції. Відповідно зменшується швидкодія приводів. Раціональним варіантом розробленим в процесі досліджень є маніпулятор з приводами розміщеними на нерухомій основі.

Маніпулятор має рухому платформу 1 (рис. 2.55).

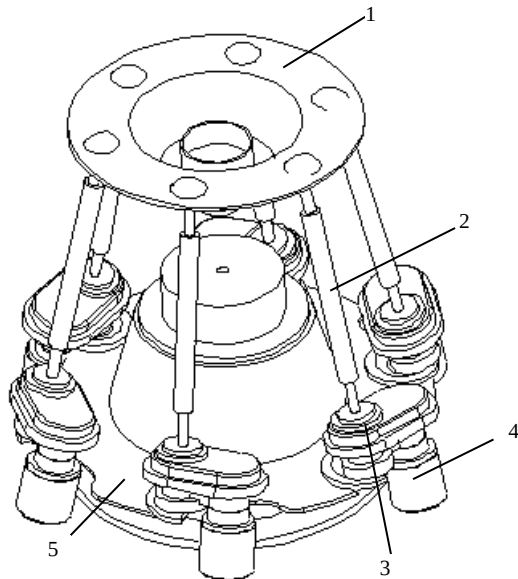


Рис. 2.55. Маніпулятор на основі просторового механізму із гексагональними кінематичними структурами

Робот виконано у вигляді гексагональної структури, яка має вигляд рухомого просторового шестистороннього механізму, утвореного штангами змінної довжини.

Пристрій включає шість штанг змінної довжини 2. Кожна штанга має на своїх кінцях сферичні опори з приводами зміни довжини штанги 4. Сферичні опори штанги розташовані на нерухомій основі 5.

Штанга з приводом зміни її довжини та сферичними опорами розміщеними на її кінцях утворює окремий вузол робота.

При розробці даного вузла виникає ряд науково технічних проблем. Одна із них полягає у необхідності забезпечення просторового початкового положення штанги відносно нерухомої основи та відносно рухомої платформи. Проблема виникає по причині обмеженого поперечно-кутового переміщення сферичних опор. Початкове положення штанги і опор вибирається таким, щоб сферична опора знаходилась у своєму центральному положенні. Проблеми вибору початкового положення корпусів опор вирішена введенням додаткових деталей із сферичними поверхнями. При цьому корпуси верхньої і нижньої сферичних опор можуть зміщуватись відносно рухомої платформи та нерухомої основи в поперечно-кутовому напрямку. Сферичні поверхні вибрані співвісними із центрами верхньої і нижньої сферичних опор штанги. Таким чином штанга з приводами в процесі збирання робота встановлюється в необхідному положенні поворотом навколо центрів сферичних опор.

В запропонованій конструкції наявні різні конструкції шарнірів. Шарніри встановлені на нерухомій платформі є більш простими. Вони виконують функцію з'єднання штанги із платформою.

В основі технологічного обладнання лежить телескопічна штанга із закріпленими на її кінцях сферичними чи карданными (хрестовими) шарнірами. Штанги складають сукупність несучих елементів. Які працюють паралельно та утворюють ферменну конструкцію. Використовують штанги з поворотним штоком, а також штанги постійної довжини з додатковим механізмом їх переміщення.

Наземні роботизовані комплекси на основі механізма-гексапода з успіхом використовуються для маніпулювання масивними об'єктами. Зокрема, вони використовуються для переміщення дзеркал в астрономічних та інфрачервоних телескопах (рис. 2.56).



*Рис. 2.56. Шестикоординатні маніпулятори на основі механізма-гексапода використані в системі орієнтації астрономічних телескопів*



Для вирівнювання супутникових антен також використовують пристрої з паралельними кінематичними зв'язками (рис. 2.57).



*Рис. 2.57. Маніпулятори побудовані по схемі механізму-гексапода, що використовується для вирівнювання супутникової антени*

Як правило, подібні маніпулятори мають високу вантажопідйомність, а їх штанги захищені від попадання вологи та бруду. Вантажопідйомність даних маніпуляторів сягає 100 кН.

Маніпулятори на основі механізму-гексапода широко застосовуються в пристроях мікромеханіки. Вони мають високу швидкодію, ефективно сприймають динамічні навантаження. Тому вони більш ефективні в пристроях мікромеханіки, ніж механізми із розімкненими кінематичними ланками. Прикладом ефективного пристрою мікромеханіки є маніпулятор для мікропереміщень Nano Pod (рис. 2.58).



*Рис. 2.58. Мікроманіпулятор побудований по схемі механізму-гексапода*

Маніпулятор має високу точність позиціювання (0,5 мкм) і допускає рух із швидкістю до 2,0 м/с. В механізмі виключені гістерезисні явища та компенсовані сили сухого тертя.

Механізми-гексаподи з успіхом застосовуються в якості сенсорів. Наявне конструктивне рішення чутливого елемента (сенсора), побудованого на базі механізму з паралельною кінематикою типу гексапода. Чутливий елемент має платформу, на якій розміщена рукоятка, яка приводиться в дію оператором (рис. 2.59).

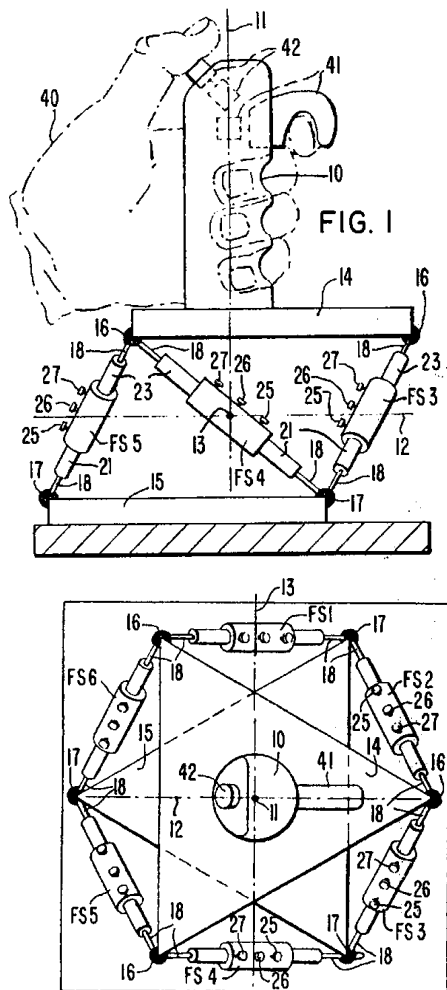


Рис. 2.59. Конструктивна схема чутливого елемента (сенсора), побудованого на базі механізму з паралельною кінематикою типу гексапода

Переміщення платформи здійснюється поступально в трьох напрямках. Додатково платформа повертається в просторі відносно трьох вісей координат.

Таким чином, платформа має шість ступенів вільності. Відповідно змінюються довжини шести штанг, які з'єднують платформу з нерухомою основою. Вимірювачі довжини штанг реєструють зміни їх довжини. Система керування здійснює обробку



сигналів, пропорційних змінам довжин кожної із штанг. В результаті визначається просторове переміщення платформи.

Механізми, що мають шість штанг і забезпечують просторове переміщення платформи реалізуються з лінійними приводами переміщення опор штанг, які в даному випадку мають постійну довжину. При цьому реалізується схема механізму-гексаглайда (рис. 2.60).

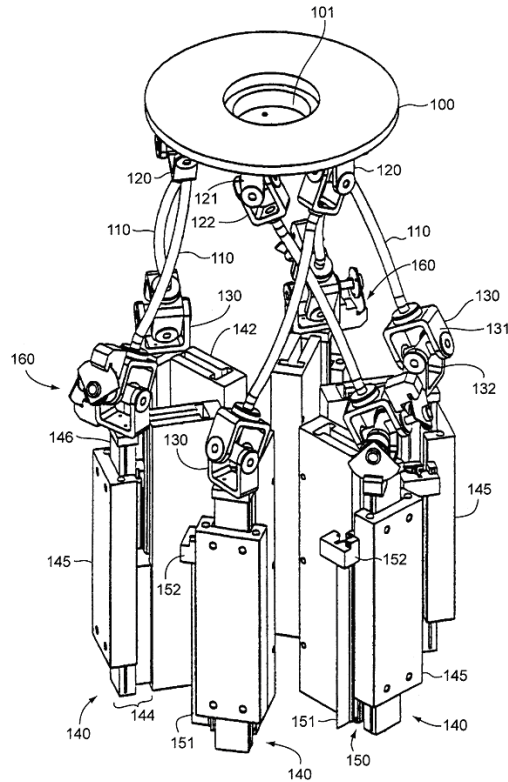
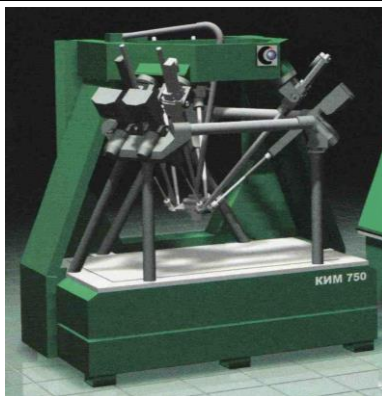


Рис. 2.60. Маніпулятор на основі механізму з паралельною кінематикою, шарнірні опори якого переміщуються поступально (механізм-гексаглайд)

Штанги постійної довжини даного механізму виконані криволінійними. Цим забезпечується розширення робочого простору маніпулятора.

Механізми з паралельними кінематичними структурами використовуються у вимірjuвальних машинах та в металообробному обладнанні.

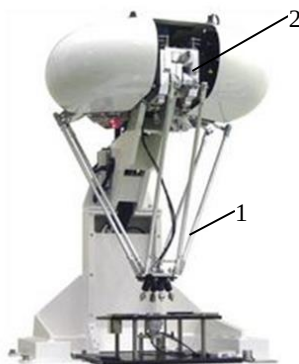
З метою підвищення точності обробки на верстаті фахівцями фірми «Лапiк» розроблено багатофункціональне обладнання типу платформи Стюарта. Воно включає основу із силовою рамою (рис. 2.61).



*Рис. 2.61. Багатофункціональне обладнання на основі мехатронної просторової системи приводів, яке включає шестикоординатну силову платформу та систему вимірів*

Обладнання має металорізальний верстат, побудований по схемі механізма-гексапода та вимірювальну машину побудовану аналогічно. Виміряні похибки обробки усуваються шляхом додаткової обробки ділянок деталі із надлишковим матеріалом.

В даний час широко застосовуються маніпулятори на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами, що мають поворотні приводи. Наземні роботизовані комплекси на основі просторових механізмів такого типу позитивно зарекомендували себе у випадках, коли необхідна висока швидкість переміщення робочого органа мінімальної маси. Безперечне лідерство в світовій практиці здобули мехатронні системи на основі механізмів паралельної структури спеціального типу з ланками постійної довжини побудовані по схемі «дельта» (рис. 2.62).



*Рис. 2.62. Робот фірми Panasonic побудований на основі механізма паралельної структури «дельта»*

В конструкції робота використані механізми з ланками постійної довжини 1 та поворотними важільними приводами 2. Високою швидкістю відрізняються

пакувальні наземні роботизовані комплекси ABB Flexpicker фірми ABB (Швеція) та Adept Quattro фірми Adept Technology (США) (рис. 2.63).



Рис. 2.63. Робот ABB Flexpicker (а) та робот Adept Quattro (б)

Вказані наземні роботизовані комплекси мають продуктивність до 5 циклів на секунду. Робототехнічні системи з паралельною кінематикою типу "дельта" з приводом поворотного руху знайшли широке використання у харчовій, фармацевтичній промисловості та приладобудуванні (рис. 2.64).

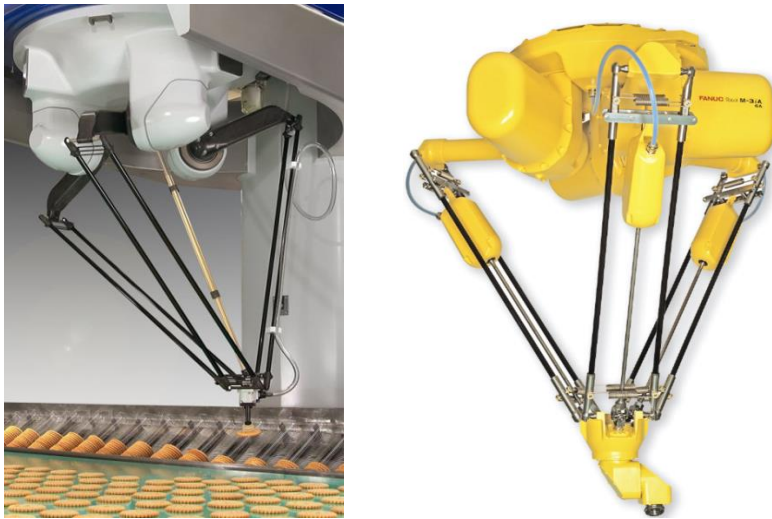


Рис. 2.64. Наземні роботизовані комплекси на основі просторових мехатронних систем поворотної дії

Роботи такого типу виробництва фірми FANUK об'єднані у кілька серій (М-1, М-2, М-3). Роботи серії М-1 мають вантажопідйомність 0,5(1) кГс (рис. 2.65).



а

М-1iA/1H  
М-1iA/0.5S  
М-1iA/0.5A  
М-1iA/1HL  
М-1iA/0.5SL  
М-1iA/0.5AL

б

Рис. 2.65. Типовий представник серії М-1 наземний роботизований комплекс М-1iA/0,5А (а) та модельний ряд роботів (б)

Роботи даної серії мають робочий простір габаритом 280...420 мм і забезпечують точність позиціювання  $\pm 0,02$  мм. Маса робота складає 18...26 кг. Число ступенів вільності робочого органу 3...6.

Роботи серії М-2 мають вантажопідйомність 3,6 кГс (рис. 2.66).



а

М-2iA/3S  
М-2iA/3SL  
М-2iA/3A  
М-2iA/3AL  
М-2iA/6H  
М-2iA/6HL

б

Рис. 2.66. Наземний роботизований комплекс М-2iA/3S (а) та модельний ряд роботів (б)

Габарити робочого простору роботів даної серії складають 800...1130 мм при точності позиціювання 0,1 мм. Маса роботів даної серії 115...140 кг. Кутова швидкість переміщення виконавчого органу робота складає 1700...3500 град/с.

Роботи серії М-3 мають вантажопідйомність 6,12 кГс (рис. 2.67).



Рис. 2.67. Робот M-3iA/6A (а) та модельний ряд роботів серії M-3 (б)

Габарит робочого простору даних роботів складає 1350 мм. Маса роботів 155...175 кг. Забезпечується точність позиціонування  $\pm 0,1$  мм. Максимальна кутова швидкість робочого органу 2000...4000 град/с.

Вказані наземні роботизовані комплекси мають широкі функціональні можливості. Вони відзначаються широкими діапазонами зміни координат (табл. 1.1)

Таблиця 2.1

Основні технічні характеристики роботів M-3iA

| Модель робота                               | M-3iA/6A           | M-3iA/6S     |
|---------------------------------------------|--------------------|--------------|
| Кількість осей                              | 6                  | 4            |
| Вантажопідйомність, кг                      | 5 кг               | 5 кг         |
| Діаметр робочої зона, мм                    | 1350               | 1350         |
| Похибка позиціонування (повторюваність), мм | $\pm 0,1$ мм       | $\pm 0,1$ мм |
| Маса робота, кг                             | 175 кг             | 160 кг       |
| Діапазон обертання по осях 4/5/ 6           | 720° / 300° / 720° | 720° / - / - |
| Швидкість по осях 4 / 5 / 6, град/с         | 2000 / 2000 / 2000 | 4000 / - / - |

Наземні роботизовані комплекси, побудовані по схемі «дельта» мають значні переваги, але вони не витіснили традиційні послідовні роботи (робот-рука) у інших областях застосування: зварюванні, маніпулюванні заготовками тощо.

Для підвищення точності позиціонування маніпуляторів побудованих по схемі «дельта» часто застосовуються приводи мікропереміщень . Вони встановлюються безпосередньо на виконавчому пристрої маніпулятора.

## 2.4. Відомі захватні механізми маніпуляторів

В літературних джерелах [7,19,34] наведені конструкції захватних механізмів роботів які використовуються для отримання циліндричних об'єктів та об'єктів типу паралелепіпеда (рис. 2.68).

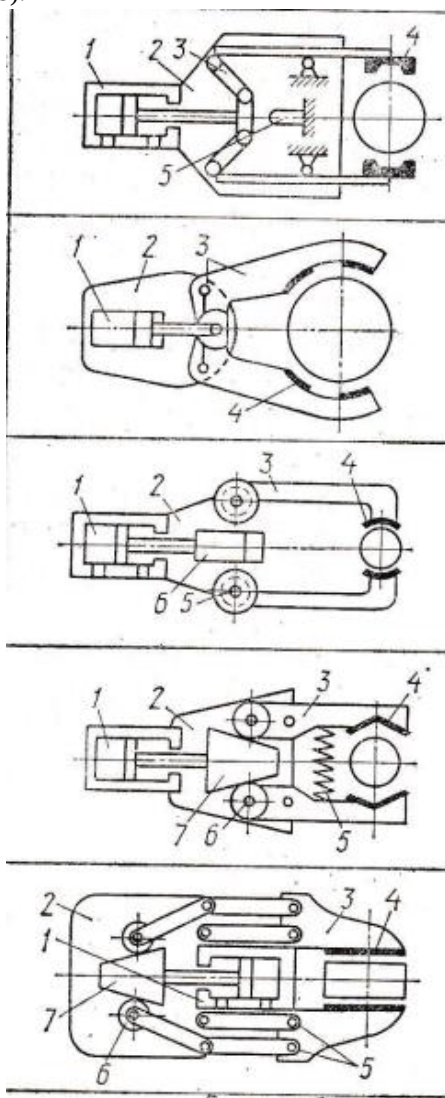


Рис. 2.68. Схеми захватних пристроїв для утримання циліндричних об'єктів та об'єктів у вигляді паралелепіпеда

Захватні пристрої даного типу мають жорстку важільну систему. Тому вони потребують точної орієнтації схвата відносно об'єкта. При відсутності точної орієнтації застосування даних механізмів може привести до виникнення значних навантажень на об'єкт маніпулювання. Тому застосування даних пристроїв для захвату небезпечних об'єктів є нераціональним.

Захватні пристрої потребують спеціального вузла стикування пристрою і з маніпулятором мобільного робота. Як правило дані вузли мають замок та стиковочну колодку (рис. 2.69).

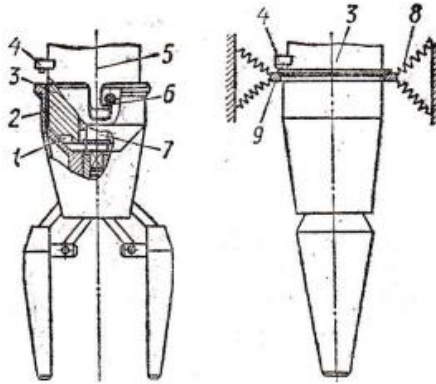


Рис.2.69. Механізм стикування захватного пристрою із маніпулятором мобільного робота

Колодка має конічну поверхню яка виконує роль напрямної при стикувці. Пристрій має проміжний вал що проходить по вісі конічної поверхні. Вал служить для керування важелями захватного пристрою.

Як правило захватні пристрої є універсальними. Вони мають змінні губки адаптовані до поверхні об'єкту (рис. 2.70).

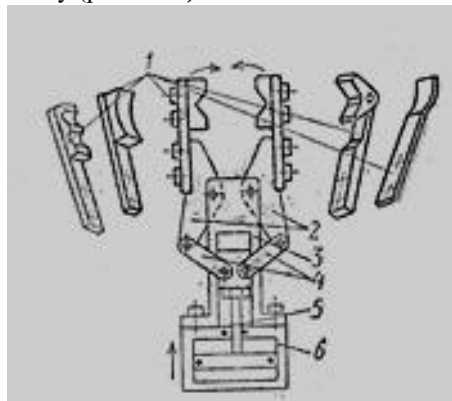


Рис. 2.70. Захватний пристрій із змінними губками



В захват них пристроях використовуються еластичні охоплюючі елементи (рис. 2.71).

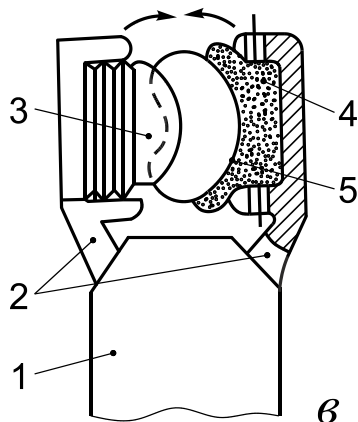


Рис. 2.71. Захватний пристрій з еластичними охоплюючими елементами

Еластичні елементи виконані у вигляді деталей форма яких відповідає поверхні об'єкту. Це суттєво зменшує зусилля затиску, але також ж знижує точність позиціонування об'єкту.

Використовується пристрій важільного типу який забезпечує центрування об'єкту (рис. 2.72).

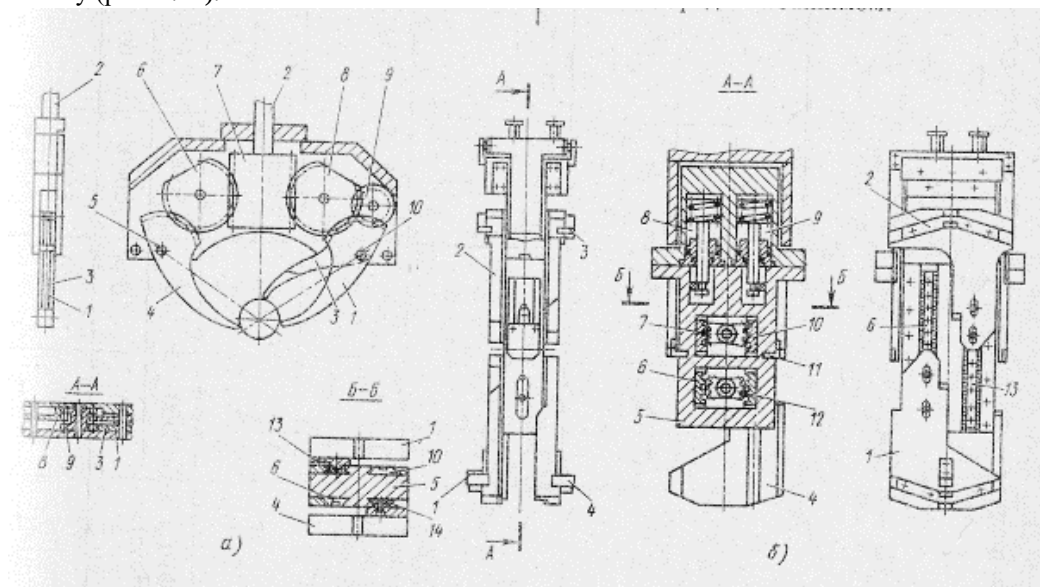


Рис. 2.72. Захватний пристрій важільного типу який забезпечує центрування циліндричного об'єкту



Недоліком даного пристрою є складність конструкції та низька навантажувальна спроможність.

Для створення значних зусиль затиску застосовують пристрої важільного типу з колісним приводом (рис. 2.73).

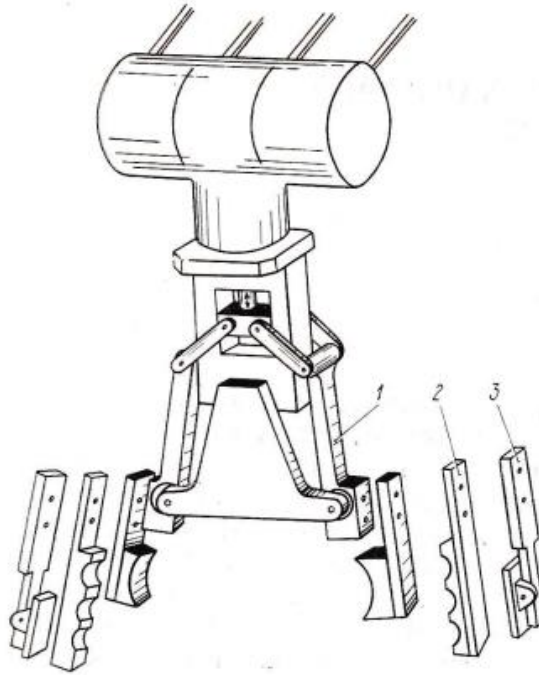


Рис. 2.73. Захватний пристрій із важільно-кулісним приводом

Схват має змінні губки 3, 4 які відповідають виду об'єкту.

На захватних пристроях часто встановлюють чутливі елементи які вимірюють зусилля, переміщення або інші параметри процесу затиску об'єкту. Це суттєвим чином розширює функціональні можливості маніпулятора мобільного робота.

Повинні бути розроблені засоби (системи) виміру і контролю параметрів захватних пристроїв. Засоби контролю повинні розроблятися з можливістю їх перевірки в реальних умовах експлуатації. Повинні бути сформульовані відповідні критерії оцінки параметрів які визначають показники роботи захватних пристроїв. Необхідно враховувати можливість застосування сучасних засобів вимірів та апаратури. Для підвищення якості захватних пристроїв необхідно розробити необхідну номенклатуру стендів і оснастки для експериментального дослідження захватних пристроїв та діагностики їх технічного стану .

Використовується конструкція схвата губки якого оснащені тактильними пристроями (рис. 2.74).

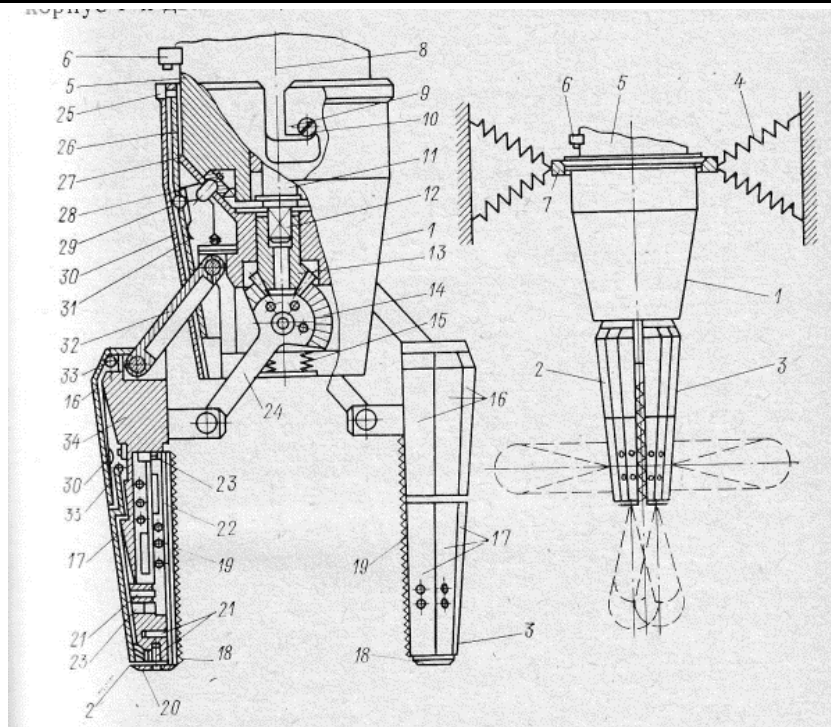


Рис. 2.74. Захватний пристрій який має тактильні датчики на губках

Схват має корпус та губки пальцевого типу 2 і 3. Кожна губка має основу 34 на якій встановлені пластини 16 - 19 які замикають електричні контакти 20 при затиску об'єкту.

Захватні пристрої як правило оснащуються засобами вимірів відстані, лазерного або акустичного виду.

Для роботи із високими та громіздкими об'єктами застосовується схват із новими затискними поверхнями (рис. 2.75).

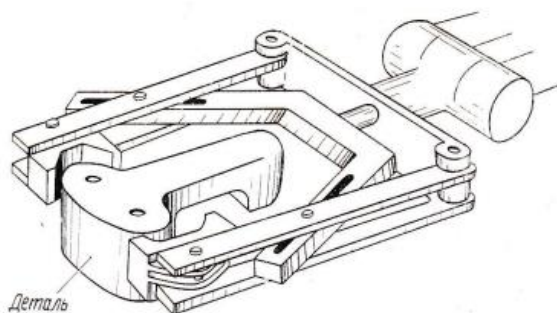


Рис. 2.75. Захватний пристрій для роботи із масивними негабаритними об'єктами

В даному захватному пристрої центр мас об'єкту розташовано близько від області затиску. При цьому мінімізуються моменти від дії гравітаційних сил. Аналогічно виконана хват ний пристрій який утримує об'єкт по зовнішній та внутрішній поверхням (рис. 2.76).

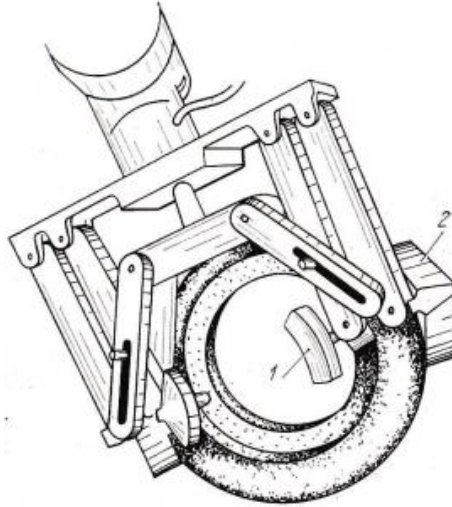


Рис. 2.76. Захватний пристрій який утримує об'єкт по зовнішній і внутрішній поверхням

Утримання об'єкта по внутрішній поверхні доцільно для тонкостінних об'єктів трубчастого виду. При цьому важелі схвата переміщуються в просторі (рис. 2.77).

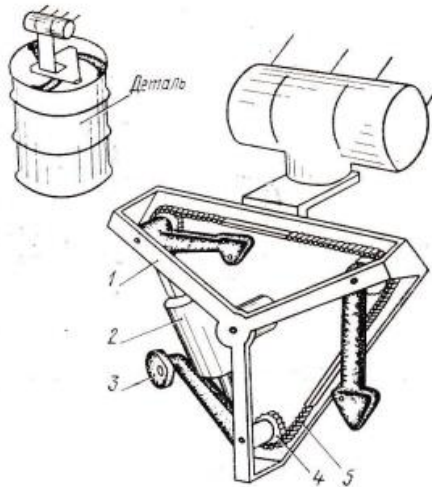


Рис. 2.77. Схват для утримання об'єкту по внутрішній поверхні

Важелі даного схвата переміщуються ланцюговим приводом. Схват є універсальним і допускає захват і утримання різноманітних об'єктів.

Застосовується схвати із самоцентруючими губками (рис. 2.78).

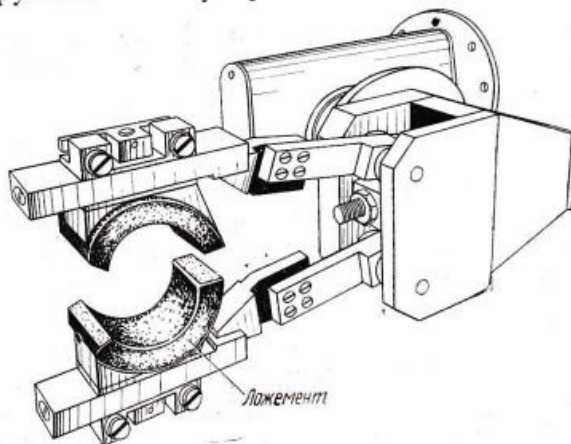


Рис. 2.78. Конструкція схвата із самоцентруючими губками

Додаткову ступінь вільності забезпечує також гумове покриття кубок.

Важільні схвати допускають широкий діапазон зміни розміру об'єкту (рис. 2.79).

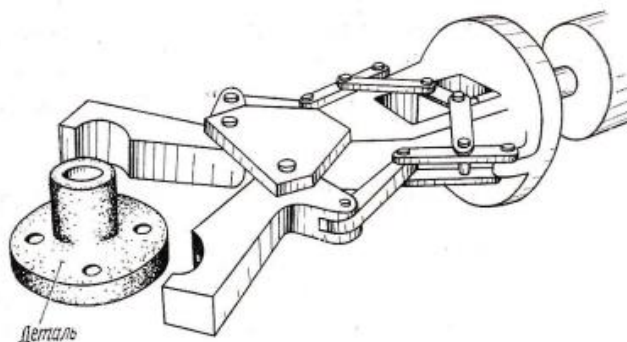


Рис. 2.79. Конструкція захватного пристрою із розширеним діапазоном зміни розмірів об'єкта

Недоліками наведених схватів є особливості компоновки, які полягають у тому, що механізм схвата розташовано збоку поверхні об'єкта.

Захватні пристрої високої точності оснащуються пристроями мікропереміщень вібраційного типу.

Пристрої із вібраційним приводами реалізуються по різноманітним схемам (рис. 2.80).

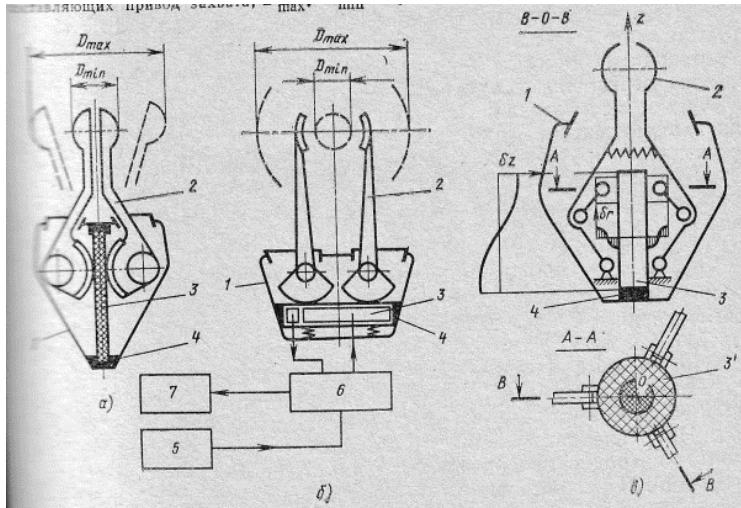


Рис. 2.80. Схемні рішення високоточних захватних пристроїв із вібраційним і приводами

В захватних пристроях використовуються віброприводи із асиметричними циклами коливань які забезпечують високу плавність руху.

Вібраційні приводи дають можливість вимірювати зусилля затиску. Застосування захватних пристроїв із механізмами мікропереміщень може бути перспективним в окремих конструкціях маніпуляторів. Як недолік даних пристроїв слід відзначити складність конструкції та труднощі технічної реалізації вібраційних приводів високої частоти.

Модифіковані конструкції важільних захватних пристроїв можуть бути використані при виконанні важільної системи пружини або при введення пружних елементів у багатоланковий механізм (рис. 2.81).

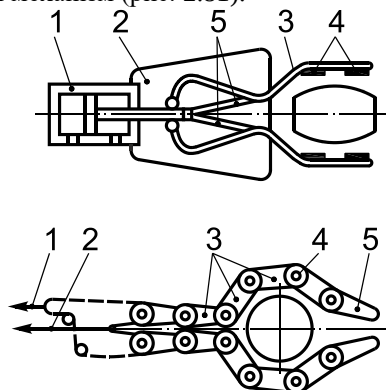


Рис. 2.81. Схеми захватних пристроїв із пружними елементами у важільній системі

Недоліками даних пристроїв є низька вантажопідйомність та низька точність позиціонування об'єкта. Пружні захватні пристрої можуть вимагати об'ємні пружні елементи (рис. 2.82).

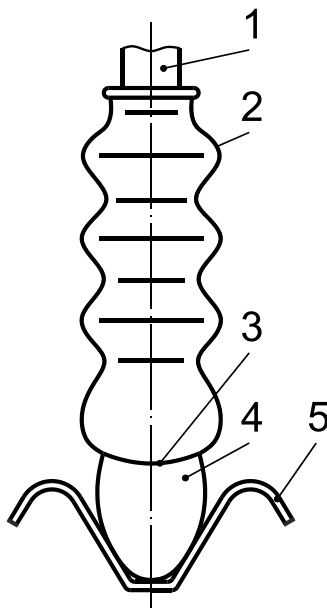


Рис. 2.82. Об'ємний пружний елемент захватного пристрою маніпулятора

В даному випадку пружний елемент виконаний у вигляді сільфона 2 який має вузол кріплення 1 та кінцеву частину 4 яка взаємодіє із об'єктом 5. Форма кінцевої частини відповідає формі об'єкту. Дані пружні елементи можуть бути використані у захватному пристрої для роботи з небезпечним об'єктом. Їх недоліком є необхідність виконання фасонної кінцевої частини.

Більш універсальним є захватний пристрій пальцевого типу (рис. 2.83).

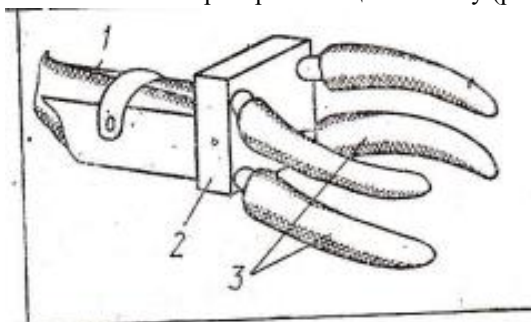


Рис. 2.83. Захватний пристрій пальцевого типу

Використовується конструкція пальцевого захватного пристрою який має еластичні камери 1 (рис. 2.84).

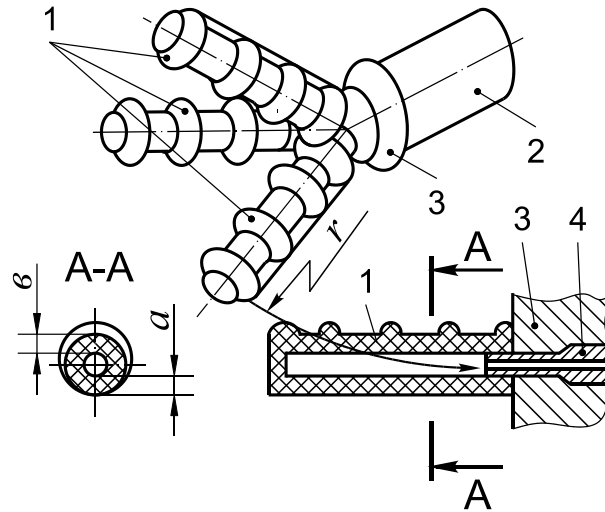


Рис. 2.84. Конструктивна схема пальцевого захватного пристрою із еластичними камерами

Пристрій має три пальці 1 закріплені в стиковочному вузлі 3 який приєднаний до виконавчого органу маніпулятора 2. Пальцеві елементи розведені між собою на кут близько  $120^\circ$ . Пальці являють собою еластичні оболонки порожнини яких через штуцери 4 з'єднані із джерелом стисненого повітря. При подачі повітря пальці деформуються охоплюючи об'єкт.

Аналогічний схват має 5 камер (рис. 2.85).

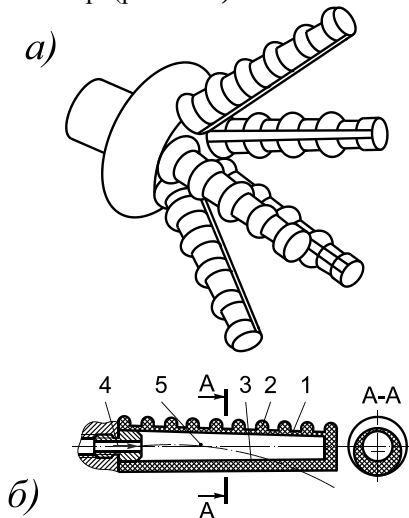


Рис. 2.85. Схват пальцевого типу, що має п'ять еластичних камер



Пальці мають вигляд гумо-тканевих балонів із гофрами з одного боку. При подачі стисненого повітря балони деформуються охоплюючи об'єкт.

Різновидом пальцевих схватів є пристрої на губках яких встановлені еластичні подушки до яких підводиться стиснене повітря (рис. 2.86).

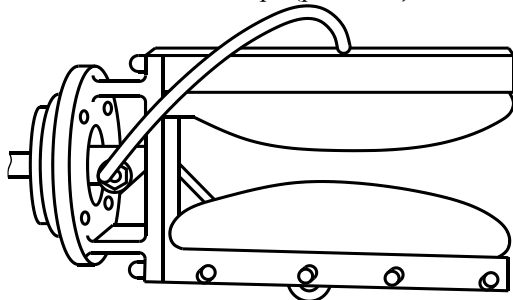


Рис. 2.86. Встановлення еластичних подушок на губках схвата важільного типу

Даний пристрій має кілька пружних елементів. Його особливістю є надзвичайна гнучкість та можливість адаптуватись до форми небезпечного об'єкта. Недоліком даного пристрою є низька вантажопідйомність та складність точного орієнтування пристрою відносно об'єкту.

Використовуються захватні пристрої із силорозподільним навантаженням [C4] (рис. 2.87).

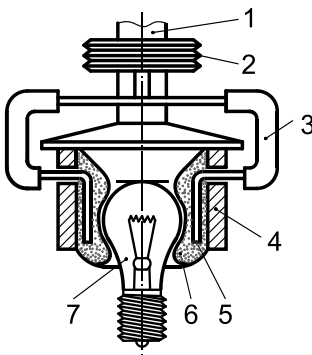


Рис. 2.87. Схема захватного пристрою із силорозподільним навантажувачем

Захватний пристрій має корпус 1, сифон 2, канали 3 для підводу робочого середовища. Пристрій має силову частину 4 в якій виконана камера 6 із силорозподільним подавачем середовища 5. Пристрій забезпечує необхідну деформативність та має здатність пристосовуватись до форми об'єкта та створювати рівномірне навантаження на поверхні об'єкта. До недоліків пристрою слід віднести низьку універсальність пристрою.

Використовуються захватні пристрої вакуумного типу (рис. 2.88).

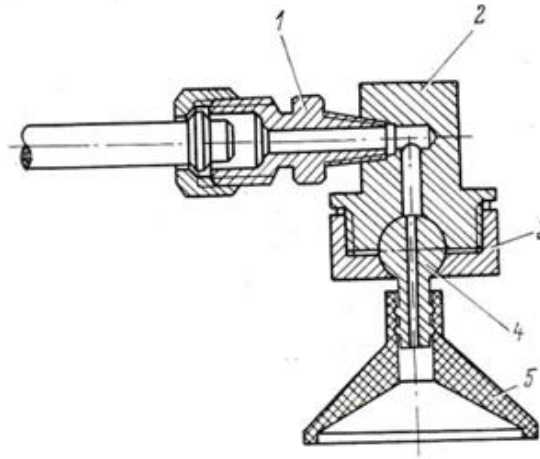


Рис. 2.88. Конструктивна схема захватного пристрою вакуумного типу

Використовується конструкція плоского вакуумного захватного пристрою (рис. 2.89).

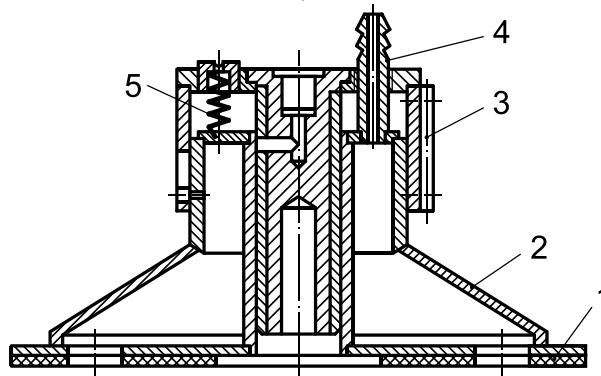


Рис. 2.89. Вакуумний захватний пристрій із компенсацією переміщення об'єкту при затиску

Вакуум в порожнині між поверхнею об'єкта та гумовою прокладкою 1, яка знаходиться на чашці 2, виникає при відсмоктуванні повітря через штуцер 4. Для компенсації похибок позиціонування маніпулятора гайка має можливість переміщення в корпусі 3. Повернення чашки у вихідне положення здійснюється пружиною 5.

Недоліком даного пристрою є необхідність наявності точної плоскої поверхні на об'єкті із якою може взаємодіяти із еластичною поверхнею схвату. Такі пристрої доцільно застосовувати при роботі із листовими об'єктами. Вакуумні захватні пристрої є прогресивним технічним обладнанням. При певному доопрацюванні вони можуть бути використані в маніпуляторах наземних роботизованих комплексів.

Вакуумний схват потребує засобів забезпечення вакууму. Для цього використовуються спеціальні ежектори. Наявні конструкції захватних пристроїв струменевого типу (рис. 2.90).

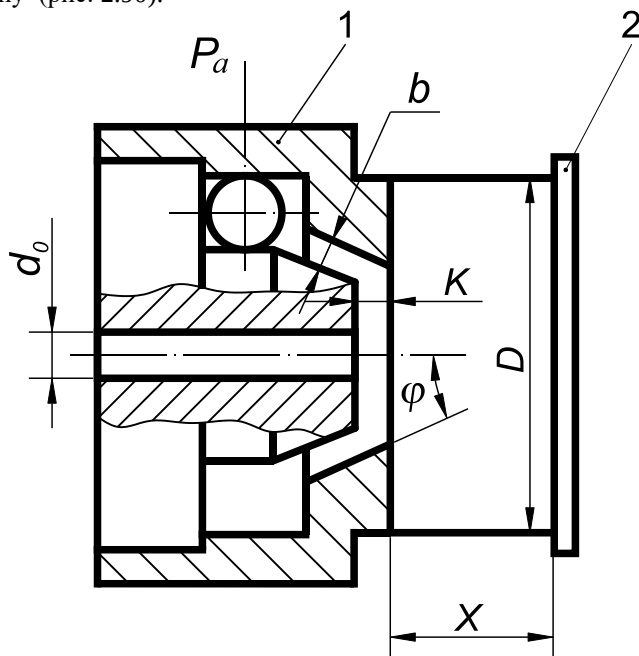


Рис. 2.90. Захватний пристрій струменевого типу

Даний захватний пристрій може виконувати функції ідентифікації об'єкта чи визначення його мікропереміщень по зміні тиску повітря в порожнині пристрою. Діапазон вимірів може складати кілька мм.

Застосовуються захоплювальні пристрої ежекторного типу (рис. 2.91).

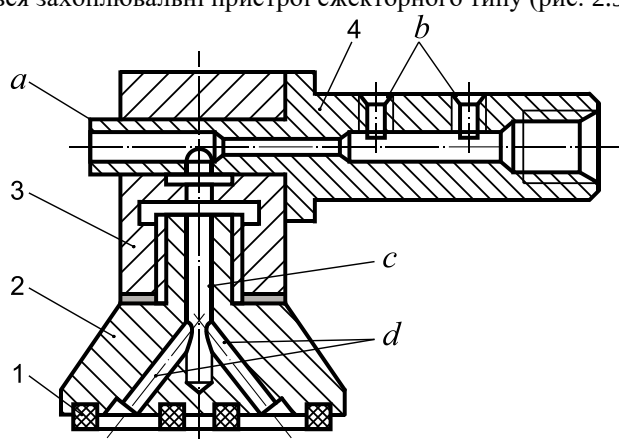


Рис. 2.91. Конструктивна схема захватного пристрою ежекторного типу

Пристрій має корпус 3 із встановленим на ньому тримачем 2 з гумовим амортизатором 1.

Захватні пристрої ежекторного та вакуумного типів забезпечують амортизацію коливань маніпулятора або об'єкта при затиску. Тому їх доцільно використовувати при роботі з небезпечними об'єктами.

Перспективною конструкцією хватного пристрою є схват із гумовим балоном підковоподібного перетину заповненим сипучим середовищем (рис. 2.92).

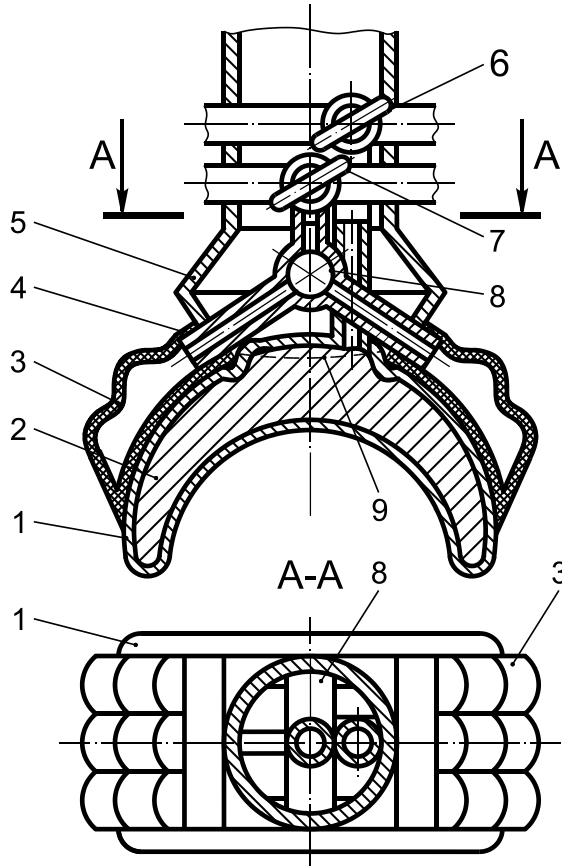


Рис. 2.92. Захватний пристрій який має гумовий балон заповнений сипучими середовищем

Пристрій закріплено стиковочним блоком 5 на виконавчому органі маніпулятора. Схват має дві пневмосистеми. Перша має пневморозподільник 6 фільтр 9 та тонкостінну робочу камеру 1 яка заповнена сипучими середовищем 2. Друга пневмосистема включає пневморозподільник 7, колектор 8 з каналами 4 підводу стисненого повітря. З каналами з'єднані заглушені по краях привідні камери 3 з плоскими внутрішніми та гофрованим и зовнішніми стінками. Привідні камери внутрішніми плоскими стінками закріплені на зовнішніх стінках робочої камери 1.

У вільному стані порожнини привідних камер 3 і робочої камери 1 через розподільники 6 та 7 з'єднані з атмосферою. При цьому краї камери 1 розділені за рахунок пружності.

При затиску об'єкту порожнини привідних камер 3 приєднуються до джерела стисненого повітря. Гофровані сторони камер 3 видовжується, приводячи в рух губки робочої камери 1. Останні при зближенні захоплюють об'єкт. Після захоплення і затиску об'єкту переключається розподільник 6, що забезпечує відсмоктування повітря із робочої камери. При цьому фільтр затримує видалення сипучого матеріалу із порожнини. Під дією атмосферного тиску все внутрішнє середовище якби затвердіває без зміни форми камери. Цим створюється зусилля достатнє для утримання об'єкту.

Для звільнення об'єкту порожнини привідних 3 та робочої 1 камера з'єднуються через розподільники 6 і 7 з атмосферою.

Даний пристрій є перспективним для застосування в маніпуляторах мобільних роботів призначених для роботи з небезпечними об'єктами. Його недоліками є складність конструкції та технологічні труднощі виготовлення і експлуатації.

Пристрій не потребує точного положення схвата відносно об'єкта маніпулювання. Недоліком пристрою є складність механічної системи переміщення камери.

В результаті проведеного аналізу визначені основні параметри, вимоги до характеристик та особливостей експлуатації виконавчих пристроїв наземних роботизованих комплексів.

Конструктивне виконання виконавчих пристроїв мобільних роботів повинно забезпечувати компактність розташування їх агрегатів, вузлів, апаратури та комунікацій. Виконання виконавчих пристроїв наземних роботизованих комплексів повинно забезпечувати можливість їх швидкої зміни в польових умовах. Установка виконавчих пристроїв повинна мінімальним чином змінювати положення центра мас роботизованого комплексу зокрема при його переміщенні на ділянках з особливостями траєкторії (підйоми, спусків, схили тощо). Необхідно забезпечити максимально зручні умови доступу до окремих вузлів і агрегатів виконавчих пристроїв з можливістю візуального (безапаратного) контролю якості, максимальну зручність, простоту та безпеку огляду та обслуговування виконавчих пристроїв, заходів їх збереження та консервації.

При розробленні нових виконавчих пристроїв наземних роботизованих комплексів спеціального призначення висуваються жорсткі техніко-економічні вимоги, зокрема за критерієм "ефективність-вартість" у порівнянні із зразками аналогічного іноземного виробництва. Додатково враховуються технологічні чинники, трудомісткість виготовлення, наявність дефіцитних матеріалів та сировини.

## **Частина II**

# **Проблеми орієнтації та навігації наземних роботизованих комплексів**

### **РОЗДІЛ 3**

## **Теоретичні моделі дії дорожніх умов на рухомі наземні роботизовані комплекси**

### **3.1. Математичний опис детермінованих плавно та різко змінних нерівностей дорожнього полотна**

Мобільні роботи переміщуються по поверхням різного виду. Характерним є різноманітні дороги, бездоріжжя, переміщення по рівним поверхням, в тому числі у приміщеннях та долаття перешкод різного виду. Велика відмінність дорожніх умов утруднює дослідження їх впливу на мобільний робот. Тому актуальним є застосування методів математичного моделювання для дослідження впливу дорожніх умов на характеристики мобільного робота. В процесі виконання робіт запропоновано методи моделювання дії дорожніх умов на наземний роботизований комплекс спеціального призначення, який оснащено маніпулятором.

Наземні роботизовані комплекси спеціального і військового призначення легкого класу мають незначну масу (до 100 кг) та габарити (до 1 м), при цьому вони повинні діяти на пересіченій місцевості і в місті без участі людини. Переміщення і позиціонування мобільних наземних роботизованих комплексів відбувається в складних і невизначених дорожніх умовах. Ці дорожні умови впливають на мобільність працездатність та функціональні можливості наземних роботизованих комплексів. Для дослідження впливу дорожніх умов на ефективність наземних роботизованих комплексів застосовуються теоретичні та експериментальні методи [148]. Математичне моделювання є найбільш доцільним методом дослідження впливу дорожніх умов на особливості функціонування наземних роботизованих комплексів в жорстких умовах навколишнього середовища. Спроможність мобільних наземних роботизованих комплексів рухатись по різним типам доріг та поверхні землі характеризується їх прохідністю [3]. Сукупність властивостей місцевості, які сприяють переміщенню по ній наземних роботизованих комплексів або обмежуючих можливість їх переміщення являється прохідністю місцевості. Прокідність

місцевості залежить від її рельєфу, рослинності, гідрографічної мережі, характеру ґрунтів, а також від пори року та метеорологічних умов.

Аналіз характеристик відомих наземних роботизованих комплексів легкого класу вказує на існуючі недоліки конструкцій шасі та не відповідність цих НРК тактико-технічним вимогам що висуваються до них у сучасних умовах. Тому дослідження щодо моделювання дії дорожніх умов на рух наземних роботизованих комплексів та щодо раціонального вибору типу рушія перспективних наземних роботизованих комплексів є актуальним.

Для побудови математичних моделей переміщення наземних роботизованих комплексів проведено аналіз дорожніх умов.

Особливістю задачі є встановлення характеристик дорожнього покриття. Розрізняють стаціонарні та змінні в часі дорожні умови (рис. 3.1).

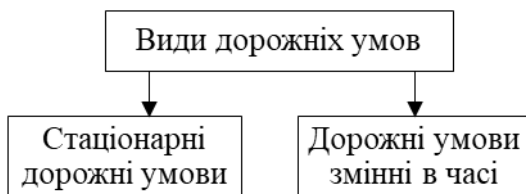


Рис. 3.1. Види дорожніх умов

Розглянуті дороги різного виду. Особливу увагу приділено впливу складних дорожніх умов на динамічні процеси у різних системах та елементах НРК. Виділені типові дороги різного виду, пересічена поверхня, бездоріжжя, міська забудова та робота НРК в середині приміщень. Дорожні умови розділені на дві групи. До першої віднесені квазістаціонарні умови, при яких дорожнє покриття має плавно змінні в часі характеристики. До другої групи віднесені умови бездоріжжя із різко змінними нестаціонарними змінами параметрів. Зокрема, це долання перешкод НРК у вигляді виступів, траншей, ескарпів, сходинок, схилів тощо.

Для дорожніх умов першої групи виконано аналіз видів дорожнього покриття колій по яким рухається комплекс.

В результаті проведених досліджень встановлені різновиди плавних і різко-змінних недеформованих профілів колії.

Під колією розуміти допоміжну (лінію) по якій рухається одна із гусениць або ряд коліс мобільного робота.

Колія являє собою ідеалізовану траєкторію переміщення правої чи лівої частини гусеничного рушія або його коліс розміщених з одного боку.



В результаті аналізу встановлені якісні особливості однієї окремої колії (однієї із двох).

Якісна відмінність полягає у наявності постійного або точкового контакту гусениці або колеса із поверхнею дорожнього полотна (рис. 3.2).

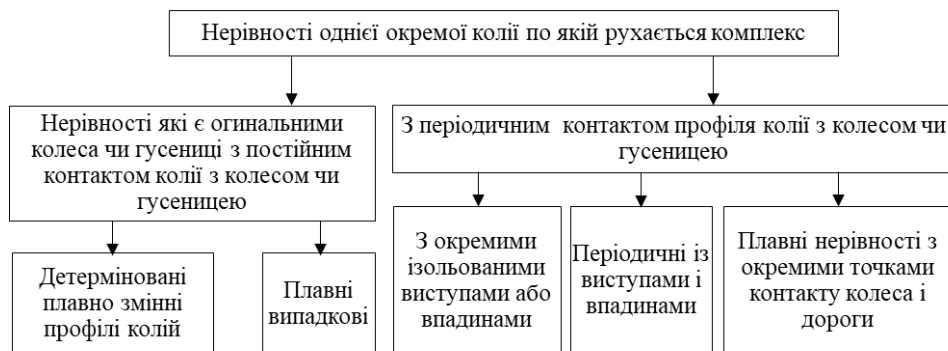


Рис. 3.2. Якісні характеристики профіля окремої колії визначені по факту наявності неперервного чи точкового контакту гусениці чи колеса із ґрунтом

В результаті проведених робіт встановлено, що теоретична модель дорожніх умов, в яких знаходиться мобільний робот залежить не лише від виду та параметрів дороги, а і від конструктивних особливостей мобільного робота. Конструктивні особливості визначають контакт опорних частин з нерівностями дороги, а відповідно і теоретичну модель дорожнього полотна. Часто нерівності дороги є огинальними колеса чи гусениці (рис. 3.3).

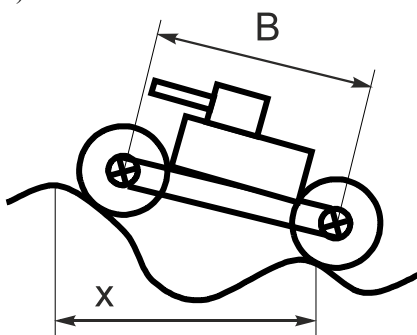


Рис. 3.3. Взаємодія колеса з нерівностями колії з постійним контактом колеса із ґрунтом

При цьому область контакту колеса із поверхнею є обмеженою і малою у порівнянні із характерним розміром (діаметром колеса) (рис. 3.4).

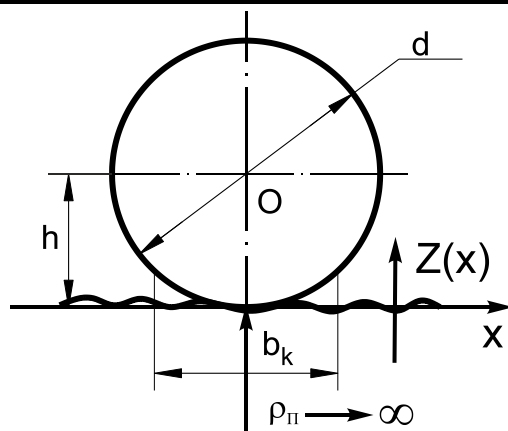


Рис. 3.4. Схема взаємодії колеса із дорожнім покриттям та параметри, що відображають особливості контакту

Точковий контакт відповідає взаємодії плоскої поверхні та циліндричної поверхні. Ордината профіля дороги  $Z(X)$  змінюється по довжині, що приводить до зміни положення осі колеса  $h$ . Відповідно  $h=h(Z)$ . Цю залежність дещо змінює деформації колеса та дорожнього покриття які залежать від опорної реакції  $b_k$ . Таким чином профіль дороги об'єктивно і однозначно відображає вплив дорожнього полотна на мобільний робот.

У випадку коли наявний точковий контакт гусениці із виступами по огиначній колії маємо суттєвий вплив конструкції шасі на теоретичну модель дорожнього полотна по якому рухається мобільний робот (рис. 3.5).

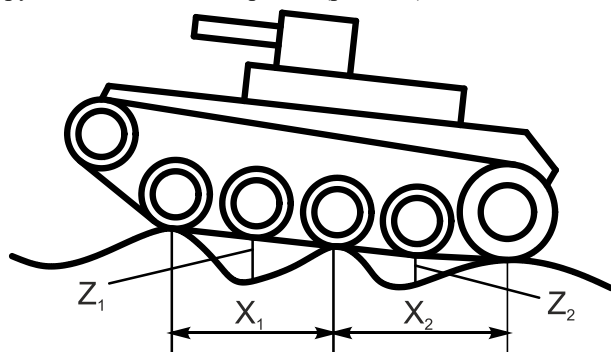


Рис. 3.5. Пояснення причин впливу конструкції та розмірів шасі мобільного робота на теоретичну модель окремої колії

На основі вищенаведеного розглядається плавно змінні види колії та коліс із періодичним точковим контактом гусениці із дорогою.

Плавно-змінні профілі окремої колії можуть бути описані, як детермінованими функціями так і випадковими процесами. Тому для моделювання дії дорожніх умов першої групи профілі окремої колії описані детермінованими або випадковими функціями. Для детермінованих дорожніх умов здійснено опис профіля колії відрізком ряду Фур'є [28]:

$$z(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_0 x) + b_k \sin(k\omega_0 x)$$

де  $z$  – поточна висота дорожнього полотна в точці з координатою  $x$ ;  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  – коефіцієнти ряду Фур'є;  $\omega_0$  – параметр, що визначає характерний період зміни висоти профіля дороги.

Коефіцієнти ряду, пов'язані із профілем дороги  $z(x)$ :

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T z(\tau) \cos(k\omega_0 \tau) d\tau \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T z(\tau) \sin(k\omega_0 \tau) d\tau$$

В загальному вигляді опис профіля дороги здійснено полігармонічною функціональною залежністю:

$$z(x) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin(k\omega_0 x + \psi_{0k}),$$

де  $A_k$  та  $\psi_{0k}$  – амплітуди і початкові фази окремих гармонічних складових профіля дороги.

Дані параметри визначаються через коефіцієнти ряду Фур'є:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \psi_{0k} = \arctg b_k / a_k.$$

Як приклад розглянуті усталені ділянки колії (рис. 3.6).

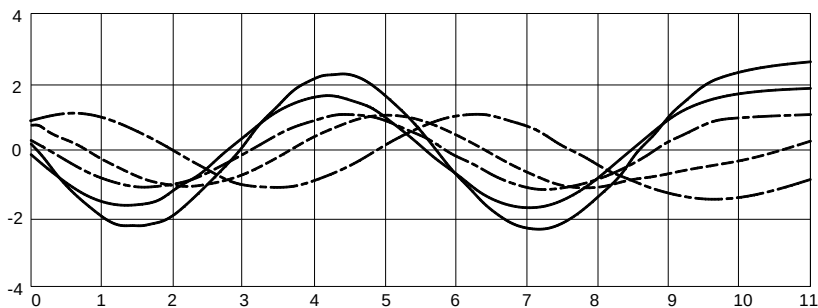


Рис. 3.6. Приклад опису профіля колії полігармонічною функцією

Використання кількох залежностей як показано на рисунку дає можливість подати теоретичну модель окремої колії у вигляді однієї функції із параметрами зміни яких дають можливість описати множину (набір) подібних колій.

Застосування рядів Фур'є для опису детермінованої колії часто буває утрудненою некоректністю постановки задачі стосовно ряду Фур'є. В процесі проведених робіт надані рекомендації відповідно яких некоректно поставлена задача обчислення нескінченного ряду Фур'є регулюється введенням форм-фактора [79].

Запропоновані методи ефективні для періодичних або квазіперіодичних детермінованих профілів колії.

При переміщенні мобільного робота часто мають місце перехідні ділянки колії (рис. 3.7).

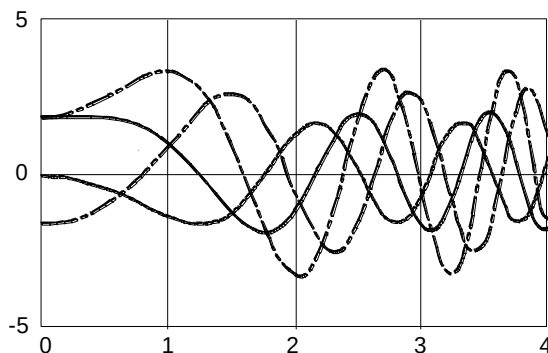


Рис. 3.7. Приклад множини перехідних ділянок колії

Для опису перехідної ділянки додається дзеркально відповідна ділянка профіля. Тобто, перехідна ділянка профіля дзеркально продовжується в ліву напівплощину з одержанням квазіперіодичної залежності. Дана залежність описується рядом Фур'є із виключенням введення похибок обчислень, причиною яких є явище Гібса [28].

Проведено моделювання другої групи дорожніх умов характерних для бездоріжжя. Дані дорожні умови відповідають ізольованим нерівностям, які розташовані поодинокі або групами. Дані дорожні умови як правило є детермінованими.

Здійснено аналіз дорожніх умов для побудови математичних моделей. Виділені типові дороги різного виду, пересічена поверхня, бездоріжжя, міська забудова та робота комплексу в середині приміщень.

Послідовно розглянуті умови бездоріжжя із різко зміненими нестационарними змінами параметрів. Зокрема, це долання перешкод у вигляді виступів, траншей, сходинок, тощо. Виділено характерні перешкоди одиночного виду.

Характерними є плавно змінні виступи на дорозі. Як правило дані виступи деформуються колесом або гусеницею і згладжуються. Для їх опису запропоновані нескладні аналітичні вирази у вигляді косинусоїд або кривих Гауса (рис. 3.8).

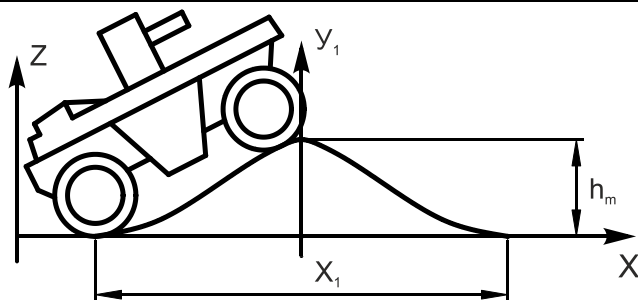


Рис. 3.8. Ізольовані гладкі виступи описані косинусоїдною та кривою Гауса

Виступи на дорозі даного виду описуються наступними залежностями:

$$z(x) = \pm \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \frac{x}{x_T} \right) \right] \times h_m \quad z(x) = \pm h_m e^{\frac{-(x-x_T/2)^2}{x_T^2/18}}$$

Параметри які входять в дані залежності визначаються видом нерівностей та деформаціями ґрунту і колеса мобільного робота. При цьому параметр  $h_m$  відображає висоту нерівності а параметр  $x_T$  її довжину. Гладкі виступи такого типу є найбільш загальними і дають можливість описати гладкі ізольовані нерівності дорожнього полотна різного виду.

Типовим видом одиничних нерівностей дороги є ступінки різного виду (рис. 3.9).

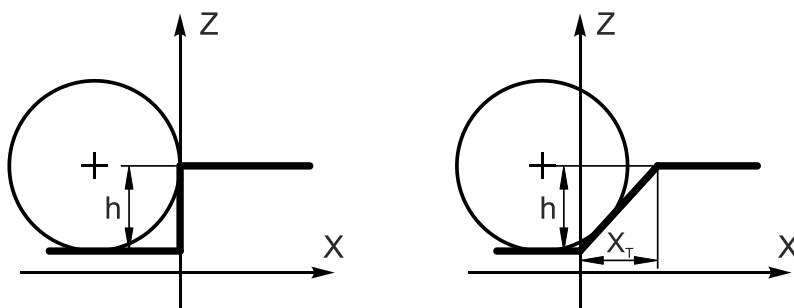


Рис. 3.9. Одиначні виступи дорожнього полотна у вигляді ступіньок

Висота ступінки  $h$  є характерною величиною, що визначає прохідність наземного роботизованого комплексу.

В технічному завданні на розробку мобільного робота вказується висоти ступінки. Для роботів малого класу даний параметр складає 150..250 мм. В абсолютній величині він є незначним. Він залежить від діаметра колеса мобільного робота. Як правило діаметр колеса вибирається більшим подвоєної висоти ступінки.

Для математичного опису ступінчастої нерівності використовують одиничну ступінчасту функцію з відповідним множником. При цьому модель дорожнього полотна набуває вигляду:

$$Z(x)=h \cdot 1(x).$$

Для протяжної ступінчастої нерівності застосовують модель у вигляді логічної залежності .

Використання ламаної лінійної залежності не завжди є зручним. Тому для опису східчастого виступу застосовується параболічна, синусоїдальна, експоненціальна чи подібна залежність, яка має сталу тенденцію до наростання.

Ефективною математичною моделлю ступінчастої нерівності дороги є її подання у вигляді розкладу в ряд Фур'є.

При цьому опис одиничної нерівності буде ідентичним викладеному раніше опису гладких нерівностей колії.

Запропоновано введення нерівності для приведення процесу до процесу нескінченного періода (рис. 3.10).

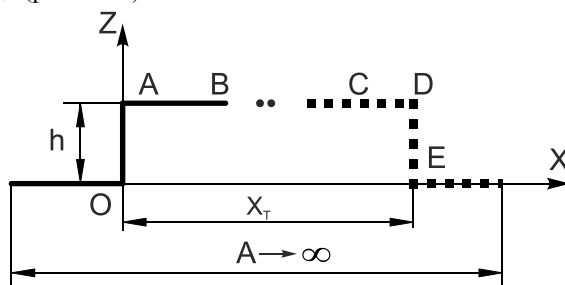


Рис. 3.10. Схема введення фіктивної нерівності у вигляді ступінки (показано пунктиром) для приведення ступінки до вигляду процесу нескінченного періода

Для одиночного виступу маємо опис процесу інтегралом Фур'є [6]:

$$z(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}C(\omega)e^{j\omega x}d\omega$$

Спектральна функція  $C(\omega)$  яка входить в підінтегральний вираз являє собою перетворення Фур'є нерівності дороги:

$$C(\omega)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}z(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau$$

Застосування інтеграла Фур'є часто є неефективним з точки зору реалізації обчислювальної процедури. Тому запропоновано приведення процесу нескінченного періода до процесу з кінцевим періодом (рис. 3.11).

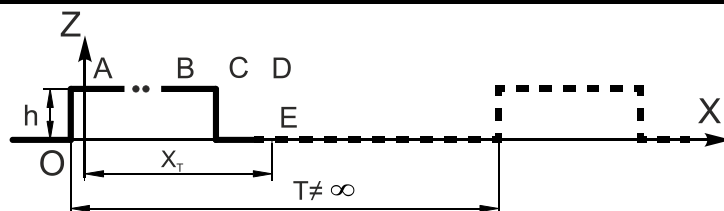


Рис. 3.11. Введення фіктивного періодичного процесу для опису ступінчастої нерівності дороги

При виборі достатньо великого значення періода  $T$  введений процес буде достатньо точно відповідати нерівності у вигляді сходинки. При цьому математичний опис профіля колії буде забезпечено рядом, а не інтегралом, що суттєво підвищує ефективність обчислювальної процедури.

Характерним видом одиничної нерівності є виступи або впадини на дорозі які мають кінцеву протяжність. Найбільш поширеним є одиничний прямокутний виступ (рис. 3.12).

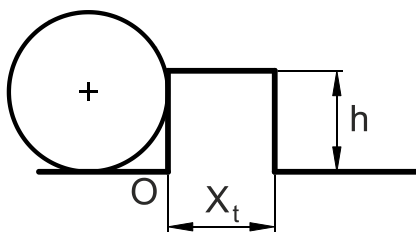


Рис. 3.12. Нерівність дорожнього полотна у вигляді ізольованого прямокутного виступу

Для опису даних нерівностей дороги застосовуються суми одиничних ступінчастих функцій:

$$z(x) = h[1(x) - z(x - x_1)],$$

де  $h$  – висота виступа;  $x_1$  – протяжність виступа

Для математичного опису виступа можна використовувати наведену раніше методику застосування інтегралу Фур'є або його модифікації у вигляді ряду Фур'є.

При побудові математичної моделі взаємодії ходової частини шасі із прямокутним виступом необхідно врахувати конструктивні особливості та геометричні розміри шасі, а також рельєф дорожнього покриття перед і після виступа (рис. 3.13).

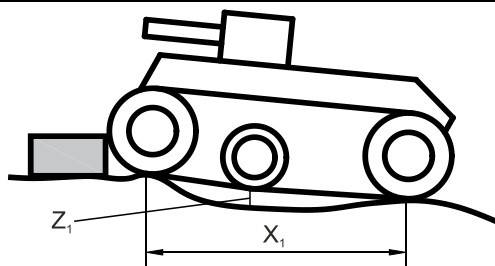


Рис. 3.13. Взаємодія гусениці із одним прямокутним виступом

Слід зазначити, що при лобовому або точковому контакті гусениці з виступом виникають ударні навантаження.

Дані навантаження залежать від швидкості руху мобільного робота та висоти виступу.

Виступи на дорозі можуть чергуватись із впадинами (рис. 3.14).

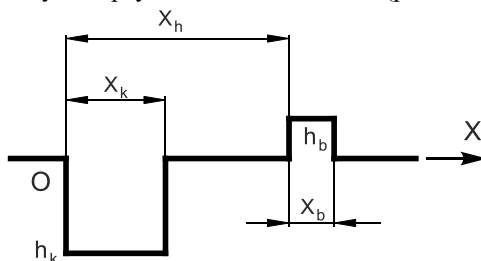


Рис. 3.14. Одиничні нерівності у вигляді сусідніх виступів та впадин

Опис даних нерівностей дороги доцільно здійснити сумою ступінчастих функцій:

$$z(x) = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot 1(x - x_i),$$

де  $h_i$  – висота виступу чи глибина впадини;  $x_i$  – координата стінки виступу.

Ізольовані нелінійні профілі колії можуть бути описані залежностями відповідними трикутним або трапецієвидним виступом (рис. 3.15).

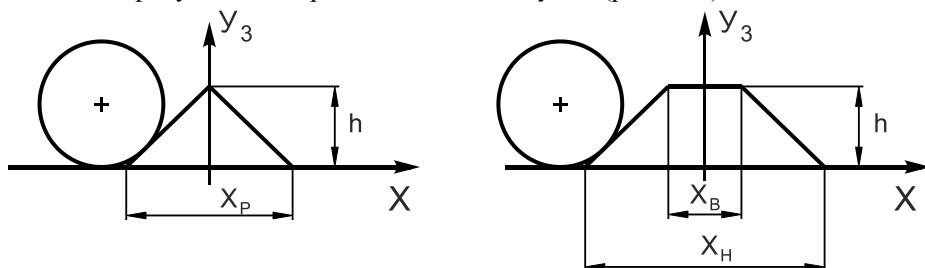


Рис. 3.15. Нерівності дороги відповідні трикутним та трапецієвидним виступам



Для математичного опису даних профілів колії як і раніше рекомендується інтеграл Фур'є або його наближення у вигляді ряду Фур'є.

Розглянуті виступи мають властивість симетрії. Тому ряди Фур'є будуть включати лише комплексні складові:

$$z(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_0 x)$$

Коефіцієнт ряду визначено формулами:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T z(x) dx, \quad a_k = \frac{2}{T} \int_0^T z(x) \cos(k\omega_0 x) dx$$

Врахування симетрії задачі суттєво спрощує процедуру обчислень.

Аналогічним чином описується несиметричні одиночні виступи. Вони можуть мати різну форму, наприклад криволінійний виступ з різким падінням (рис. 3.16).

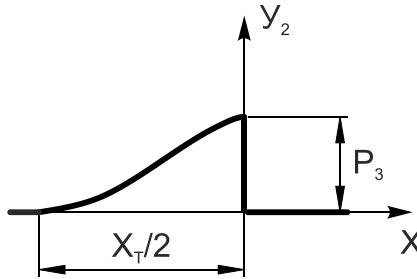


Рис. 3.16. Криволінійний ступінчастий виступ асиметричного виду

При описі даних виступів тригонометричні ряди будуть мати як синусні, так і косинусні складові.

Ефективним є застосування ряду Фур'є в комплексній формі. При цьому профіль колії опишеться комплексним виразом:

$$z(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{jk\omega_0 x}$$

Де комплексні коефіцієнти ряду визначаються залежностями:

$$c_{-k} = \frac{1}{2}(a_k + jb_k); \quad c_0 = \frac{a_0}{2}; \quad c_k = \frac{1}{2}(a_k - jb_k); \quad j = \sqrt{-1}.$$

Окремим випадком виступів є сходи у вигляді однакових ступіньок (рис. 3.17).

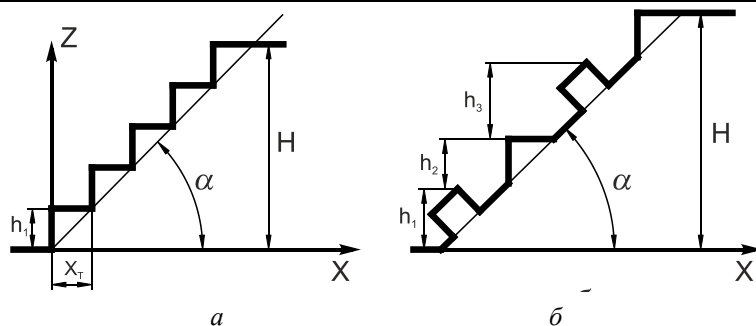


Рис. 3.17. Виступи у вигляді сходів однакового виду (а) та з різною формою сходинок (б)

Математичний опис ізольованих нерівностей описано сумою одиничних ортогональних функцій:

$$z(x) = \sum_{i=1}^N z_{mi} 1(x - x_i),$$

Для раціоналізації процесу математичного моделювання запропоновані математичні моделі профілів у вигляді рядів складень із кусково-постійних ортогональних функцій Уолша:

$$x(t) = \sum_{k=1}^N U_k \text{cal}(k, \frac{t}{T}) + V'_k \text{sal}(k, \frac{t}{T})$$

В ряд входять коефіцієнти  $U_k$ ,  $V_k$  які вибираються із умови найкращого наближення відрізка ряду реальному профілю дороги.

Опис профіля колії ортогональним функціям Уолша оптимізує процедуру обчислень при забезпеченні необхідної точності розрахунків.

Наведений вище опис одиничних нерівностей узагальнено на опис нелінійних періодичних та квазіперіодичних змін ординат окремої колії. Характерний є профіль колії із групою прямокутних виступів (рис. 3.18).

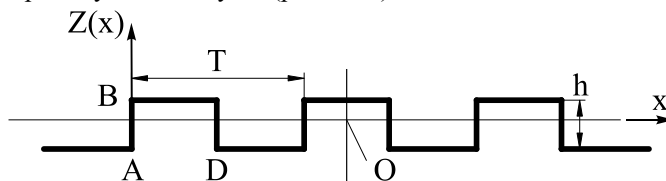


Рис. 3.18. Квазіперіодичні виступи утворені групою нерівностей профіля колії

Якщо період  $T$  є постійним маємо періодичний процес зміни ординат колії. При цьому профіль колії визначається врахуванням конструкції розмірів шасі мобільного

робота. Наприклад якщо період нерівностей  $T$  набагато менший характерного розміру шасі то враховується лише максимум нерівностей (рис. 3.19).

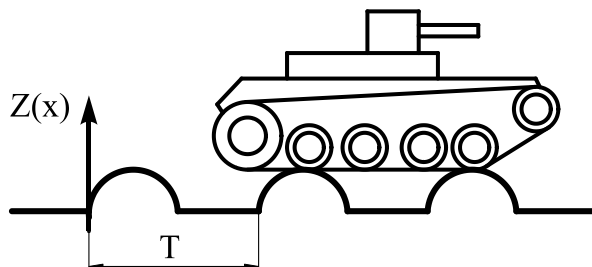


Рис. 3.19. Взаємозв'язок розмірів шасі із параметрами періодичних виступів дорожнього покриття

Строго періодичні виступи на поверхні дороги, як правило зустрічаються рідко. Більш характерним є наявність виступів відстань між якими є змінною (рис. 3.20).

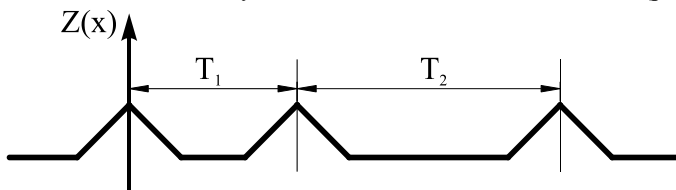


Рис. 3.20. Приклад колії з виступами період розташування яких є змінним

Для опису колій даного виду використовується квазіперіодичний протест розташування виступів. В якості періода вибирається відстань між скількома сусідніми відступами.

При описі нелінійного профіля корінь рядом Фур'є необхідно врахувати явище Гібса, що полягає у штучному веденні високочастотних осциляцій процесу (рис. 3.21).

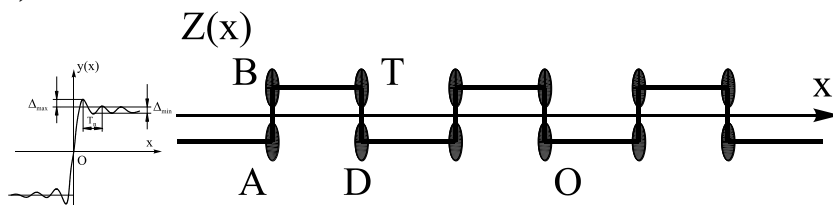


Рис. 3.21. Графічне зображення похибок математичного опису дорожніх нерівностей у вигляді прямокутних виступів

Наявність високочастотних осциляцій є небажаним явищем.

Для компенсації негативних наслідків вказаних особливостей математичного опису нелінійних колій застосовані методи фільтрації. Вони згладжують високочастотні осциляції процесів.

Розглянуті вище теоретичні моделі розроблені для чітко визначених (детермінованих) профілів колії (плавно змінних різко змінних). Дані методи узагальнені та профілі колії які є нечітко визначеними або змінними непередбачуваним чином.

Застосовано підхід до моделювання дорожнього покриття в якому прийнято, що профілі колії визначається залежностями випадкового виду.

### 3.2 Особливості опису стохастичних змін нерівностей дорожнього полотна і бездоріжжя

Дорожнє покриття по якому підвищується мобільний робот описано випадковими процесами. Вони дають можливість моделювати як плавно змінні так і різко змінні випадкові профілі кожної із колій (рис. 3.22).

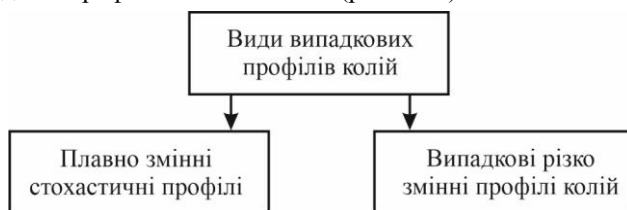


Рис. 3.22 - Види дорожнього полотна описані випадковими залежностями

Моделювання стохастичних профілів колії найбільш ефективно для плавно змінних профілів колії по яких рухається мобільний робот. При цьому колія подається по вигляді залежності із випадковими параметрами які описують набір плавно змінних по довжині профілів колії (рис. 3.23).

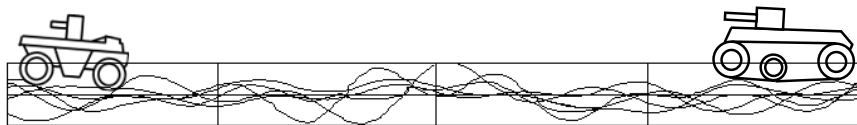


Рис. 3.23. Графічна інтерпретація переміщення мобільного робота по дорозі із випадково змінним профілем плавного виду

Для моделювання плавно змінного випадкового профіля колії застосовані різні методи.

Перший метод узагальнює опис детермінованого профіля тригонометричним рядом з випадковими коефіцієнтами:

$$x^*(t) = c_0^* + \sum_{k=1}^{\infty} a_k^* \cos k\omega_0 t + b_k^* \sin k\omega_0 t$$

Коефіцієнти  $c_0^*$ ,  $a_k^*$  та  $b_k^*$  в процесі їх математичного моделювання задаються генераторами випадкових чисел із відповідними законами розподілу.

Застосовані нормальний і рівномірний закони розподілу випадкових коефіцієнтів ряду. Недоліком даного методу є наближений опис статистичних характеристик даного профіля дороги. Зокрема спектральна щільність випадкової колії при цьому описується набором одиночних імпульсних функцій:

$$S_x(\omega) = 2\pi c_0^2 \delta(\omega) + \frac{\pi}{2} \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) [\delta(\omega - k\omega_0) + \delta(\omega + k\omega_0)]$$

Іншим методом є подання випадкового профіля колії у вигляді синусоїдальних функцій із випадковою початковою фазою.

В найпростішому вигляді використовується одна базова синусоїдальна функція:

$$x^*(t) = a \sin(\omega_0 t + b^*)$$

Даний типовий синусоїдальний профіль з випадковою фазою має характерну амплітуду та частоту. Данні параметри вибираються на основі аналізу експериментальних даних по профіля колії.

В якості незалежного параметра вибирається час  $t$  пов'язаний із довжиною колії залежністю  $x = Vt$ , де  $V$  швидкість переміщення мобільного робота яка може мати певні зміни.

Для типового випадкового синусоїдального профіля колії визначена статистична характеристика у вигляді кореляційної функції дорожнього покриття виду:

$$R_x(\tau) = \frac{a^2}{2} e^{-a\tau} \cos \omega \tau$$

Узагальненням даної теоретичної моделі випадкового профіля колії встановлено профіль колії у вигляді ряду складеного із гармонічних функцій із випадковими фазами:

$$x^*(t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k(\omega_0 t + \alpha^*) + b_k \sin k(\omega_0 t + \alpha^*)$$

Недоліком даної теоретичної моделі є складність визначення набору детермінованих коефіцієнтів.

Дана модель доцільна для використання у випадку наведених випадкових змін початкової фази. При цьому:

$$\alpha^* = \alpha_0 + \delta_\alpha, \quad \delta_\alpha \ll \alpha_0.$$

При реалізації виданого обмеження теоретична модель детермінованого виду достатньо просто узагальнюється на випадок опису випадкового профілю колії.

Позитивним актором застосування даної моделі є можливість визначення кореляційної функції у вигляді:

$$R_x(\tau) = c_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) \cos k \omega_0 \tau$$

Наведений стетоскоп реалізовано обчислювальною процедурою, що моделює профіль колії визначений випадковою полігармонічною функцією:

$$x^*(t) = \sum_{k=1}^{1000} \frac{c_k^*}{k} \sin[(k + a_k)t + b_k^*]$$

Для більш точного опису стохастичних профілів колії дорожнього полотна запропоновано описати стохастичні плавно змінні профілі колії гармонічними функціями з випадковими частотами.

Базовим варіантом є використання гармонік з випадковими зміна частоти:

$$x_v^*(t) = a_k \sin[(\omega_0 + c^*)t + b^*] \quad x^*(t) = a^* \sin\{[\omega_0 + x_w^*(t)]t + b^*\}$$

В дані залежності зміни частоти і початкової фази задані випадковими числами  $b^*$  і  $c^*$ . Дані випадкові числа задай генераторами випадкових чисел. Для числа  $b^*$  застосовується генератор рівномірним законом розподілу, а для числа  $c^*$  із нормальним законом розподілу. Приклад розрахунку набору профілів колії відповідних даному закону підтверджує його придатність для опису плавно змінних колій із незначними змінами періода нерівностей (рис. 3.24).

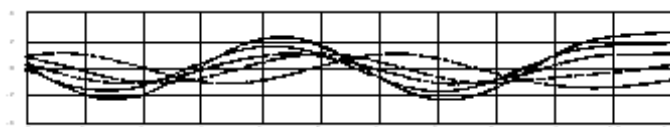


Рис. 3.24. Розрахунок профіля колії дорожнього полотна відповідний теоретичній моделі у вигляді синусоїдальної функції із рівномірним законом зміни початкової фази та незначними змінами частоти по нормальному закону

Для підвищення ефективності даної теоретичної моделі застосовують опис профіля колії змінного періода, частота якого є синусоїдальним випадковим процесом:

$$x^*(t) = a^* \sin\left\{\left[\omega_0 + a_\omega^* \sin(\omega_0 t + b_\omega^*)\right]t + b^*\right\}$$

Дана модель дає можливість описати більш складні дорожні умови із наявністю періодичних підвищень і впадин (рис. 3.25):

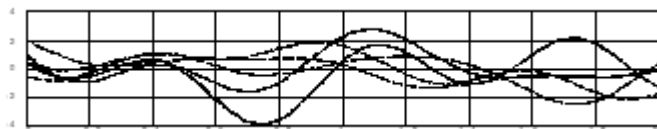


Рис. 3.25. Розрахункові профілі колії відповідні гармонічній функції частота якої змінюється у відповідності із синусоїдальний випадковим процесом

Ускладненням наведених вище теоретичних моделей є типовий профіль колії у вигляді синусоїдального процесу випадкової амплітуди, частоти і фази:

$$x^*(t) = a^* \sin[\Phi(t) + b^*]$$

Дана модель є загальною і дає можливість описати як усталені нерівності дороги так і ділянки нестационарного профіля дорожнього полотна (рис. 3.26).

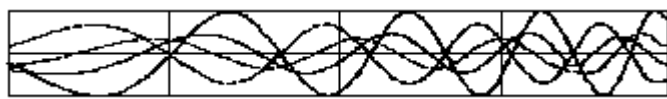


Рис. 3.26. Розрахунок профіля колії по загальній теоретичній моделі синусоїдального виду

Наведені вище методи дають можливість сформулювати математичну модель для розрахунку профіля колії у вигляді неперервної залежності. Вона враховує як коротко періодичні так і довгоперіодичні зміни параметрів колії. Модель формує узагальнені випадкові дорожні умови переміщення мобільного роботи (рис. 3.27).

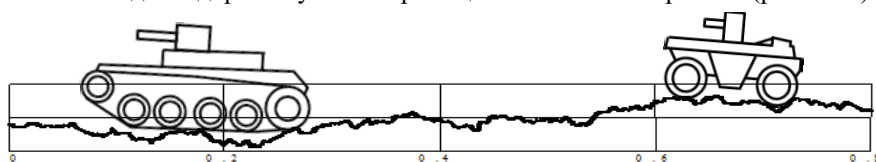


Рис. 3.27. Формування дорожніх умов за допомогою неперервної математичної моделі

Недоліком даної моделі є недостатня ефективність обчислювальної процедури обумовлена значною кількістю обчислень.

З метою спрощення математичного моделювання стохастичні профілі описані кусочно-постійними випадковими процесами. При цьому зокрема застосовані ряди складені із одиничних ступінчастих функцій:

$$x^*(t) = \sum_{k=0}^N a_k^* 1(t - k\Delta t)$$

де  $a_k^*$  - випадкові зміни нерівностей дороги;  $\Delta t$  - характерний проміжок часу, який визначає зміни дорожнього полотна.

Особливістю даної моделі є формування профіля колії у вигляді окремих ступінчик (рис. 3.28).

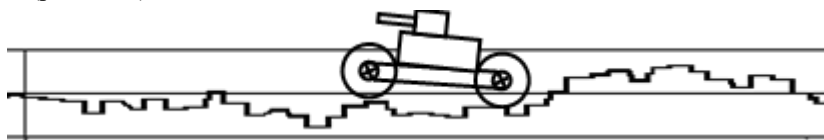


Рис. 3.28. Формування профіля колії у вигляді суми одиничних ступінчастих функцій

Узагальненням наведеної теоретичної моделі колії є застосування ряду із ступінчастих функцій які мають випадкові зміщення:

$$x^*(t) = \sum_{k=0}^N a_k^* 1\left(t - k\left(\Delta t + b_k^*\right)\right)$$

При відповідному виборі випадкового зміщення  $b_k^*$  формується уточнена модель профіля колії (рис. 3.29).

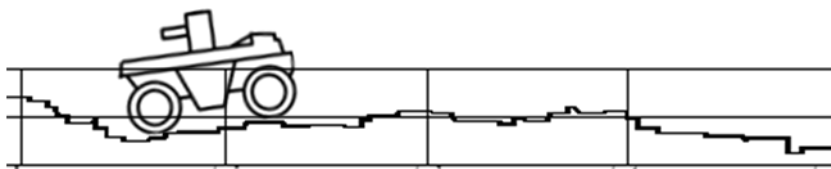


Рис. 3.29. Уточнена модель профіля колії, що враховує випадкові зміщення ступінчик

Для раціоналізації процесу математичного моделювання запропоновані математичні моделі профілів у вигляді рядів.

Використані ряди складені із кусково-постійних ортогональних функцій Уолша:

$$x^*(t) = \sum_{k=1}^N a_k^* \text{cal}\left(k, \frac{t}{T}\right) + b_k^* \text{sal}\left(k, \frac{t}{T}\right).$$

Коефіцієнти при функціях задаються генераторами випадкових чисел із нормальним законом розподілу.



Опис профіля колії ортогональними функціями Уолша оптимізує процедуру обчислень при забезпеченні необхідної точності розрахунків.

Для практичної реалізації алгоритмів формування стохастичних кусковопостійних процесів використані також засоби математичних пакетів. Зокрема здійснена побудова випадкового профіля колії в системі SIMULINK пакету MATLAB.

Для цього використані блоки бібліотеки SIMULINK  Band-Limited White Noise.

Блок реалізує випадковий профіль із зміною висоти відповідного широкополосному випадковому процесу (рис. 3.30).



Рис. 3.30. Графічне зображення реалізації профіля колії висота якої змінюється відповідно широкополосному випадковому процесу

Для формування профіля колії застосовані кусковопостійні випадкові процеси амплітуди яких розподілені по нормальному або рівномірному закону. Для цього застосовані блоки бібліотеки  Random Number  Uniform Random Number.

Приклад реалізації обчислювальної процедури визначає знаковмінний кусковопостійний випадковий процес (рис. 3.31).

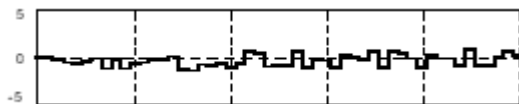


Рис. 3.31. Приклад формування випадкового профіля колії амплітуди змін якого відповідають нормальному закону розподілу

Наведені вище теоретичні моделі описують колію без врахування геометричних конструктивних параметрів мобільного робота. В процесі переміщення робота має місце точковий контакт гусениці або колеса із поверхнею ґрунту (рис. 3.32).

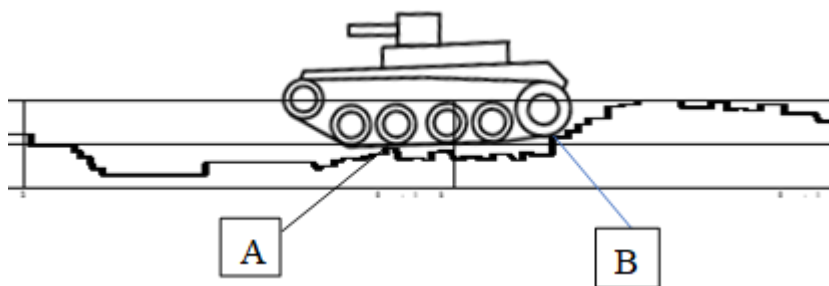


Рис. 3.32. Точковий контакт нерівностей ґрунту із гусеницею мобільного робота

Наявність окремих точок контакту суттєво змінює теоретичну модель колії та дію нерівностей на переміщення платформи мобільного робота. Дане питання розглянуто в наступному розділі.

### 3.3 Теоретичні моделі дії двох сусідніх колій на переміщення наземного роботизованого комплексу

Мобільний робот переміщується по двом сусіднім коліям. При цьому кожна колія спричиняє динамічну дію як на шасі мобільного робота так і на маніпулятор (рис. 3.33).

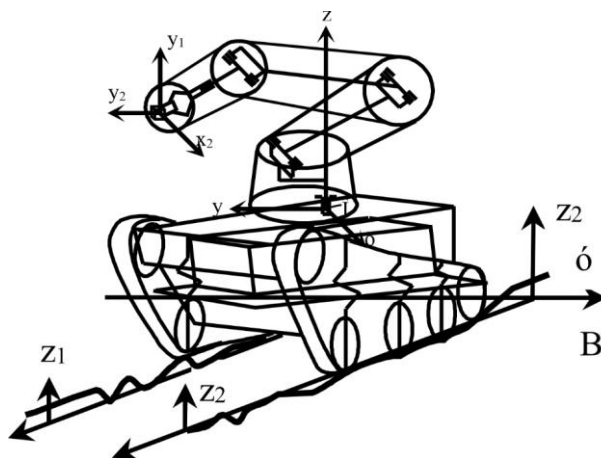


Рис. 3.33. Вплив нерівностей окремих колій на динамічні переміщення маніпулятора мобільного робота

Раніше розглянуті ідеалізовані випадки руху робота по двох однакових коліях. Одержані результати узагальнені на задачу переміщення робота по коліях з різним профілем.

Введені елементи класифікації пар колій по яким рухається комплекс. Сусідні колії як правило є однотипними по своїм якісним показникам. Однотипні колії взаємопов'язані по причині взаємодії із шасі роботизованого комплексу. Серед видів колій вирізняються різнотипні, що мають профілі із суттєво різними характеристиками (рис. 3.34).

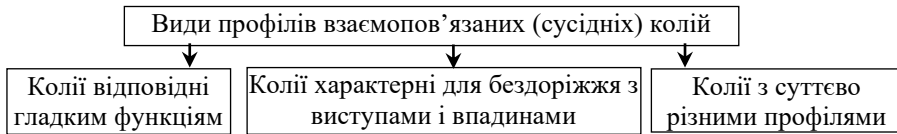


Рис. 3.34. Характерні види сусідніх колій по яким рухається шасі мобільного робота

При взаємодії коліс із різним профілем із шасі має місце зміна положення шасі яку доцільно визначити як депланацию рами шасі  $\Delta$  (рис. 3.35).

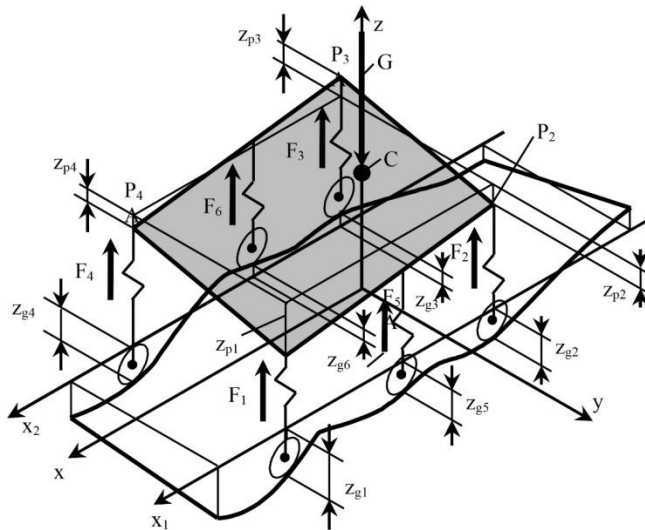


Рис. 3.35. Перекіс площини шасі внаслідок руху мобільного робота по двом коліям з різним профілем

Визначимо умови знаходження в одній в одній площині точок закріплення підвісок на шасі:

$$z_{p1} + z_{p3} - z_{p2} - z_{p4} = 0, \quad z_{p5} = \left(1 - \frac{D_3}{D}\right) z_{p1} + \frac{D_3}{D} z_{p2}, \quad z_{p6} = \left(1 - \frac{D_3}{D}\right) z_{p4} + \frac{D_3}{D} z_{p3}.$$

Як правило, мобільний робот має жорстку раму, яка деформується незначним чином. При цьому має місце переміщення вісей колісних пар або катків гусеничного рушія. Дані переміщення характеризують зв'язок нерівностей пар колій. Розрізняють плавно змінні та різко змінні сусідні профілі колій. Для математичного опису двох взаємопов'язаних колій застосовано описані раніше методи опису однієї колії. Для пари колій дані методи узагальнені на ряд типових випадків (рис. 3.36).

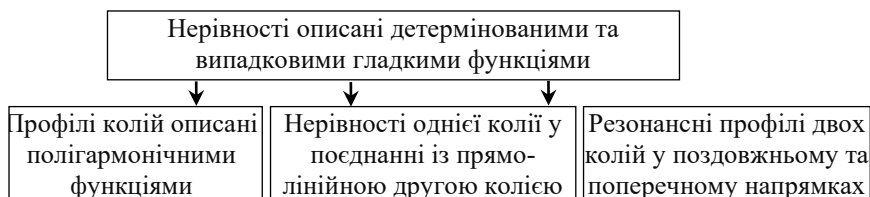


Рис. 3.36. Типові задачі математичного опису пари плавно-змінних профілів колій

Досліджені особливі випадки поєднання профілів взаємопов'язаних сусідніх колій.

При переміщенні мобільного робота по дорозі із абсолютно однаковими нерівностями має місце поздовжній резонанс переміщення окремої осі мобільного робота (рис. 3.37).

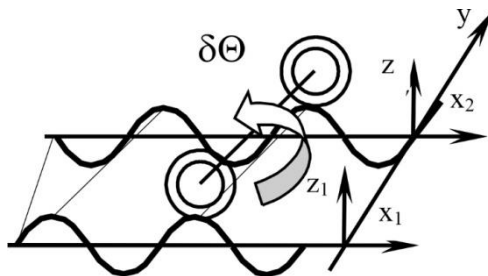


Рис. 3.37. Особливий випадок руху мобільного робота по двом однаковим волям синусоїдального виду

При цьому шасі робота з маніпулятором здійснює плоский рух в поздовжній вертикальній площині (рис. 3.38).

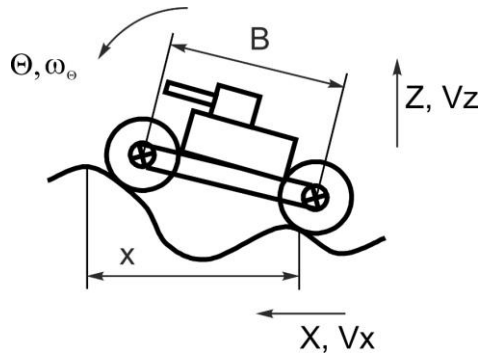


Рис. 3.38. Переміщення маси комплексу по дорозі із ідентичними коліями

Плоский рух мобільного робота описується переміщенням полюса в двох напрямках  $X$  та  $Z$  із поступальними швидкостями  $V_x$ ,  $V_z$  та кутовою швидкістю повороту  $\omega_0$  навколо вісі перпендикулярної площині переміщення робота.

Наведений особливий випадок порушується при наявності різниці фаз процесів, що описують пару колій. Як що різниця фаз складає півперіода, вісь шасі здійснює інтенсивні поперечно кутові переміщення (рис. 3.39).

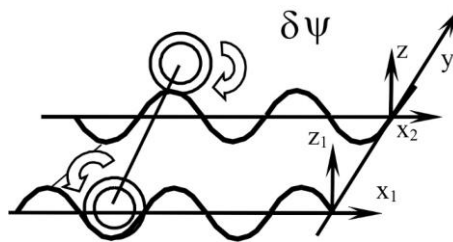


Рис. 3.39. Переміщення окремої вісі шасі мобільного робота по дорозі із однаковими коліями фази яких зміщені на половину періода

При переміщенні мобільного робота по дорогам такого виду може виникнути поперечний резонанс коливань шасі навколо поздовжньої вісі. Резонансні явища є небажаними і приводять до виникнення інтенсивних динамічних навантажень на наземний роботизований комплекс.

Характерним випадком двох взаємопов'язаних колій є поєднання колій із суттєвою різницею в профілях. Типовим є рух мобільного робота по дорозі одна колія якої є прямолінійною, а інша має довільний профіль (рис. 3.40).

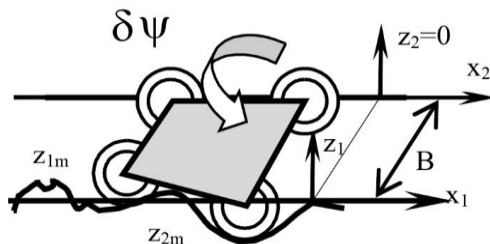


Рис. 3.40. Рух мобільного робота по дорозі одна із колій якої є прямолінійною

Прямолінійна колія стабілізує рух мобільного робота. Даний рух є гвинтовим. При цьому вісь миттєвого обертання паралельна лінії прямолінійної колії.

В загальному випадку плавно змінні колії мають випадковий профіль. Це приводить до випадкових просторових переміщень кожної із вісей мобільного робота (рис. 3.41).

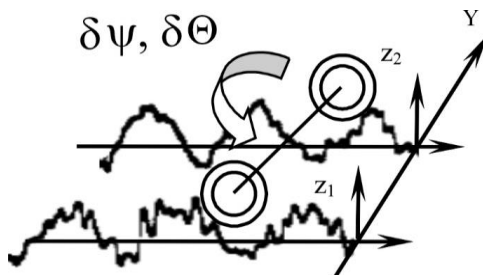


Рис. 3.41. Схема взаємодії колісної вісі мобільного робота із коліями з випадковим профілем

Наявність колій з випадковим профілем обумовлює випадкові коливання шасі мобільного робота. В окремих випадках реалізується особливі коливальні режими (статистичний резонанс) шасі.

Для встановлення статистичного зв'язку між змінами ординат пари колій проведено взаємний кореляційний аналіз випадкових профілів двох колій.

Визначено середні значення ординат двох колій як сума випадкових процесів:

$$z = z_1 + z_2.$$

Визначені кореляційні функції для двох випадкових процесів. Зокрема визначено взаємна кореляційна функція:

$$R(x, x') = R_1(x, x') + R_2(x, x') + R_{12}(x, x') + R_{21}(x', x).$$

де  $x$  та  $x'$  координати визначені по довжині колій.

Взаємні кореляційні функції визначено згідно залежностей:

$$R_{12}(x, x') = M \left[ z_{01}^*(x') z_{02}(x) \right], \quad R_{21}(x, x') = M \left[ z_{02}^*(x') z_{01}(x) \right].$$

Переміщення роботизованого комплексу в умовах бездоріжжя відповідає суттєво нелінійним коліям. Виконано класифікаційний аналіз нелінійних профілів колій. Видалено їх основні класифікаційні групи (рис. 3.42).

| Суттєво нелінійні профілі колій                            |                              |                                 |                                               |                                                   |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Профіль у вигляді поперечних канав і виступів (резонансні) | Перехресні виступи і впадини | Профілі екстремального опирання | Парні ступінчасті багатосходинкові нерівності | Ізольовані нерівності однієї із колій при гладкій |

Рис. 3.42. Основні класифікаційні групи колій з нелінійним профілем які характерні для умов бездоріжжя

Пари колій із суттєво нелінійним профілем обумовлюють особливі випадки опирання та переміщення шасі.

Екстремальні випадки опирання як правила супроводжуються суттєвими переміщеннями окремих коліс чи ділянок гусениці і можуть приводити до відриву гусениці від поверхні коліс (рис. 3.43).

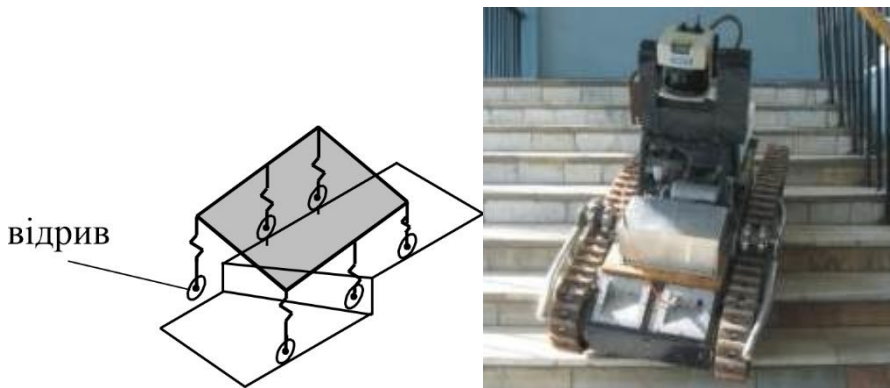


Рис. 3.43. Екстремальний випадок руху шасі по поверхні з нелінійними нерівностями типу сходів

При відриві колеса від поверхні мають місце підвищені навантаження на шасі та імпульсні (ударні) переміщення шасі поворотного тиску.

Екстремальні випадки опирання мають місце також у випадку коли одна із колій має виступи або заглибини (рис. 3.44).

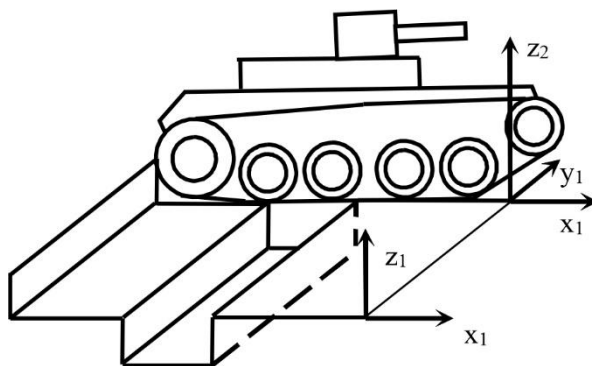


Рис. 3.44. Випадок переміщення мобільного робота по дорозі, колії якої мають виступи та заглибини

В даному випадку також можливий відрив шасі від ґрунту або різкі імпульсні поперечно-кутові переміщення шасі у вертикальній площині.

Особливим випадком поєднання нелінійних колій є наявність ізолюваних виступів і впадин на одній із колій (рис. 3.45).

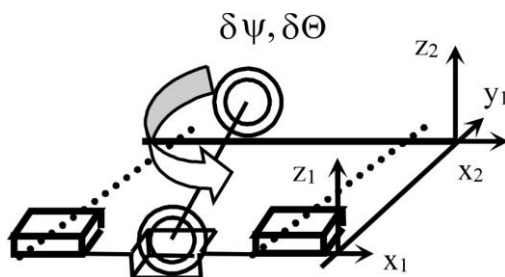


Рис. 3.45. Поєднання рівної колії із колією, що має ізолювані виступи та впадини

Якщо частота розташування виступів і впадин є кратною частоті власних поперечно-кутових коливань шасі або окремої вісі, то має місце рух робота по дорозі із нелінійним резонансним профілем. Даний профіль колії визиває інтенсивні поперечно-кутові переміщення шасі або вісі на кути  $\delta\psi$  чи  $\delta\Theta$ .

Аналогічні профілі колії розташовані кососиметрично на дорозі приводять до нелінійних поперечно кутових переміщень вісі або шасі робота в цілому (рис. 3.46).



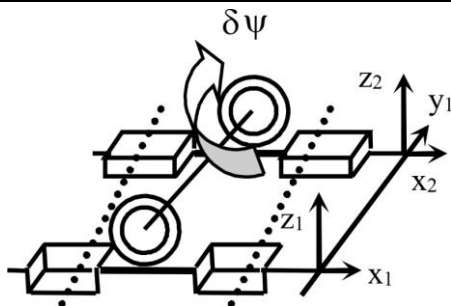


Рис. 3.46. Нелінійні профілі пари колій, що мають виступи та впадини розташовані в протифазі

При переміщенні мобільного робота по дорозі з коліями такого типу можуть мати місце нелінійні резонансні процеси.

### 3.4 Опис дії нерівностей дороги на платформу та маніпулятор мобільного робота

Динамічні переміщення шасі і маніпулятора мобільного робота визначаються нерівностями дорожнього полотна в загальному випадку від профілів двох колій по яким переміщається робот.

Мобільний робот має незначні розміри які, як правило є порівняними з нерівностями дорожнього полотна. Тому геометрія колісного чи гусеничного шасі мобільного робота також суттєво впливає на динамічні переміщення платформи, а відповідно і маніпулятора мобільного робота. Дане положення має ряд винятків.

Якщо нерівності дороги та крок їх розташування є незначними і не перевищують плями контакту колеса із дорожнім полотном то можна вважати, що геометричні розміри колісного рушія не впливають на коливання платформи (рис. 3.47).

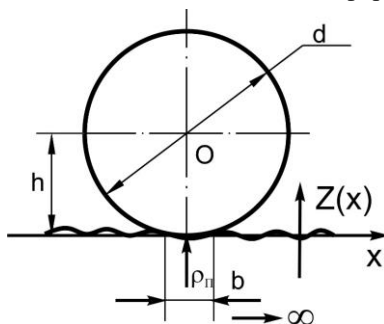


Рис. 3.47. Профіль дорожнього полотна розміри якого набагато менші плям контакту колеса із дорогою

Аналогічно можна вважати, що розміри колеса не змінюють вплив нерівностей дороги на переміщення шасі у випадку коли радіус колеса є меншим радіуса кривизни впадини дорожнього полотна (рис. 3.48).

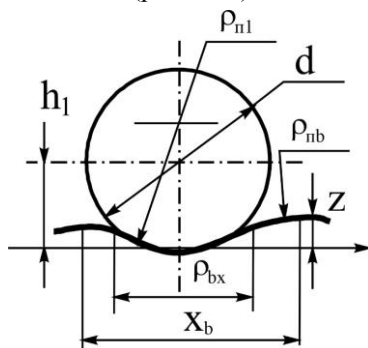


Рис. 3.48. Взаємодія колеса із дорожнім покриттям у випадку коли радіус кривизни впадини дороги є більшим радіуса колеса

Радіус кривизни виступів дороги не змінюють умов опирання коліс на ґрунт і не впливають на процес взаємодії колеса з дорогою.

Наведені вище випадки є характерними для руху колісного мобільного робота по дорогам із довгоперіодичними нерівностями коли база шасі  $B$  перевищує середній крок нерівностей (рис. 3.49).

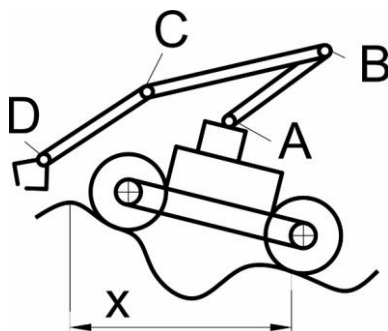


Рис. 3.49. Схема переміщення платформи мобільного робота по дорозі із довгоперіодичними нерівностями

Положення шасі мобільного робота в даному випадку буде визначатись лише нерівностями дороги. Переміщення важелів маніпулятора пов'язане із рухом шасі та залежить від конфігурації маніпулятора (розташування шарнірів  $A, B, C, D$ ) та динамічних коливальних процесів у маніпуляторі.

Аналогічно розміри гусеничного шасі мало впливають на динамічні коливальні процеси руху мобільного робота при умові, що база гусениці є набагато меншого періоду нерівностей дороги.

В загальному випадку коли крок нерівностей дороги є меншим бази шасі гусениця забезпечує лише точковий контакт шасі із виступами дороги (рис. 3.50).

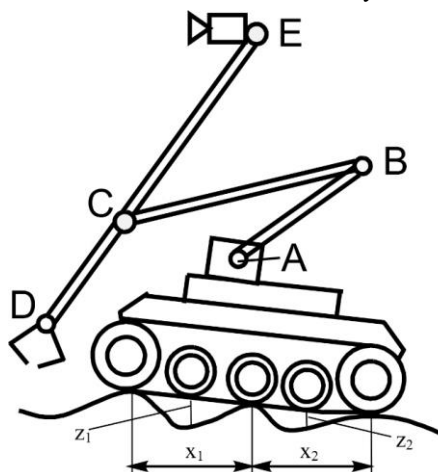


Рис. 3.50. Періодичний контакт гусениці із виступами колії при переміщенні НРК по нерівній дорозі

Періодичний контакт гусениці по нерівній дорозі має місце в окремих точках на виступах колії і здійснюється періодично із кроком  $x_1$ ,  $x_2$ . При цьому впадини профіля  $z_1 z_2$  мало впливають на шасі мобільного НРК.

Для мобільного НРК із колісним рушієм також має місце точковий контакт колеса із поверхнею дороги. Точковий контакт спостерігається у випадку, коли період нерівностей дороги  $x_d$  порівняний із діаметром колеса  $d$  (рис. 3.51).

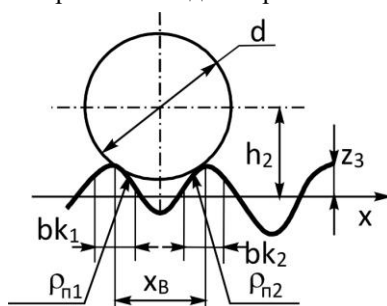


Рис. 3.51. Точковий контакт колеса з нерівностями дороги при переміщенні колісного НРК по колії з короткоперіодичними нерівностями

В реальних умовах рух мобільного робота складно встановити ступінь впливу розмірів шасі на динамічні переміщення платформи і маніпулятора.

Тому в процесі досліджень встановлено стохастичний взаємозв'язок нерівностей дороги із положенням платформи мобільного робота.

Для визначення випадкових вібропереміщень робота проведено виміри вібраційних параметрів у характерних точках .

Поперечно кутові переміщення визначені у вигляді різниць результатів вимірів вібраційних параметрів у характерних точках. Зокрема кут повороту:

$$\Theta = Z_A - Z_B.$$

Кутова швидкість:

$$\omega = \frac{dZ_A}{dt} - \frac{dZ_B}{dt}.$$

Кутове пришвидшення:

$$\varepsilon = \frac{d^2 Z_A}{dt^2} - \frac{d^2 Z_B}{dt^2}.$$

При вимірах застосовані акселерометри які дають безпосередні значення вібропришвидшень окремих точок комплексу, зокрема шасі та маніпулятора.

В результаті вимірів одержані експериментальні осцилографічні записи вібропришвидшень (рис. 3.56).

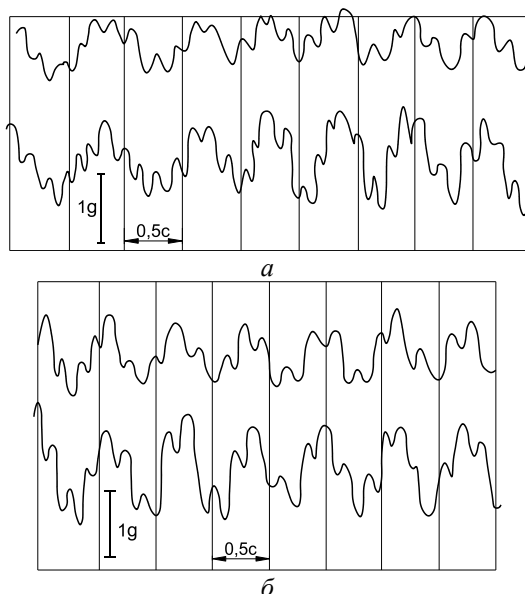


Рис. 3.56. Фрагменти записів вібропришвидшень шасі

Проведена статистична обробка осцилограм на основі гіпотези про стаціонарність і ергодичність випадкових вібропришвидшень.

Обчислення кореляційної функції та спектральної щільності здійснено за формулами:

$$R_{xj}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{(T - \tau)} \int_0^{T-\tau} x_{0j}(t)x_{0j}(t + \tau)dt \quad S_{xj}(\omega) = 2 \int_0^{\infty} R_{xj}(\tau) \cos \omega \tau d\tau$$

В результаті визначено статистичні характеристики випадкового вібропришвидшення шасі та маніпулятора мобільного робота. Зокрема визначено осереднений спектр потужності випадкових коливань шасі (рис. 3.57).

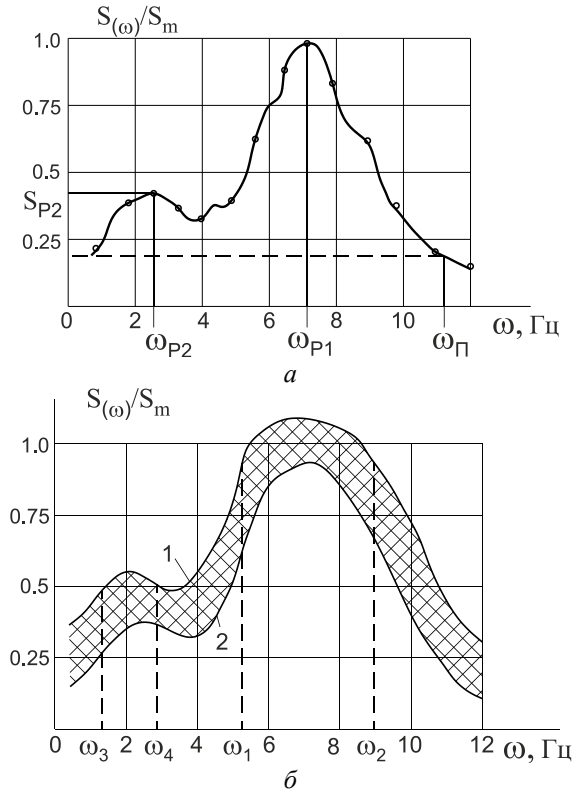


Рис. 3.57. Розрахункова спектральна щільність вібропришвидшень шасі наземного роботизованого комплексу

Встановлено, що випадкові коливання шасі ті маніпулятора у вертикальній та горизонтальній площині мають високочастотну та низькочастотну резонансні області відповідні власним частотам динамічної системи роботизованого комплексу.

## РОЗДІЛ 4

### Процеси обумовлені ступінчастими, імпульсними та вібраційними впливами на шасі наземного роботизованого комплексу

#### 4.1. Моделювання положення шасі при різко-змінній просадці ґрунту

При переміщенні наземного роботизованого комплексу в умовах бездоріжжя нерівності ґрунту визначають динамічні переміщення шасі і маніпулятора. При цьому основна маса комплексу, яка зосереджена в шасі змінює своє положення в просторі (рис. 4.1).

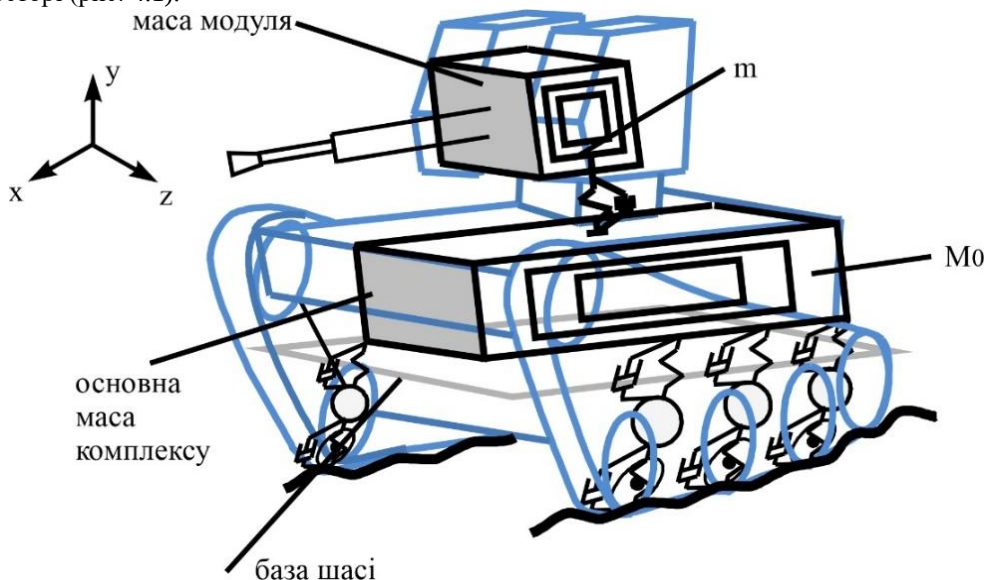


Рис. 4.1. Вплив нерівностей ґрунту на мобільний роботизований комплекс

Зміни положення бази шасі залежать від нерівностей ґрунту, зокрема просадки ґрунту. Просадка ґрунту має характер пружно пластичного деформування дороги в опорній області шасі. При цьому деформації ґрунту змінюються і мають різне значення для різних опорних областей.

В літературних джерелах розглянуто процес взаємодії великогабаритного колісного рушія із деформованою поверхнею ґрунту. Вказано на наявність пружних і остаточних (пластичних) деформацій ґрунту та деформації пневматичної шини.

Наземні роботизовані комплекси, як правило, мають незначну масу і габарити. Тому процес деформації гусениці або колеса мало впливає на процес взаємодії рушія із ґрунтом. Із врахуванням даної обставини розроблена розрахункова схема процесу просадки ґрунту по якому переміщується наземний роботизований комплекс. В даній схемі враховано пружну та пластичну складові деформації (просадку) ґрунту (рис. 4.2).

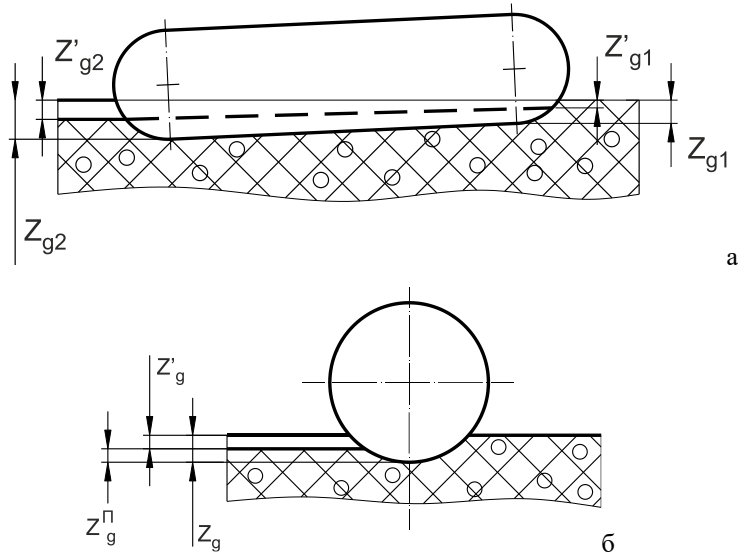


Рис. 4.2 - Схема взаємодії гусениці (а) та колеса (б) наземного роботизованого комплексу із деформованим ґрунтом

При взаємодії передньої частини гусениці або колеса з ґрунтом має місце його пластична деформація  $Z_{g1}$ . При цьому пластична деформація  $Z'_{g1}$  являє собою складову повної деформації  $Z_{П}$  і може сягати 60...80% від повної деформації. Пружна деформація ґрунту як правило є значно меншою ніж пластична. Це є характерним для бездоріжжя. В даній частині колеса пружна деформація  $Z_{g2}$  є більшою ніж деформація ґрунту в передній частині колеса. Це пояснюється кінцевим часом зміни структури ґрунту при переміщенні по ньому колеса. Пластична деформація ґрунту після проїзду мобільного робота наземного роботизованого комплексу є результатом реакції загальних деформацій і є залишковою зміною колії по якій рухається наземний роботизований комплекс. Як правило, різниця деформацій ґрунту відповідно в передній і задній частині колеса є незначного. Тому в першому наближенні різницю деформацій ґрунту по довжині опірної частини колеса можна не враховувати.

Запропонована схема відповідає рівному ґрунту по якому переміщується наземний роботизований комплекс. Як правило в умовах бездоріжжя поверхня ґрунту має суттєві нерівності. Тому пластична деформація (просадка) ґрунту буде змінюватись по довжині колії.

Просадка ґрунту буде більшою в місцях виступів дороги і меншою у впадинах. При цьому буде мати місце просторове переміщення базової площини шасі.

В першому наближенні розглянемо схему деформації ґрунту при наявності окремої підресореної частини шасі (рис. 4.3).

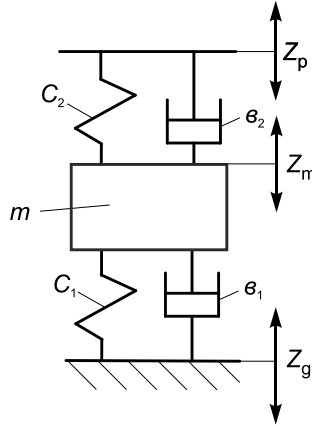


Рис. 4.3. Динамічна модель підресореної частини шасі яка взаємодіє з колією в точці G та з платформою шасі в точці P

Рівняння динамічних переміщень маси  $m$  запишемо у вигляді:

$$m \frac{d^2 z_m}{dt^2} = F_{\partial} + (z_{\partial} - z_m) c_1 + \left( \frac{dz_{\partial}}{dt} - \frac{dz_m}{dt} \right) b_1 - (z_m - z_p) c_2 - \left( \frac{dz_m}{dt} - \frac{dz_p}{dt} \right) b_2,$$

де  $Z_m$  - переміщення підресореної маси у вертикальному напрямку;  $Z_{\partial}$  - деформація дорожнього покриття;  $Z_p$  - переміщення платформи робота в місці встановлення підвіски;  $C_1$  - жорсткість дорожнього покриття;  $C_2$  - жорсткість підвіски;  $b_1$  - коефіцієнт опору дорожнього покриття;  $b_2$  - коефіцієнт опору підвіски.

Перетворимо дане рівняння шляхом розділення вхідних параметрів:

$$m \frac{d^2 z_m}{dt^2} + (b_1 + b_2) \frac{dz_m}{dt} + (c_1 + c_2) z_m = F_{\partial} + c_1 z_{\partial} + b_1 \frac{dz_{\partial}}{dt} + c_2 z_p + b_2 \frac{dz_p}{dt}.$$

Введемо нові константи:

$$T_m = \sqrt{\frac{m}{c_1 + c_2}}, \quad \zeta = \frac{(b_1 + b_2)}{2\sqrt{m(c_1 + c_2)}}, \quad K_F = \frac{1}{c_1 + c_2}, \quad K_p = \frac{c_2}{c_1 + c_2}, \quad K_{\partial} = \frac{c_1}{c_1 + c_2},$$

$$\tau_{\partial} = \frac{b_1}{c_1 + c_2}, \quad \tau_p = \frac{b_2}{c_1 + c_2}.$$

Здійснимо перетворення диференціального рівняння по Лапласу і одержимо залежить переміщення маси в операторній формі:

$$z_m(s) = W_F(s) \cdot F_{\partial}(s) + W_{\partial}(s) z_{\partial}(s) + W_p(s) z_p(s).$$

В дану залежить входять передавальні функції:



$$W_{\theta}(s) = \frac{K_{\theta}(1 + \tau_{\theta}s)}{T_m^2 s^2 + 2T_m \zeta s + 1}, \quad W_p(s) = \frac{K_p(1 + \tau_p s)}{T_m^2 s^2 + 2T_m \zeta s + 1},$$

$$W_F(s) = \frac{K_F}{T_m^2 s^2 + 2T_m \zeta s + 1}$$

Згідно розрахункової схеми системи встановлена динамічна дія з боку підресореної маси на платформу:

$$F(s) = (z_m - z_p) \cdot c_2 + \left( \frac{dz_m}{dt} - \frac{dz_p}{dt} \right) b_2.$$

Дана залежність подана в зображеннях по Лапласу:

$$F(s) = (c_2 + b_2 s) \cdot z_m(s) - (c_2 + b_2 s) z_p(s).$$

Після перетворень даної залежності одержимо:

$$F(s) = W_1(s)F_{\theta}(s) + W_2(s)z_{\theta}(s) + W_3(s).$$

Відповідно даної залежності побудована структурна схема для знаходження динамічної дії підвіски на шасі наземного роботизованого комплексу (рис. 4.4).

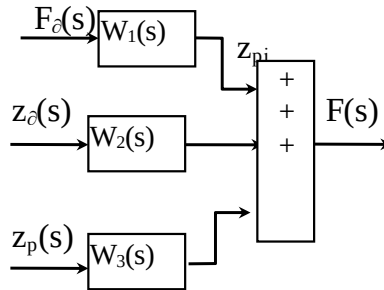


Рис. 4.4. Структурна схема моделі для визначення силової дії окремої підвіски колеса на платформу наземного роботизованого комплексу

Модель визначення переміщень точок закріплення підвісок подана у вигляді окремого блока (рис. 4.5).

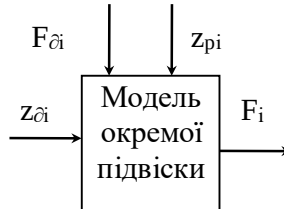


Рис. 4.5. Подання математичної моделі окремої підвіски у вигляді блока

Моделі окремих підвісок об'єднані в одну загальну модель, що визначає переміщення рами шасі наземного роботизованого комплексу (рис. 4.6).

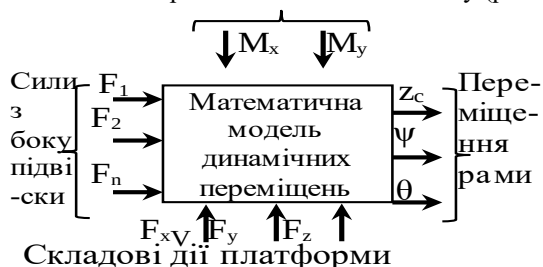


Рис. 4.6. Складові переміщень платформи, що визначають вплив деформації ґрунту в області окремої підвіски на вертикальні та поперечно кутові переміщення платформи

Розроблена математична модель використана для розрахунку динамічних переміщень шасі наземного роботизованого комплексу при ступінчастих деформаціях дорожнього полотна. В якості розрахункових деформацій прийнята ступінчаста просадка ґрунту в області окремої підвіски. При цьому деформації ґрунту в області підвіски описані одиничною ступінчастою функцією [6] :

$$z_{\phi}(t) = z_0 \cdot 1(t).$$

В результаті розрахунку одержано динамічні переміщення рами (рис. 4.7)

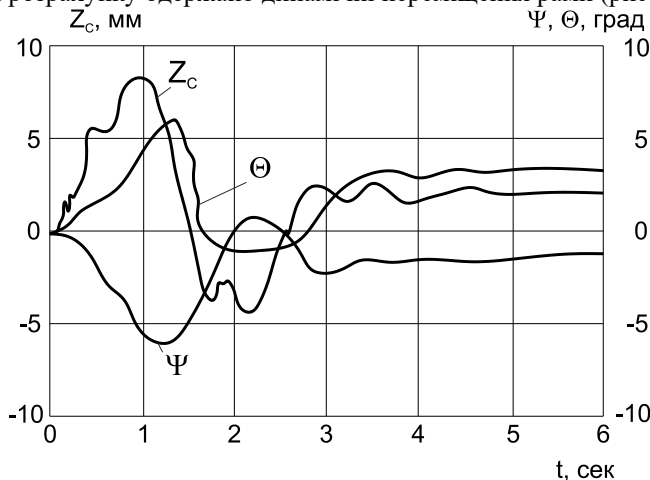


Рис. 4.7. Вертикальні та поперечно-кутові переміщення шасі мобільного робота при локальній ступінчастій просадці ґрунту в області передньої підвіски

Із результатів математичного моделювання випливає, що раптова просадка ґрунту в області передньої підвіски однієї із колій суттєвим чином змінює положення шасі роботизованого комплексу. Має місце перехідний процес просторових коливань шасі. При цьому динамічні переміщення в 3...5 разів перевищують статичні значення.

## 4.2. Моделювання положення шасі при ударних навантаженнях

Ударні навантаження на наземний роботизований комплекс регламентуються технічними умовами. При цьому регламентуються одиничні удари на наземний роботизований комплекс по кожній із вісей (серія ударів 12 шт.) з піковим пришвидшенням  $491 \text{ м/с}^2$  (50g) протяжністю 2...10 мс. Один удар із піковим пришвидшенням  $981 \text{ м/с}^2$  (100g) протяжністю 2...10 мс [75].

Оцінка працездатності наземного роботизованого комплексу проведена по спеціальній методиці, яка включає математичний опис ударного навантаження шасі і відповідну реакцію на удар внутрішнього вузла (маніпулятора) наземного роботизованого комплексу.

Особливістю регламентних навантажень є достатньо широкий діапазон зміни параметрів удару. Згідно технічних умов протяжність імпульсу змінюється до 5 разів. Це приводить до зміни енергії удару в 2...3 рази.

Розглянемо параметри імпульса пришвидшення при ударі (рис. 4.8).

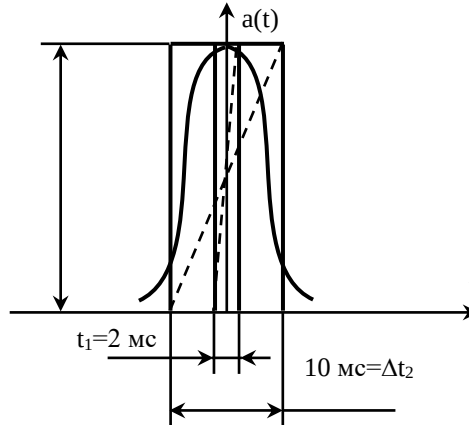


Рис. 4.8. Графічне зображення можливих варіантів форми імпульса пришвидшення для регламентних залежностей ударного імпульса пришвидшення, що діє на шасі наземного роботизованого комплексу

Форма імпульсу пришвидшення, що діє на шасі наземного роботизованого комплексу може бути описана різними залежностями

Розглянемо імпульс пришвидшення описаний ізольованим прямокутником. Рівняння прямокутного імпульса, записане у вигляді логічної умови, має вигляд:

$$a(t) = \begin{cases} a_m & \text{при } \frac{\Delta t}{2} \leq t \leq \frac{\Delta t}{2} \\ 0 & \text{при } t > \frac{\Delta t}{2}, t < \frac{\Delta t}{2} \end{cases}$$

Площа імпульса:

$$S_a = a_m \cdot \Delta t.$$

Площа є інтегральною нормою імпульса і визначається інтегралом, що має розмірність швидкості м/с:

$$S_a = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) dt.$$

Прийmemo площу імпульса в якості характерної величини (норми) динамічної дії удару на шасі наземного роботизованого комплексу. Регламентовані параметри імпульса чітко визначають його амплітуду  $a_m=50; 100$  g, але достатньо наближено задають ширину. При цьому регламентні значення можуть давати зміни інтегральної норми до 5 разів.

Криві, які описують імпульс пришвидшення, допускають інтегрування відповідне наведеним залежностям. Інтеграл пришвидшення визначає швидкість об'єкта. Для прямокутного імпульса інтеграл є нелінійною ламаною залежністю, що визначається логічною умовою:

$$U(t) = \int a(t) dt = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \Delta t/2 \\ 2a_m \left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) \frac{\Delta t}{2} & \text{при } \frac{\Delta t}{2} < t \leq \frac{\Delta t}{2} \\ a_m \Delta t = \text{const}, & \text{при } t \geq \Delta t/2 \end{cases}$$

Шляхом інтегрування визначимо швидкість об'єкта (рис. 4.9).

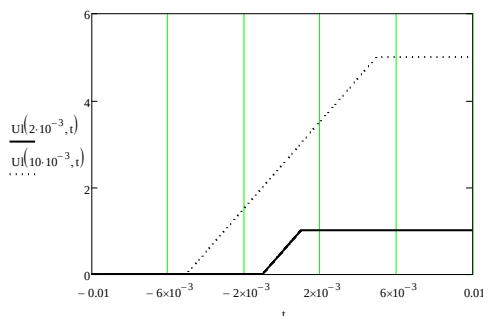
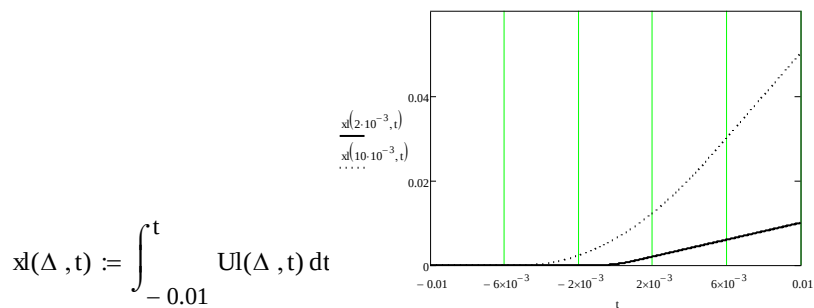


Рис. 4.9. Швидкість об'єкта відповідна інтегралу прямокутного імпульсу ударного навантаження

Швидкість шасі змінюється по лінійному закону.

Шляхом інтегрування швидкості визначимо переміщення шасі (рис. 4.10).



$$x(\Delta, t) := \int_{-0.01}^t U(\Delta, t) dt$$

Рис. 4.10. Переміщення наземного роботизованого комплексу відповідне подвійному інтегралу прямокутного імпульсу

Розглянемо імпульс пришвидшення описаний трикутним законом (рис. 4.11).

$$aT(\Delta, t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < \frac{-\Delta}{2} \\ \text{amy}1 \cdot \left( t + \frac{\Delta}{2} \right) & \text{if } t \geq \frac{-\Delta}{2} \\ 0 & \text{if } t \geq \frac{\Delta}{2} \end{cases}$$

$\frac{m}{c} \quad \text{amy}1 = 500 \quad aT(2 \cdot 10^{-3}, 0) = 0.5$

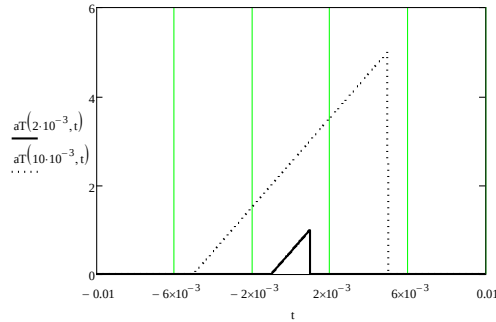
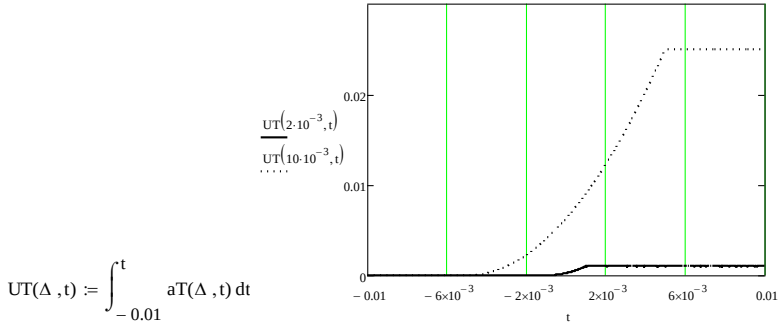


Рис. 4.11. Пришвидження шасі наземного роботизованого комплексу описане трикутним імпульсом

Швидкість наземного роботизованого комплексу відповідна трикутного імпульсу пришвидження визначиться інтегруванням і являє собою параболічну залежність (рис. 4.12).



$$UT(\Delta, t) := \int_{-0.01}^t aT(\Delta, t) dt$$

Рис. 4.12. Швидкість шасі наземного роботизованого комплексу відповідна інтегралу трикутного імпульсу

Переміщення шасі наземного роботизованого комплексу відповідне трикутному імпульсу пришвидження визначиться інтегралом його швидкості (рис. 4.13).

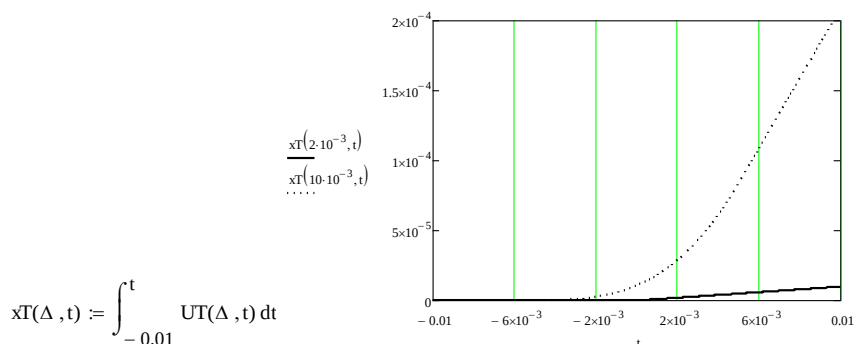


Рис. 4.13. Переміщення шасі наземного роботизованого відповідне подвійному інтегралу трикутного імпульсу

Для наближеного математичного опису ударного навантаження на шасі наземного роботизованого комплексу також рекомендується використати залежності, що застосовуються для апроксимації  $\delta$ -функції. Замість граничних співвідношень при апроксимації застосовуються кінцеві значення параметрів.

Імпульс пришвидшення є близьким аналогом одиначної імпульсної функції ( $\delta$ -функції Дирака). Тому для аналітичного опису імпульсу використані основні положення теорії символічних (узагальнених) функцій. Зокрема, імпульс апроксимовано залежностями відповідними  $\delta$ -функції [6].

Для апроксимації використано криволінійний імпульс у вигляді кривої Гауса (рис. 4.14). При цьому пришвидшення визначається залежністю:

$$a(t) = \frac{\alpha V}{\sqrt{\pi}} e^{-\alpha^2 t^2}, \quad a_m = \frac{\alpha V}{\sqrt{\pi}},$$

де параметр  $\alpha$  являє собою достатньо велике число ( $\alpha \rightarrow \infty$ ).

$$\text{ag}(\alpha, t) := a_m \cdot e^{-\alpha^2 t^2}$$

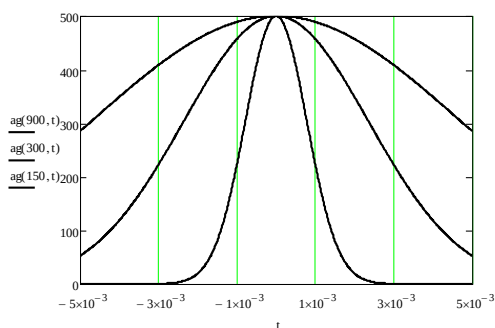


Рис. 4.14. Пришвидження відповідне імпульсу у вигляді кривої Гауса

Інтегрування виразів, що описують імпульс пришвидшення дає наступні залежності:

$$U(t) = \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \alpha t \right] V, \quad U(t) = \frac{V}{2} [\text{erf}(\alpha t) + 1].$$

Обчислені значення відповідають ступінчастим залежностям, які узагальнюються одиничною ступінчастою функцією в граничному варіанті.

Залежності  $U(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  дають інтегральну норму імпульса пришвидшення, яка відповідає площі імпульсу.

Визначені швидкість і переміщення шасі відповідні дії імпульсу пришвидшення у вигляді кривої Гауса (рис. 4.15 та рис. 4.16).

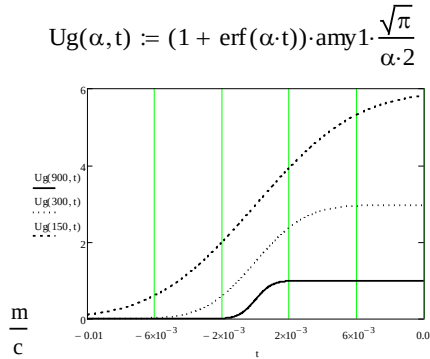


Рис. 4.15. Швидкість відповідна інтегралу кривої Гауса

$$x_g(\alpha, t) := \int_{-0.01}^t U_g(\alpha, t) dt$$

$$x_g(150, 0.01) = 0.059$$

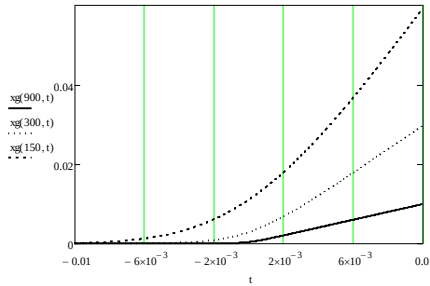


Рис. 4.16. Переміщення відповідне подвійному інтегралу кривої Гауса

Знайдені значення параметрів послужили основою для знаходження силових факторів, що діють на комплекс внаслідок удару.

Розглянемо динамічну модель комплексу із компактно розташованими масами . Прийемо двохмасову динамічну модель в якій одна маса відповідає шасі, а інша робочому модулю комплексу. Прийемо, що на комплекс діє вертикальний ударний імпульс, який характеризується залежними від часу пришвидшенням  $a(t)$ , швидкістю  $V(t)$  та переміщенням  $z(t)$  (рис. 4.17).

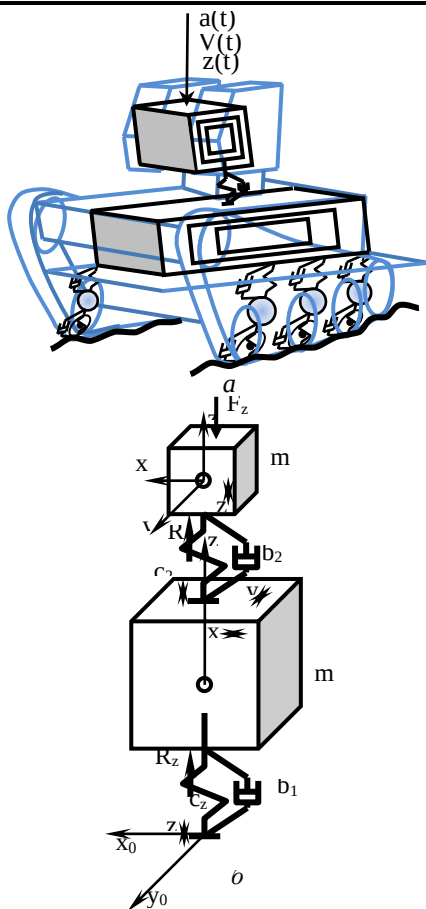


Рис. 4.17. Дія ударного пришивдшення на наземний роботизований комплекс (а) та динамічна модель комплексу при дії вертикального ударного імпульсу (б)

У відповідності із даною моделлю визначимо динамічні процеси при дії вертикального імпульсу. Маємо двохмасову динамічну модель з лінійними пружно-дисипативними зв'язками із рухомою основою  $z_0$ .

Складемо рівняння динамічної рівноваги модуля та платформи наземного роботизованого комплексу

$$\begin{cases} m_2 \frac{d^2 z_2}{dt^2} = F_z - c_2(z_2 - z_1) - b_2 \left( \frac{dz_2}{dt} - \frac{dz_1}{dt} \right) \\ m_1 \frac{d^2 z_1}{dt^2} = c_2(z_2 - z_1) + b_2 \left( \frac{dz_2}{dt} - \frac{dz_1}{dt} \right) - c_1(z_1 - z_0) - b_1 \left( \frac{dz_1}{dt} - \frac{dz_0}{dt} \right) \end{cases}$$

де  $m_1$ ,  $m_2$  – маси шасі і модуля відповідно,  $F_z$  – ударний імпульс,  $z_1$ ,  $z_2$  – переміщення центрів мас шасі і модуля;  $c_1$ ,  $c_2$  – жорсткості підвіски та пружного зв'язку модуля з



шасі;  $b_1, b_2$ —коефіцієнти опору підвіски та зв'язку шасі з модулем;  $z_0$  — переміщення поверхні ґрунту під час дії ударного імпульсу.

Перетворимо одержану систему рівнянь шляхом розділення змінних:

$$m_2 \frac{d^2 z_2}{dt^2} + b_2 \frac{dz_2}{dt} + c_2 z_2 - c_2 z_1 - b_2 \frac{dz_1}{dt} = F_z$$

$$m_1 \frac{d^2 z_1}{dt^2} + (b_1 + b_2) \frac{dz_1}{dt} + (c_1 + c_2) z_1 - c_2 z_2 - b_2 \frac{dz_2}{dt} = c_1 z_0 + b_1 \frac{dz_0}{dt}.$$

Перейдемо до нових констант:

$$T_2^2 \frac{d^2 z_2}{dt^2} + 2\xi_2 T_2 \frac{dz_2}{dt} + z_2 - z_1 - \tau_2 \frac{dz_1}{dt} = K_2 F_z$$

$$T_1^2 \frac{d^2 z_1}{dt^2} + 2\xi_1 T_1 \frac{dz_1}{dt} + z_1 - K_c z_2 - \tau_1 \frac{dz_2}{dt} = K_1 z_0 + \tau_3 \frac{dz_0}{dt},$$

де значення коефіцієнтів:

$$T_2^2 = m_2 / c_2, \quad \xi_2 = \frac{b_2}{2\sqrt{m_2 c_2}}, \quad \tau_2 = b_2 / c_2, \quad K_2 = 1 / c_2,$$

$$T_1^2 = m_1 / c_1 + c_2, \quad \xi_1 = \frac{(b_1 + b_2)}{2\sqrt{m_1(c_1 + c_2)}}, \quad K_c = c_2 / (c_1 + c_2),$$

$$\tau_1 = b_2 / (c_1 + c_2), \quad K_1 = c_1 / (c_1 + c_2), \quad \tau_3 = b_1 / (c_1 + c_2).$$

Виконаємо аналіз величин, які входять у вирази для коефіцієнтів.

Важливим є випадок, коли  $c_2 \gg c_1$ .

Тоді коефіцієнти:

$$T_1^2 = m_1 / c_2, \quad \xi_1 = \frac{(b_1 + b_2)}{2\sqrt{m_1 c_2}}, \quad K_c = 1, \quad \tau_1 = b_2 / c_2, \quad K_1 \approx c_1 / c_2, \quad \tau_3 = b_1 / c_2.$$

Перетворимо систему рівнянь по Лапласу при нульових початкових умовах:

$$\begin{cases} (T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)z_2(s) - (1 + \tau_2 s)z_1(s) = K_2 F_z(s) \\ (T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)z_1(s) - (K_c + \tau_1 s)z_2(s) = (K_1 + \tau_3 s)z_0(s) \end{cases}$$

Розв'яжемо дану систему алгебраїчних рівнянь і визначимо зображення по Лапласу переміщень окремих мас комплексу.

Із першого рівняння знайдемо:

$$z_1(s) = \frac{(T_2^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)}{(1 + \tau_2 s)} \cdot z_2(s) - \frac{K_2}{1 + \tau_2 s} \cdot F_z(s).$$

Підставимо дане значення у друге рівняння і одержимо:

$$\left[ \frac{(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)}{(1 + \tau_2 s)} - (K_c + \tau_1 s) \right] z_2(s) =$$

$$= (K_1 + \tau_3 s) z_0(s) + \frac{K_2 (T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)}{(1 + \tau_2 s)} F_z(s)$$

Звідси знайдемо зображення по Лапласу переміщення модуля:

$$z_2(s) = \frac{(K_1 + \tau_3 s)}{A(s)} z_0(s) + \frac{K_2 (T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)}{A(s)(1 + \tau_2 s)(K_c + \tau_1 s)} F_z(s)$$

,де:

$$A(s) = \frac{(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1)(K_c + \tau_1 s)}{(1 + \tau_2 s)}$$

Переміщення модуля залежать від ударного імпульса та присадки ґрунту згідно залежності:

$$z_2(s) = W_{z0}(s) \cdot z_0(s) + W_{2F}(s) \cdot F_z(s)$$

Подібним чином знайдемо залежність переміщення шасі під дією ударного імпульса і одержимо:

$$z_1(s) = W_{1z0}(s) \cdot z_0(s) + W_{1F}(s) \cdot F_z(s)$$

Подамо залежність у вигляді блок схеми (рис. 4.18).

Структурна математична модель реалізована засобами системи Simulink пакету matlab [73].

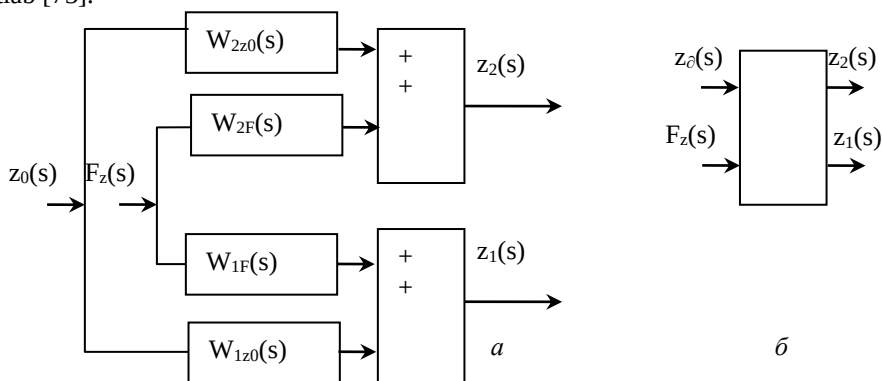


Рис. 4.18. Структурна блок схема (а) та блок схема (б) динамічної системи, що визначає переміщення шасі модуля наземного роботизованого комплексу під дією вертикального ударного імпульсу

Проведена апробація розробленої моделі для типового наземного роботизованого комплексу. З використанням розробленої моделі проведено розрахунок динамічних переміщень модуля (маніпулятора) та шасі наземного роботизованого комплексу. При цьому визначено переміщення в часі шасі та маніпулятора спричинені дією вертикального ударного імпульсу (рис. 4.19).

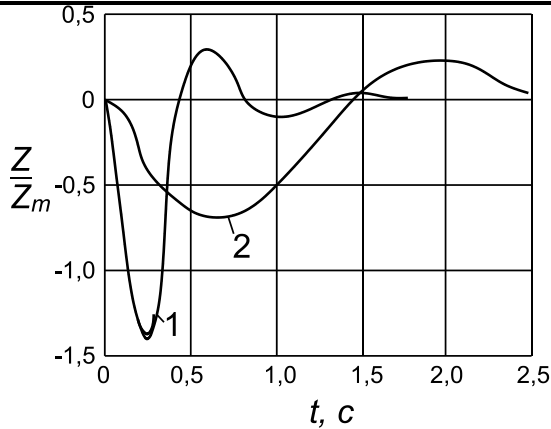


Рис. 4.19. Розрахункові значення переміщень вузлів комплексу під дією ударного імпульсу у вертикальному напрямку (крива 1 – переміщення маніпулятора; крива 2 – переміщення шасі)

Із результатів розрахунків випливає, що основний вплив імпульсу відбувається на модуль, який підлягає дії удару. Переміщення модуля перевищують переміщення шасі в 2 і більше разів. Це має місце і у випадку розташування наземного роботизованого комплексу на деформованому ґрунті. Причиною цього є короткочасність дії імпульсу і підвищення несучої здатності шасі в динаміці.

Наведені результати є наближеними. При розгляді просторових задач процеси дії ударного імпульсу значно ускладнюються.

Внаслідок дії удірного імпульсу відбуваються деструктивні процеси в ґрунті, що супроводжуються його просадкою.

#### 4.3. Моделювання переміщення маніпулятора наземного роботизованого комплексу при дії імпульсу пришвидження на шасі

При ударному навантаженні шасі маніпулятор наземного роботизованого комплексу зазнає інтенсивних динамічних навантажень. Для визначення даних навантажень побудована спрощена динамічна модель. Прийнято, що шасі наземного роботизованого комплексу має розташований в центральній частині маніпулятор. Також прийнято однімірну динамічну задачу, згідно якої напрямки переміщень, швидкостей і пришвидшень шасі і маніпулятора співпадають. При цьому суттєво спрощуються рівняння динамічної рівноваги маніпулятора, але не втрачається якісна сторона опису динамічних процесів.

Відповідно вказаних припущень приймемо, що маніпулятор має масу  $m$  і з'єднаний з шасі наземного роботизованого комплексу лінійним пружно-дисипативним зв'язком жорсткістю  $c$  і коефіцієнтом опору  $b$  (рис. 4.20).

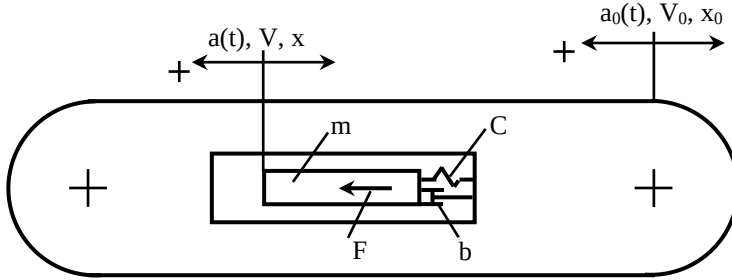


Рис. 4.20. Динамічна модель для визначення переміщення маніпулятора відносно шасі внаслідок дії ударного навантаження

Диференціальне рівняння переміщення маніпулятора запишемо у вигляді:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = c(x_0 - x) + b \left( \frac{dx_0}{dt} - \frac{dx}{dt} \right) + F,$$

де  $F$  – додаткова сила, що діє на маніпулятор;  $x_0$  – переміщення шасі;  $dx_0/dt$  – швидкість руху шасі;  $x$  – переміщення маніпулятора;  $dx_0/dt$  – швидкість переміщення шасі.

Перетворимо рівняння до стандартного вигляду. Для цього в ліву частину перенесемо складові, що відносяться до переміщення маніпулятора, його швидкості та пришвидшення:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F + cx_0 + b \frac{dx_0}{dt}.$$

Введемо нові константи:

$$T = \sqrt{\frac{m}{c}}, \quad \zeta = \frac{b}{2\sqrt{mc}}, \quad K = \frac{1}{c}, \quad \tau_0 = \frac{b}{c}.$$

При цьому рівняння набуде вигляду:

$$T^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\zeta T \frac{dx}{dt} + x = KF + x_0 + \tau_0 \frac{dx_0}{dt}.$$

Константи, що входять в рівняння залежать від параметрів маніпулятора і є невизначеними. Найбільш суттєвим із параметрів є постійна часу  $T$ , що визначає частоту власних коливань маніпулятора. Тому в якості характерного параметра прийнята частота власних коливань маніпулятора  $\nu = \frac{1}{2\pi T}$ ,  $T = \frac{1}{2\pi\nu}$ . Параметр згасання  $\zeta$  є мірою втрат енергії при переміщенні маніпулятора і може бути прийнятий оціночно в діапазоні  $0,01 \leq \zeta \leq 0,04$ . Коефіцієнт передачі  $K$  не є суттєвим тому, що він визначає невідомі сили, які діють на маніпулятор.

Для визначення постійної часу  $\tau_0$  використаємо залежність:

$$\tau_0 = \frac{b}{c} = \frac{2\sqrt{mc}\zeta}{c} = 2\zeta \sqrt{\frac{m}{c}} = 2\zeta T.$$

Відповідно постійна часу визначена через динамічні параметри системи.

Перетворимо рівняння по Лапласу при нульових початкових умовах:

$$(T^2 S^2 + 2\zeta TS + 1)X(S) = KF(S) + (1 + \tau_0 S)X_0(S),$$

де  $X(S)$ ,  $X_0(S)$  – зображення по Лапласу переміщення маніпулятора та переміщення шасі;  $F(S)$  – зображення по Лапласу діючої сили.

Врахуємо наявний диференціальний зв'язок переміщення та пришвидшення:

$$a_0(t) = \frac{d^2 x d(t)}{dt^2}.$$

Після перетворення по Лапласу одержимо:

$$A_0(S) = S^2 X_0(S),$$

де  $A_0(S)$  – зображення по Лапласу пришвидшення шасі.

Звідси визначимо зображення по Лапласу пришвидшення:

$$X_0(S) = \frac{1}{S^2} A_0(S).$$

Підставимо значення переміщення в операторне рівняння і визначимо з нього переміщення маніпулятора:

$$X(S) = \frac{K}{T^2 S^2 + 2\zeta TS + 1} F(S) + \frac{(1 + \tau_0 S)}{(T^2 S^2 + 2\zeta TS + 1)S^2} A_0(S).$$

Визначимо передавальні функції відповідні даному співвідношенню:

$$X(S) = W_F(S) F(S) + W_{AX}(S) A_0(S),$$

де  $W_F(S) = \frac{K}{T^2 S^2 + 2\zeta TS + 1}, W_{AX} = \frac{1 + 2\zeta TS}{(T^2 S^2 + 2\zeta TS + 1)S^2}.$

Розглянута тестова задача визначення переміщення і швидкості маніпулятора під дією ступінчастих змін швидкості та переміщення шасі.

Прийняті значення константи:

$$T = 1.891 \times 10^{-3}$$

Зміни переміщення шасі: від 0 до  $x0c := 10^{-3}$

Зміни швидкості шасі: від 0 до  $v x0c := 0.05$

Розв'язок диференціального рівняння здійснено методом Рунге-Кутта при нульових початкових умовах. Застосована наступна процедура розв'язку диференціального рівняння

$$y := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \zeta_{\text{max}} := 0.6$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ \frac{(x0c + 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot v x0c - 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot y_1 - y_0)}{T^2} \end{bmatrix}$$

$$Y := \text{rkfixed}(y, 0, 0.01, 30, D)$$

В результаті числових експериментів підтверджена працездатність процедури .

Результати розв'язку диференціального рівняння подані у вигляді таблиці та відповідних графіків зміни в часі переміщення та швидкості маніпулятора (рис. 4.21).

|    | 0                     | 1                     | 2     |
|----|-----------------------|-----------------------|-------|
| 0  | 0                     | 0                     | 0     |
| 1  | $3.333 \cdot 10^{-4}$ | $1.61 \cdot 10^{-5}$  | 0.093 |
| 2  | $6.667 \cdot 10^{-4}$ | $5.98 \cdot 10^{-5}$  | 0.166 |
| 3  | $1 \cdot 10^{-3}$     | $1.246 \cdot 10^{-4}$ | 0.22  |
| 4  | $1.333 \cdot 10^{-3}$ | $2.047 \cdot 10^{-4}$ | 0.258 |
| 5  | $1.667 \cdot 10^{-3}$ | $2.949 \cdot 10^{-4}$ | 0.281 |
| 6  | $2 \cdot 10^{-3}$     | $3.907 \cdot 10^{-4}$ | 0.292 |
| 7  | $2.333 \cdot 10^{-3}$ | $4.885 \cdot 10^{-4}$ | 0.293 |
| 8  | $2.667 \cdot 10^{-3}$ | $5.851 \cdot 10^{-4}$ | 0.285 |
| 9  | $3 \cdot 10^{-3}$     | $6.781 \cdot 10^{-4}$ | 0.271 |
| 10 | $3.333 \cdot 10^{-3}$ | $7.654 \cdot 10^{-4}$ | 0.252 |
| 11 | $3.667 \cdot 10^{-3}$ | $8.459 \cdot 10^{-4}$ | 0.23  |
| 12 | $4 \cdot 10^{-3}$     | $9.185 \cdot 10^{-4}$ | 0.205 |
| 13 | $4.333 \cdot 10^{-3}$ | $9.827 \cdot 10^{-4}$ | 0.18  |
| 14 | $4.667 \cdot 10^{-3}$ | $1.038 \cdot 10^{-3}$ | 0.154 |
| 15 | $5 \cdot 10^{-3}$     | $1.085 \cdot 10^{-3}$ | ...   |

Y =

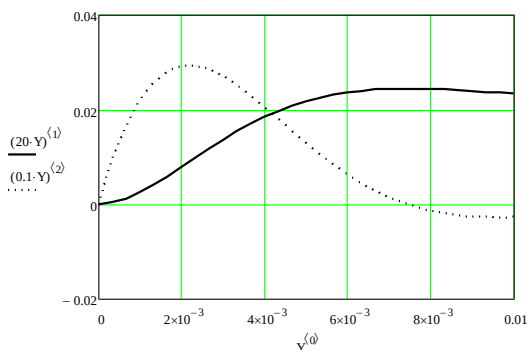


Рис. 4.21. Розрахункові переміщення і швидкість маніпулятора які відбуваються під дією ступінчастих змін швидкості та переміщення шасі

Відносне переміщення маніпулятора відповідає наведеному графіку і за час порядку 4.6 мс стабілізується на рівні близько 1мм.

Розглянута тестова задача визначення переміщення і швидкості маніпулятора під дією зміни швидкості та переміщення шасі узагальнена на випадок дії різних імпульсів пришвидшення.

Для базового трикутного імпульсу пришвидшення маємо розв'язок (рис. 4.22).

$$D(t,y) := \left[ \frac{y_1 \left( xT(\Delta, t + 0.01) + 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot UT(\Delta, t + 0.01) - 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot y_1 - y_0 \right)}{T^2} \right]$$

$$Y := \text{rkfixed}(y, 0, 0.02, 300, D)$$

|    | 0                     | 1                     | 2                     |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0  | 0                     | 0                     | 0                     |
| 1  | $6.667 \cdot 10^{-5}$ | $4.386 \cdot 10^{-8}$ | $1.308 \cdot 10^{-3}$ |
| 2  | $1.333 \cdot 10^{-4}$ | $1.733 \cdot 10^{-7}$ | $2.567 \cdot 10^{-3}$ |
| 3  | $2 \cdot 10^{-4}$     | $3.851 \cdot 10^{-7}$ | $3.78 \cdot 10^{-3}$  |
| 4  | $2.667 \cdot 10^{-4}$ | $6.762 \cdot 10^{-7}$ | $4.945 \cdot 10^{-3}$ |
| 5  | $3.333 \cdot 10^{-4}$ | $1.043 \cdot 10^{-6}$ | $6.064 \cdot 10^{-3}$ |
| 6  | $4 \cdot 10^{-4}$     | $1.484 \cdot 10^{-6}$ | $7.137 \cdot 10^{-3}$ |
| 7  | $4.667 \cdot 10^{-4}$ | $1.994 \cdot 10^{-6}$ | $8.165 \cdot 10^{-3}$ |
| 8  | $5.333 \cdot 10^{-4}$ | $2.571 \cdot 10^{-6}$ | $9.144 \cdot 10^{-3}$ |
| 9  | $6 \cdot 10^{-4}$     | $3.212 \cdot 10^{-6}$ | 0.01                  |
| 10 | $6.667 \cdot 10^{-4}$ | $3.914 \cdot 10^{-6}$ | 0.011                 |
| 11 | $7.333 \cdot 10^{-4}$ | $4.674 \cdot 10^{-6}$ | 0.012                 |
| 12 | $8 \cdot 10^{-4}$     | $5.49 \cdot 10^{-6}$  | 0.013                 |
| 13 | $8.667 \cdot 10^{-4}$ | $6.358 \cdot 10^{-6}$ | 0.013                 |
| 14 | $9.333 \cdot 10^{-4}$ | $7.276 \cdot 10^{-6}$ | 0.014                 |
| 15 | $1 \cdot 10^{-3}$     | $8.241 \cdot 10^{-6}$ | ...                   |

Y =

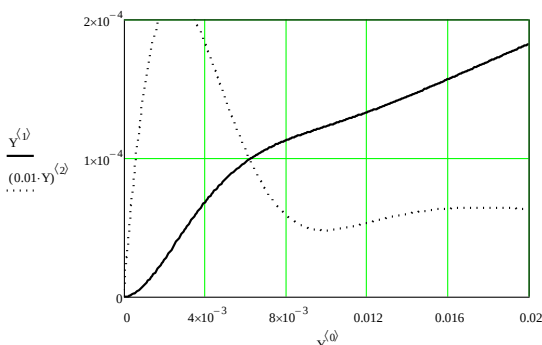


Рис. 4.22. Переміщення і швидкість маніпулятора під дією трикутного імпульса пришвидшення шасі

Для прямокутного імпульсу пришвидшення шасі (рис. 4.23).

$$D(t, y) := \left[ \frac{y_1 \left( xl(\Delta, t + 0.001) + 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot Ul(\Delta, t + 0.001) - 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot y_1 - y_0 \right)}{T^2} \right]$$

$$Y := \text{rkfixed}(y, 0, 0.02, 30, D)$$

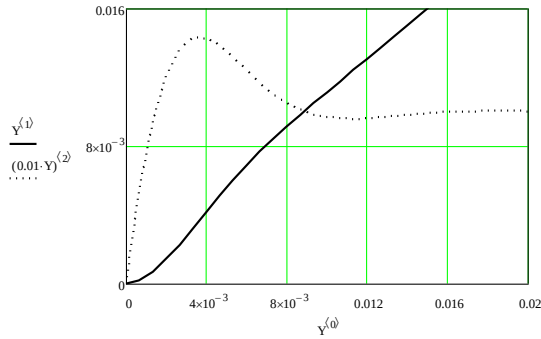


Рис. 4.23. Переміщення і швидкість маніпулятора під дією прямокутного імпульсу пришвидшення шасі

Для імпульсу у вигляді кривої Гауса маємо розв'язок наступних рівнянь (рис. 4.24).

$$D(t, y) := \left[ \frac{y_1 \left( xg(\Delta, t + 0.01) + 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot Ug(\Delta, t + 0.01) - 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot y_1 - y_0 \right)}{T^2} \right]$$

$$Y := \text{rkfixed}(y, 0, 0.02, 300, D)$$

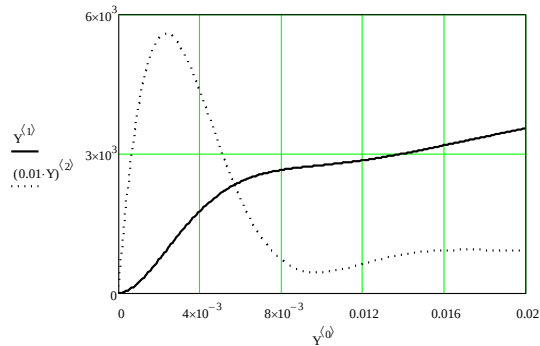


Рис. 4.24. Переміщення і швидкість маніпулятора під дією імпульсу пришвидшення у вигляді кривої Гауса

Встановлено, що закони зміни переміщення і швидкості об'єкту якісно є подібними для різних по формі імпульсів. Трикутний імпульс має найменшу енергію, Тому відповідні переміщення і швидкість є найменшими.

Визначено відносне переміщення маніпулятора відносно шасі під дією трикутного імпульса пришвидшення. Для цього переміщення об'єкту описано точковими значеннями з подальшою інтерполяцією:

$$v_x := Y^{(0)} \quad v_y := Y^{(1)} \quad xTz(t) := \text{linterp}(v_x, v_y, t)$$

Проведено контроль обчислень шляхом порівняння фактичних переміщень із результатом інтерполяції (рис. 4.25).

$$xTz(0.01) = 1.23 \times 10^{-4}$$

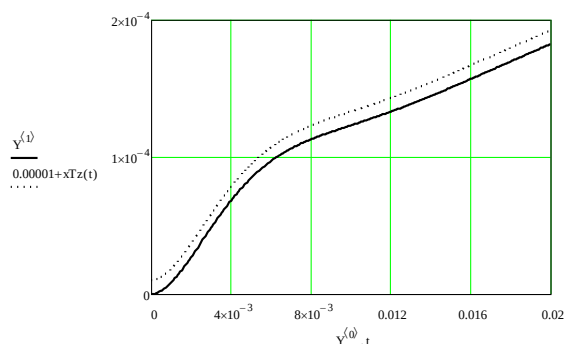


Рис. 4.25. Порівняння фактичних переміщень маніпулятора із результатом інтерполяції

Визначено відносне переміщення маніпулятора відносно шасі (рис. 4.26).

$$\delta(0.002) = 1.851 \times 10^{-6}$$

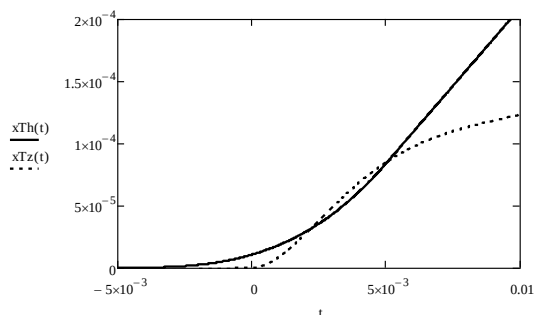


Рис. 4.26. Порівняння переміщень маніпулятора (пунктир) з переміщенням шасі

Переміщення маніпулятора відносно шасі визначено по залежностям які є результатом інтерполяції (рис. 4.27).

$$\delta(t) := xTh(t) - xTz(t)$$



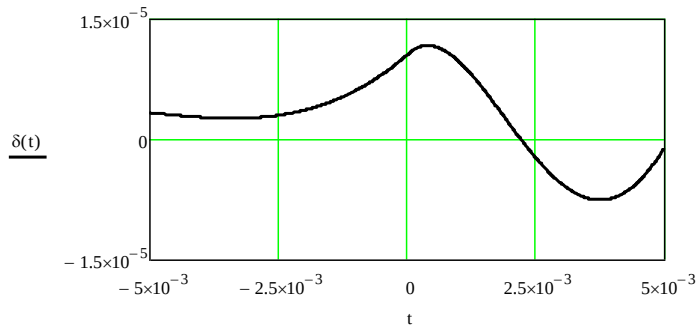


Рис. 4.27. Переміщення маніпулятора відносно шасі під дією трикутного імпульса пришвидшення на шасі

Згідно графіка має місце хвилеподібне зміщення маніпулятора відносно шасі з амплітудою близько 0,05 мм та періодом близько 5 мс, Період має порядок половини протяжності імпульса пришвидшення (10 мс).

В кінці періода дії імпульсу пришвидшення спостерігається затухання коливань.

#### 4.4. Математичне моделювання динамічних переміщень наземного роботизованого комплексу при вібраційних впливах

Вимоги до впливу зовнішніх динамічних дій формуються у технічному завданні і включають стійкість до ударних і вібраційних впливів на наземний роботизований комплекс.

Регламентуються дії факторів із середніми по зразкам техніки значеннями.

Наземний роботизований комплекс повинен залишитись працездатним при дії синусоїдальної вібрації в діапазоні частот від  $\nu_1=25$  Гц до  $\nu_2=2200$  Гц. При цьому зміни амплітуди пришвидшення регламентуються значеннями від  $a_{m1}=30$  м/с<sup>2</sup> (3g) до  $a_{m2}=150$  м/с<sup>2</sup> (15g). Час дії вібрації складає  $\Delta t=10$  год по кожній з вісей.

Згідно наведених даних вібраційний вплив оцінюється залежністю пришвидшення в часі:

$$a_0(t) = a_{mi} \sin(2\pi\nu_i t),$$

де  $a_{mi}$  – амплітуда значення пришвидшення  $a_{m1} \leq a_{mi} \leq a_{m2}$ ;  $\nu_i$  – циклічна частота пришвидшення, яка знаходиться в діапазоні  $\nu_1 \leq \nu_i \leq \nu_2$ ;  $\omega = 2\pi\nu$  – кругова частота в радіанах

Визначимо віброшвидкість в шасі наземного роботизованого комплексу:

$$v = \frac{dx}{dt} = x_a \omega \cos(\omega t),$$

та віброприскорення:

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -x_a \omega^2 \sin(\omega t),$$

модуль віброприскорення:

$$x_a \omega^2 \leq 5g \leq 50m/c^2 = a_m.$$

Відповідно амплітуда синусоїди:

$$x_a = a_m / (\omega^2) = \frac{a_m}{(2\pi)^2 \cdot \nu^2}.$$

Залежність амплітуди від частоти має круто падаючий характер (гіпербола) (рис. 4.28).

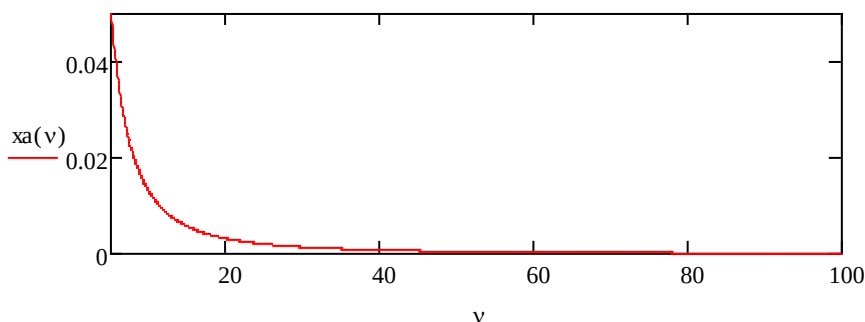


Рис. 4.28. Залежність амплітуди регламентних синусоїдальних коливань від частоти: а – високочастотна область; б – низькочастотна область

Під дією синусоїдальних переміщень шасі наземного роботизованого комплексу має місце синусоїдальне переміщення маніпулятора. Для його визначення використана розроблена раніше динамічна модель та відповідні диференціальні рівняння руху маніпулятора. Вібраційні переміщення маніпулятора визначаються частотними характеристиками динамічної системи.

Визначено частотні характеристики маніпулятора у вигляді його переміщення під дією зовнішніх інерційних збурень, що мають вигляд синусоїдального переміщення шасі. Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) знайдена по частотній передавальній функції

$$W_{Ja3}(\omega) := \frac{1 + 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot (i \cdot \omega)}{[T^2 \cdot (i \cdot \omega)^2 + 2 \cdot \zeta \cdot T \cdot (i \cdot \omega) + 1] \cdot (i \cdot \omega)^2}$$

$$\omega \zeta := \frac{0.02}{150 \cdot 14000}$$

З використанням амплітудно-фазової частотної характеристики визначені дійсна і уявна амплітудно-частотні характеристики

$$U_{a3}(\omega) := \text{Re}(W_{Ja3}(\omega))$$

$$V_{a3}(\omega) := \text{Im}(W_{Ja3}(\omega))$$

Побудовані графіки даних характеристик (рис. 4.29).

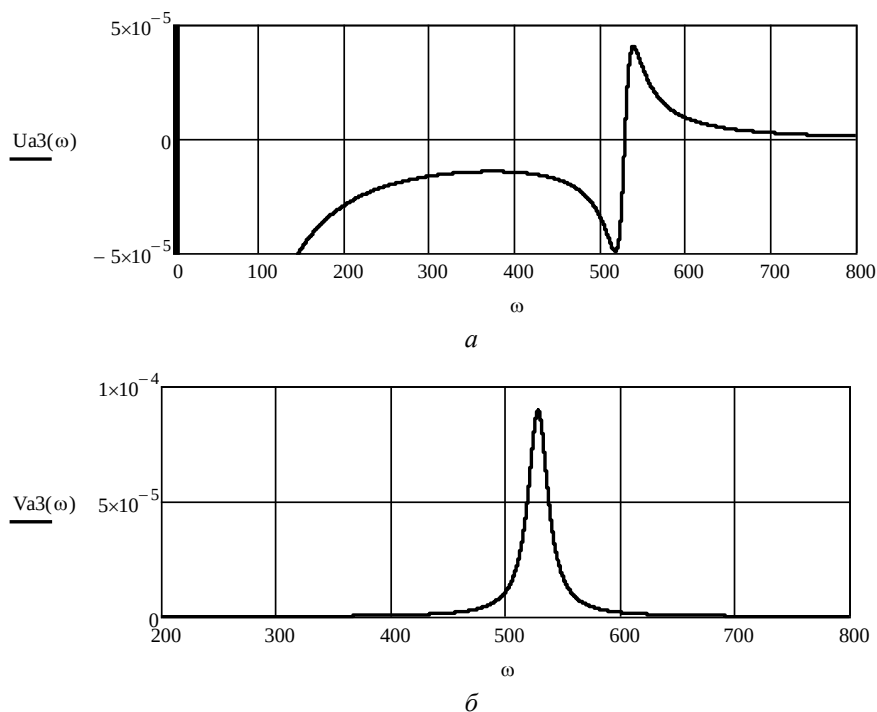


Рис. 4.29. Дійсна (а) і уявна (б) амплітудно частотні характеристики

Побудована амплітудно фазова частотна характеристика АФЧХ (рис. 4.30).  
 $\omega := 0, 0.01.. 800$

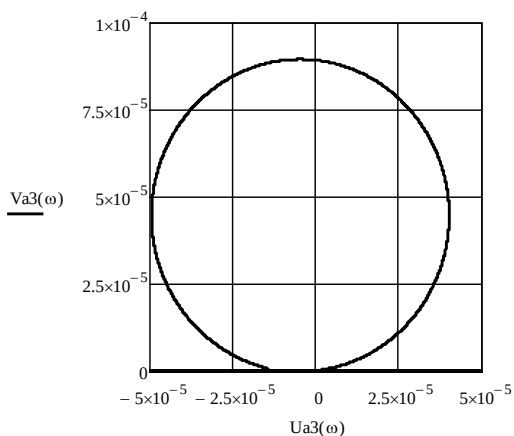


Рис. 4.30. Амплітудно-фазова частотна характеристика

Амплітудно-частотна характеристика розрахована як модуль амплітудно фазової частотної характеристики на основі залежності

$$Wa3(\omega) := \sqrt{Ua3(\omega)^2 + Va3(\omega)^2}$$

$$Wa3(0.000001) = 1 \times 10^{12}$$

Побудовано графік амплітудно-частотної характеристики (рис.4.31).

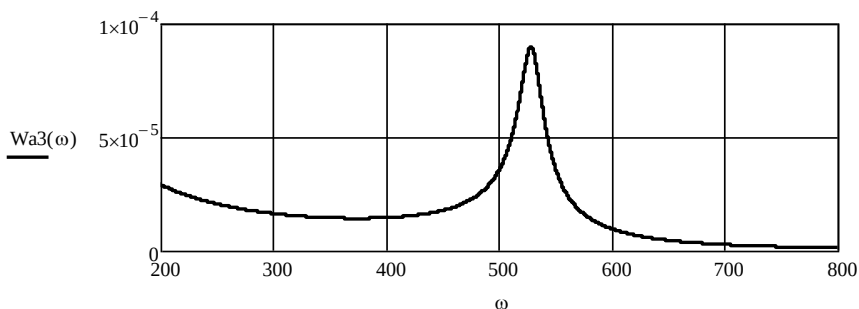


Рис. 4.31. Амплітудно- частотна характеристика

Фазо-частотна характеристика обчислена згідно залежності (рис. 4.32).

$$\psi a3(\omega) := \begin{cases} \operatorname{atan}\left[\frac{Va3(\omega)}{(0.000000001 + Ua3(\omega))}\right] & \text{if } \omega \leq \omega_3 \\ \operatorname{atan}\left[\frac{Va3(\omega)}{(0.000000001 + Ua3(\omega))}\right] - \pi & \text{if } \omega > \omega_3 \end{cases}$$

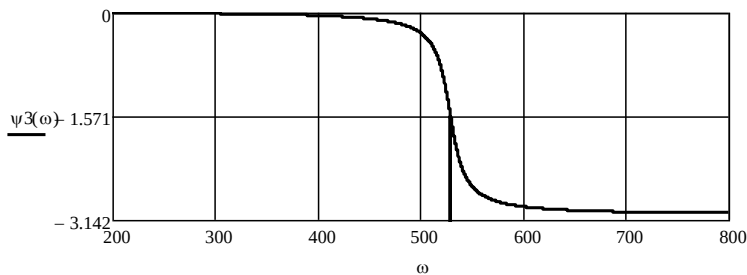


Рис. 4.32. Фазо- частотна характеристика

Частотні характеристики послужили основою для визначення переміщення маніпулятора під дією вібрації. Розрахунки проведені для типових вібраційних впливів на наземний роботизований комплекс. Результати розрахунків одержані у вигляді синусоїдальних переміщень шасі і маніпулятора при різних частотах вібрації (рис. 4.33).

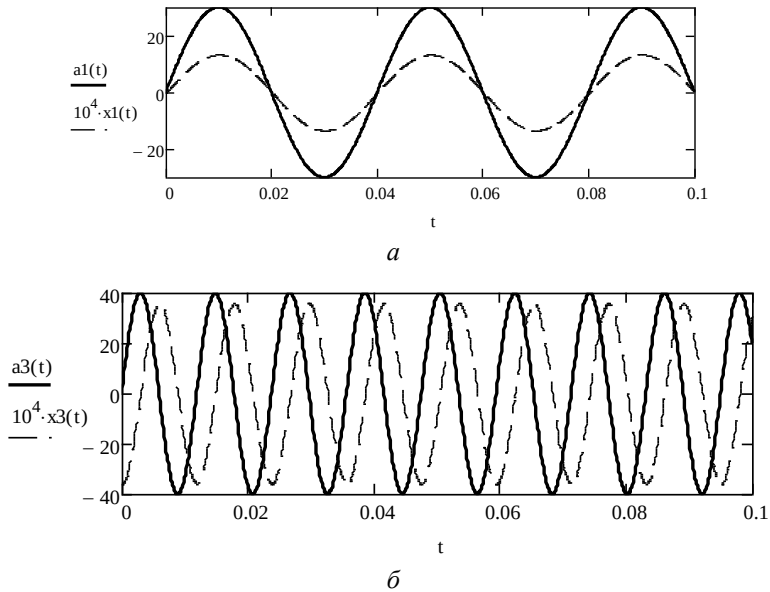


Рис. 4.33. Пришвидження шасі наземного роботизованого комплексу в функції часу та переміщення маніпулятора при частоті вібрації 25 Гц (а) та резонансній частоті маніпулятора 84 Гц (б)

Для даного вібраційного впливу переміщення маніпулятора має амплітудне значення 3,6 мм.

Наведені результати математичного моделювання підтверджують необхідність забезпечення ефективного демпфування маніпулятора встановленого на шасі наземного роботизованого комплексу.

По результатам проведених досліджень розроблені рекомендації по підвищенню надійності мобільних роботів спеціального призначення. Вони включають конструктивні заходи по підвищенню міцності окремих вузлів робота при дії динамічних навантажень. Особливу увагу приділено захисту вузлів та комунікацій, що знаходяться на ділянках найбільшого динамічного впливу, визначених у процесі досліджень.

Як напрямок подальших робіт рекомендується проведення спеціальних експериментальних досліджень впливу вібрацій на наземний роботизований комплекс.

Для генерування синусоїдальних коливань різних частот діапазонів необхідно передбачити різні за принципом роботи та функціональними можливостями вібраційні навантажувальні установки.

## РОЗДІЛ 5

### Підвищення точності позиціонування та стабільності положення шасі мобільних роботів

#### 5.1. Оптичні методи точної орієнтації шасі

Маніпулятори мобільних роботів спеціального призначення виконують різноманітні функції. Однією із важливих задач є наведення стрілецької зброї. Типовий мобільний робот повинен мати поворотну платформу оснащену кулеметом калібром 12,7 мм (7,62 мм) та автоматичним гранатометом калібром 40 мм. Приводи платформи повинні забезпечувати поворот на кут  $360^\circ$  в горизонтальній площині,  $-5^\circ \dots 75^\circ$  у радіальній вертикальній площині з кутовою швидкістю 60 град/с. Платформа призначена для встановлення на транспортному засобі і повинна забезпечувати стабілізацію свого положення під час руху.

Мобільний робот повинен мати на платформі ряд оптичних пристроїв, зокрема телевізійний і тепловізійний пристрої спостереження, лазерний далекомір, можливо інші пристрої. Тому закономірно застосовувати оптичні пристрої для забезпечення точного просторового положення платформи із встановленими на ній маніпуляторами для наведення зброї.

Проведено комплекс науково-дослідних робіт по обґрунтуванню розробки високоточних систем просторового позиціонування рухомої платформи. В результаті розроблена тріангулярна оптична система точного позиціонування наземного роботизованого комплексу та проведено теоретичне обґрунтування закономірностей її роботи [156]

Згідно запропонованих теоретичних методів просторове положення платформи описано дискретними математичними моделями на основі просторових стохастичних матриць, які реалізують методи Монте-Карло для вирішення прямої та інверсної задачі кінематики платформи. При цьому запланована точність виходу платформи в позицію може сягати  $1 \dots 5$  кутових секунд ( $2 \dots 8$  см на дальності 3000 м).

На точність пострілу впливають не лише зміни положення платформи (шасі), а і кінематичні параметри платформи такі, як зміни швидкості та пришвидшення, які мають випадковий, нестационарний і просторовий характер.

Переміщення платформи описано із врахуванням тензорного характеру зміни її інерційних властивостей. Платформа подана у вигляді динамічної системи, що має не менше шести ступенів вільності. Три ступені вільності відповідають поступальним переміщенням платформи в трьох напрямках, а три інших визначають просторове поперечно-кутове переміщення платформи у вигляді кутів Ейлера-Крилова для точного наведення зброї з кутовою похибкою порядку 10 кутових секунд (15 см на відстані 3000 м).

Для забезпечення високої точності вогню здійснюється прив'язка до місцевості із врахуванням постійних змін положення платформи. Виміри положення платформи гіроскопічними пристроями мають значні похибки внаслідок роботи гіроскопів у

суттєво нестаціонарних умовах. Тому для підвищення точності використовуються виміри положення з використанням реперних точок (маяків) на місцевості.

Наземні роботизовані комплекси, як правило, оснащуються системою оптичних пристроїв, зокрема вони мають телевізійний та тепловізійний пристрій, лазерний вимірник відстані та інші. Окремі роботизовані комплекси спеціального призначення мають спеціальний оптичний блок, встановлений на маніпуляторі спрощеної конструкції. Наземні роботизовані комплекси мають обмежену масу і габарити. Тому оптичні пристрої розміщені локально на шасі комплексу, спеціальній штанзі або маніпуляторі. Локальне розташування оптичних пристроїв утруднює їх застосування для позиціонування наземного роботизованого комплексу.

Для забезпечення необхідних параметрів точності позиціонування запропонована спеціальна триангулярна оптична система (рис. 5.1).

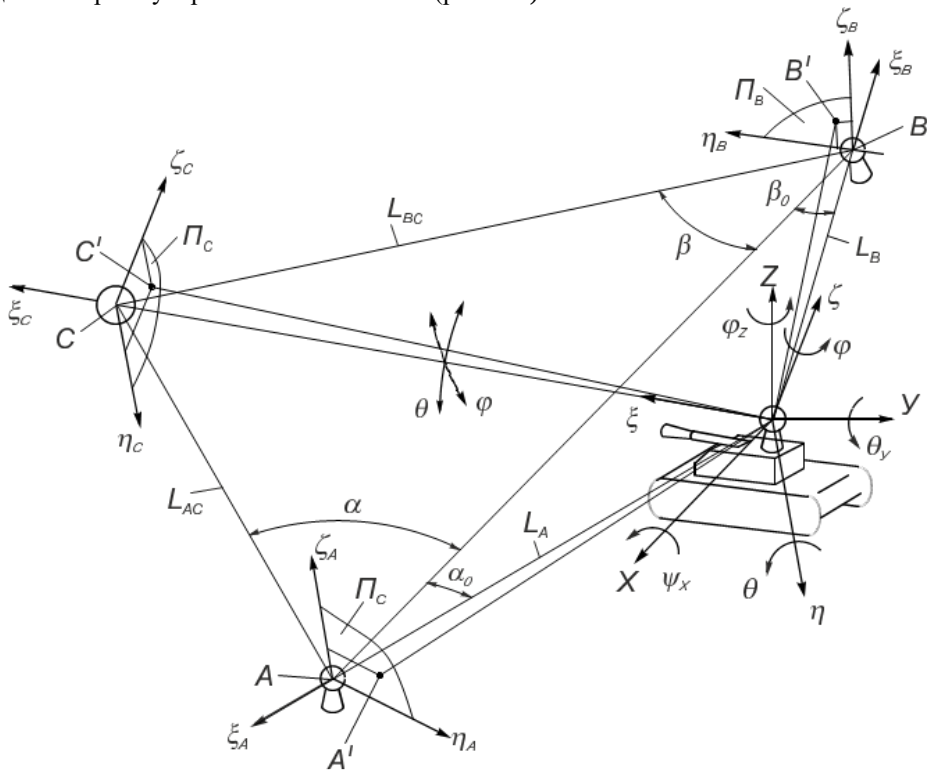


Рис.5.1. Базовий варіант триангулярної оптичної системи точного позиціонування наземного роботизованого комплексу, який включає два маяки розташовані на місцевості в точках А і В

Наземний роботизований комплекс повинен забезпечувати високоточне просторове позиціонування рухомої платформи. Згідно технічних умов [14] точність виходу платформи в позицію по двом кутовим координатам повинна складати 5...10 кутових секунд (8...12 см на дальності 3000 м).

Спеціальна триангулярна оптична система включає ряд джерел світла, дзеркальних пристроїв з приводами, реєстраторів світлових променів та інтелектуального блока обробки інформації.

Оптична система забезпечує прив'язку до місцевості із врахуванням змін положення платформи. Для цього застосовані лазерні оптичні пристрої (маяки) встановлені на місцевості в реперних точках. Базовий варіант триангуляційної системи включає два маяки встановлені в точках А і В фронтально відносно цілі, розташованої в точці С

Як маяки, так і платформа наземного роботизованого комплексу, мають спеціальні оптичні пристрої. Пристрої працюють в інфрачервоному діапазоні і служать для формування лазерних променів та для реєстрації променів відбитих дзеркальною системою платформи. Оптичні пристрої платформи служать для визначення положення променів та дзеркального їх відбиття у напрямку маяків.

Базовий варіант із застосуванням маяків на місцевості доповнено автономними системами точного позиціонування, розміщеними безпосередньо на наземному роботизованому комплексі. Як варіант, запропоновано використання телескопічних штанг, які встановлюються на платформі наземного роботизованого комплексу (рис. 5.2).

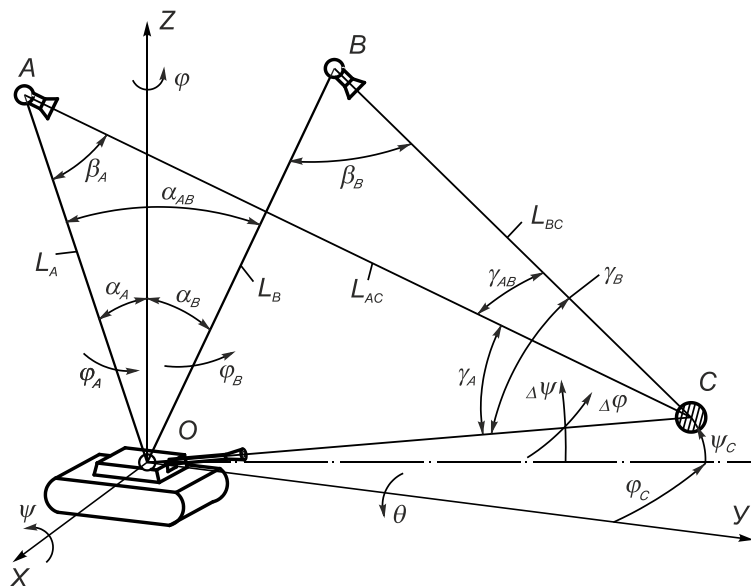


Рис. 5.2. Триангулярна оптична система позиціонування платформи наземного роботизованого комплексу, яка використовує дві телескопічні штанги встановлені на платформі

Перевагою даного варіанту є автономність комплексу. Відсутність необхідності використання складних маяків, що потребують технічного обслуговування, суттєвим чином поліпшує виконання поставлених задач.



Як варіант, запропоновано використання однієї штанги (маніпулятора) та додаткових відеокамер, встановлених на прив'язаному аеростаті та дроні (рис. 5.3).

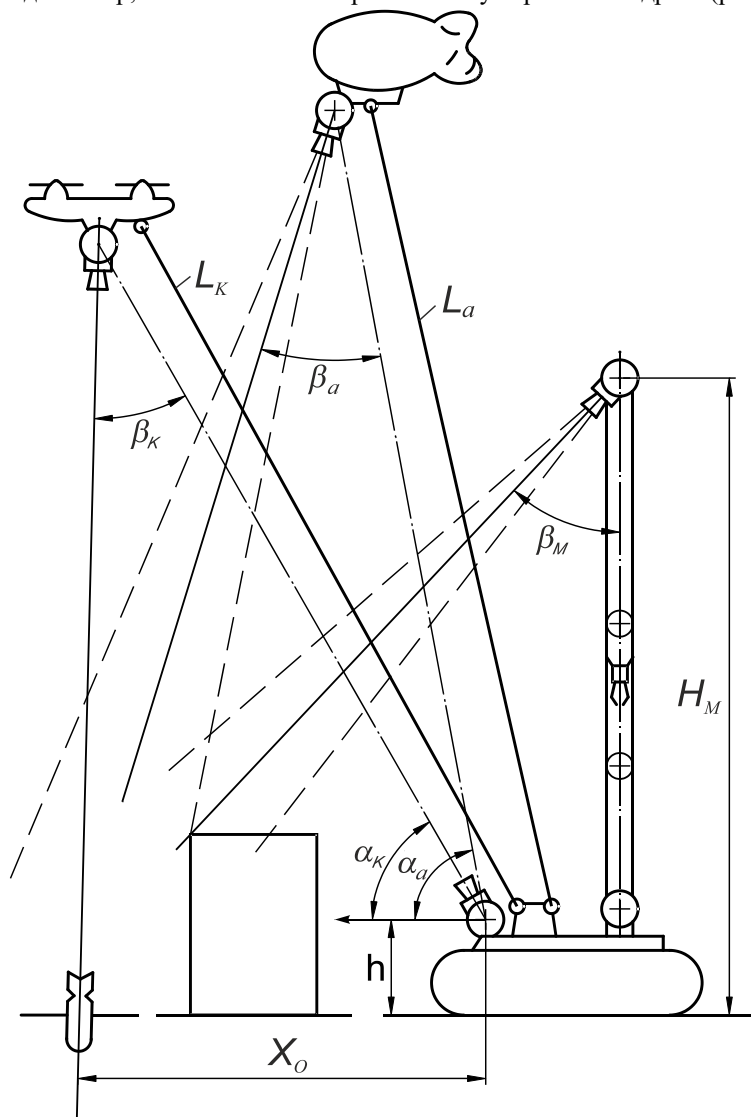
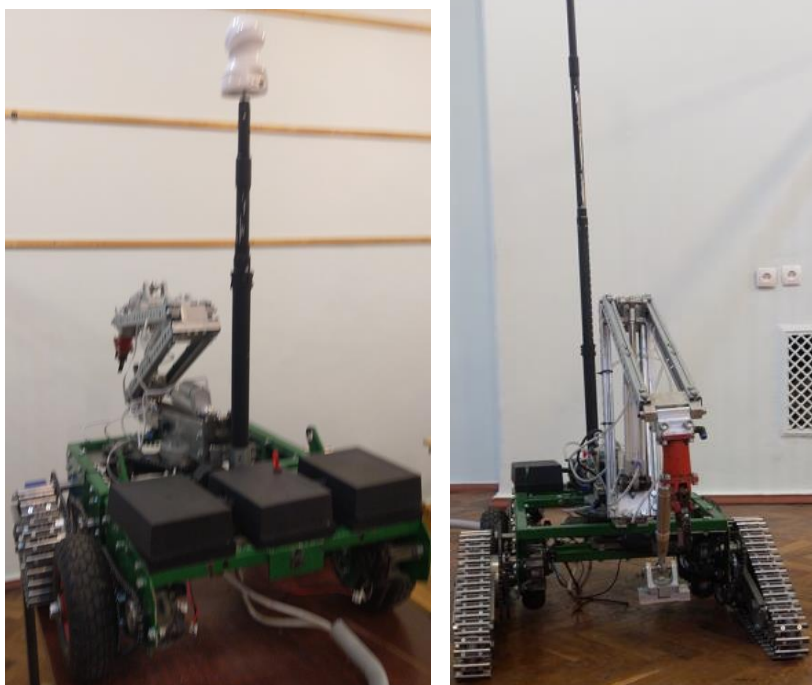


Рис.5.3. Оптична система визначення точної позиції об'єкта відносно наземного роботизованого комплексу, яка використовує прив'язаний аеростат та дрон

Перевагою даної системи є широке поле огляду для визначення наявності небезпечних об'єктів. Система дозволяє встановити положення об'єктів за перешкодами та нерівностями місцевості.

Для перевірки ефективності запропонованих методів огляду проведені спеціальні експериментальні дослідження. Для цього використано розроблений і виготовлений експериментальний зразок наземного роботизованого комплексу (рис. 5.4).



*Рис. 5.4. Експериментальний зразок мобільного робота оснащений спеціальною штангою змінної довжини для встановлення оптичних пристроїв*

Штанга має конструктивні засоби зміни її довжини, оптичну систему, телевізійну систему та комунікації.

Штанга має телескопічну конструкцію із електроприводами, які змінюють її довжину. В похідному стані довжина штанги є незначною. Це забезпечує скритність робота спеціального призначення при його переміщенні при виході в позицію.

В необхідних випадках штанга видовжується на максимальну висоту. На кінці штанги встановлена оптична система та телевізійна установка. Система має приводи, що забезпечують поворот відеокамери на  $360^\circ$  по азимуту та  $\pm 90^\circ$  положення камери відносно горизонтальної площини. Відповідно забезпечується повний огляд місцевості та дорожніх умов навколо рухомого роботизованого комплексу.

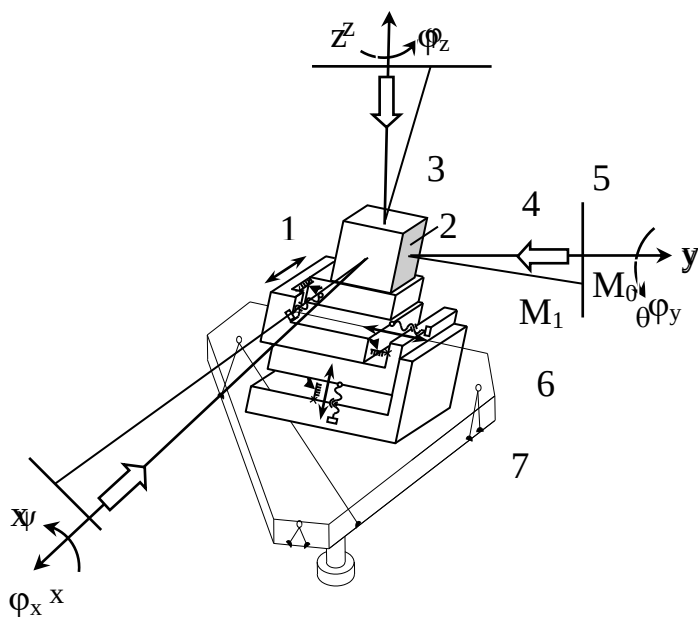
Таким чином у висунутому положенні штанги телевізійна система забезпечує поле огляду

## 5.2. Оптичні пристрої та методи точної орієнтації

Оптична система мобільного робота включає як точкові чи поверхневі джерела світла, так і дзеркальну систему для відбиття променів. Дзеркальна система у поєднанні із лазерними джерелами світла забезпечує високу точність вимірів просторового положення платформи мобільного робота. Проведено теоретичне обґрунтування розроблення оптичної системи точного позиціонування платформи мобільного робота. При цьому встановлені геометричні співвідношення для визначення точної позиції платформи. Вони базуються на припущеннях про незначні поперечно-кутові переміщення платформи мобільного робота. Для відпрацювання даних переміщень застосовані спеціальні приводи мікропереміщень платформи відносно шасі мобільного робота.

Платформа переміщується в просторі, тому необхідна система переміщення дзеркал з метою забезпечення попадання променів дзеркала.

Запропонована система приводів на платформі, де встановлені система трьох взаємно перпендикулярних дзеркал 1, 2 і 3 (рис. 5.5).



*Рис. 5.5. Оптична система вимірів поперечно-кутового положення платформи мобільного робота*

Точкові джерела світла розміщені на осях декартової прямокутної системи координат  $x, y, z$ . Віддзеркалені промені попадають на екран 5. Відхилення променя  $M_0M_1$  визначає кути повороту дзеркал, а відповідно і платформи. Для встановлення необхідного положення дзеркал служить спеціальний пристрій 6 який встановлено на виконавчому органі 7.

Пристрій дає можливість переміщувати систему дзеркал у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Для цього служать приводи точних переміщень.

Приводи, що забезпечують мікропереміщення дзеркал, керуються інтелектуальним блоком системи визначення просторового положення платформи. Встановлено зв'язок геометричного положення платформи із переміщенням світлових променів у пристроях реєстрації, встановлених на маяках. Розглянуті варіанти використання 2-х або 3-х маяків (рис. 5.6).

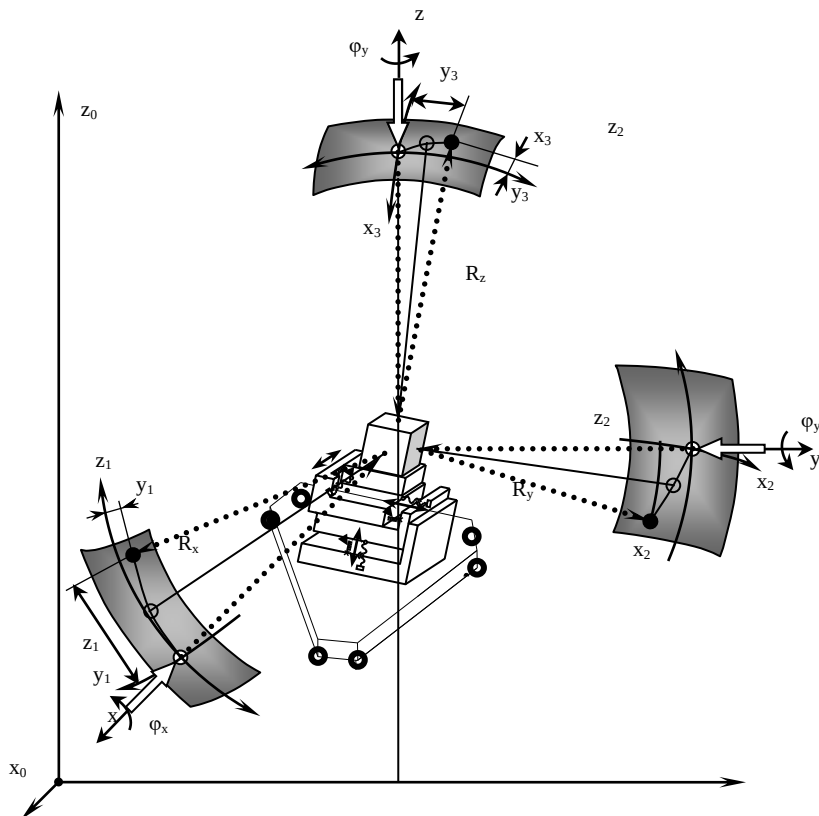


Рис. 5.6. Схема вимірів зміщення світлових променів які попадають на систему дзеркал в трьох взаємно перпендикулярних напрямках

Запропоновані пристрої мікропереміщень дзеркал дають можливість визначити точну позицію платформи по вимірам зміщення світлових променів на реєструючих пристроях маяків.

Дана система задовольняє вимогам по точності вимірів, але вона має ряд недоліків. Основним із них є вплив вібрацій на точність вимірів. Для усунення даного недоліку, система може застосовуватись для мобільного робота який знаходиться у нерухомому стані.

Для рухомого робота запропоновані менш точні, але більш надійні оптичні системи вимірів. Вони використовують поверхневі джерела світла (світлодіоди).

Поверхневі джерела світла працюють як в неперервному, так і в імпульсному режимі. Проведено теоретичне обґрунтування даних методів визначення просторового положення платформи.

Для визначення переміщень розглянемо геометричні співвідношення які мають місце при розповсюдженні променів. При повороті платформи навколо вісі z джерела світла зміщуються у площині розташування джерел (рис. 5.7).

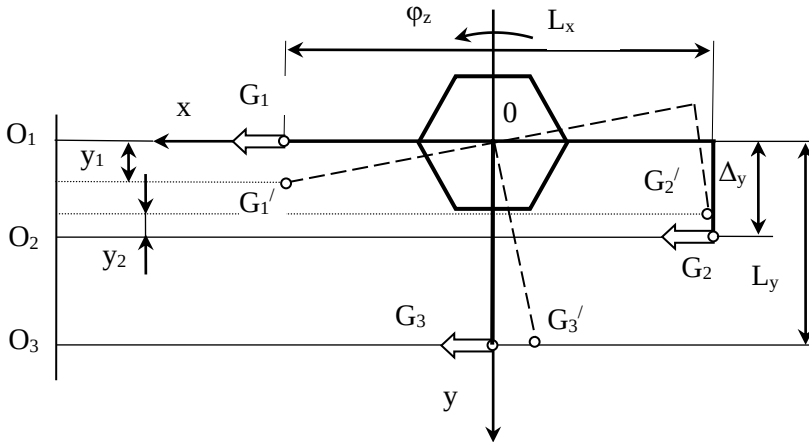


Рис. 5.7. Переміщення джерел світла при вимірах кута повороту  $\varphi_z$  та переміщення полюса у (вигляд згори по стрілці A)

При повороті платформи навколо вісі z в напрямку стрілки  $\varphi_z$  джерела світла  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  переміщуються в позиції  $G_1'$ ,  $G_2'$ ,  $G_3'$ . Для визначення кута повороту маємо співвідношення:

$$\varphi_z = \frac{y_1 - y_2}{L_x}$$

де  $y_1$ ,  $y_2$  – зміщення на фото світлових плям від джерел  $G_1$  та  $G_2$ ;  $L_x$  – відстань між джерелами  $G_1$  та  $G_2$  в напрямку вісі x.

Зміщення світлової плями від джерела  $D_3$  при повороті платформи та кут  $\varphi_z$  є незначним (практично дорівнює нулю).

При зміщенні платформи в напрямку вісі y світлової плями на фото будуть зміщуватись відносно точок  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ . Переміщення полюса платформи (точка O) в напрямку вісі y буде знайдено у вигляді

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad \text{або} \quad y = y_3$$

Розглянутий метод визначення просторового положення виконавчого органу системи приводів має невисоку точність по причині нечіткої форми і величині

світлової ями. Більш точним є визначення положення по фото з використанням спеціального механічного пристрою (колліматора). Пристрій має основу 1 яка закріплена на рухомому виконавчому органі просторової системи приводів (рис. 5.8).

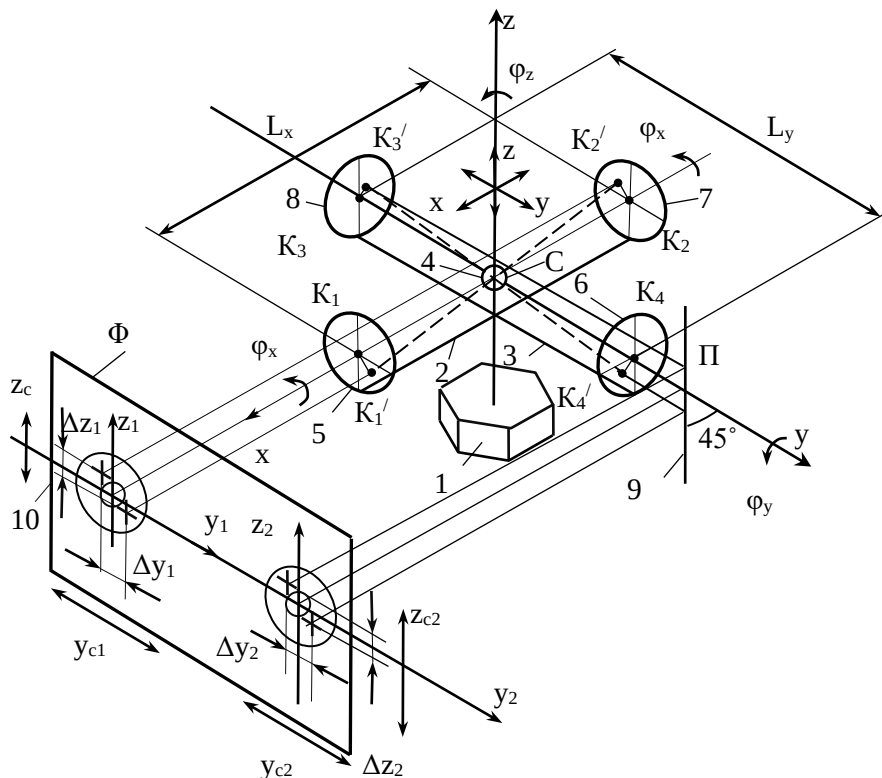


Рис. 5.8. Принципова схема пристрою для визначення точного просторового положення виконавчого органу системи приводів

На основі 1 встановлена рама у вигляді стрижнів 2 і 3 яка має в центрі сферу 4, а на кінцях стрижнів розміщені кільця 5-8. Кожне кільце має перехрестя утворене струнами які розташовані по діаметрам кілець і утворюють систему точок  $K_1$ -  $K_4$ . В центрі оптичної вісі перехрестя поміщена сфера 4. Пристрій доповнено дзеркальною системою у вигляді дзеркала 9 та пристроєм фіксації зображення (фотоапаратом) який фіксує на фото 10 зображення пристрою.

На фото фіксуються зображення кулі в двох проекціях та зміщення кожного з перехресть відносно зображення кулі.

Декартові координати переміщення полюса (точки С) визначаються по переміщенню зображення кулі на фото. При цьому:

$$x=y_{c2}, y=y_{c1}, z=z_{c1} \text{ або } z=z_{c2}.$$

Кут повороту навколо вісі  $z$  визначається за формулами :

$$\varphi_z = \frac{\Delta y_1}{L_x} \text{ або } \varphi_z = \frac{\Delta y_2}{L_y}.$$

Кути повороту навколо вісі  $x$  та навколо вісі  $y$  обчислюється згідно залежностей :

$$\varphi_x = \frac{\Delta z_2}{L_v}, \quad \varphi_y = \frac{\Delta z_1}{L_v}.$$

Пристрій може використовуватись в різних конфігураціях. Повна конфігурація показана на рисунку. Мінімальна конфігурація включає сферу 4 розташовану в точці С та лише два кільця 5 і 6. При цьому зміщення точок  $K_1K_4$  визначається відносно центра сфери. Можливі також проміжні конфігурації пристрою які включають три кільця в різних сполученнях. Наприклад використовуються три кільця 5, 6 і 7.

Можлива також неповна конфігурація пристрою без сфери 4. При цьому центр оптичної системи встановлюється на перехресті оптичних вісей утворених лініями  $K_1K_2$  та  $K_3K_4$ . Дані лінії обов'язково повинні перетинатись в точці С.

Для визначення кута повороту платформи навколо вісі  $x$  та зміщення його в напрямку вісі  $z$  розглянемо розташування джерел світла в площині фото (вид по стрілці Б) (рис. 5.9).

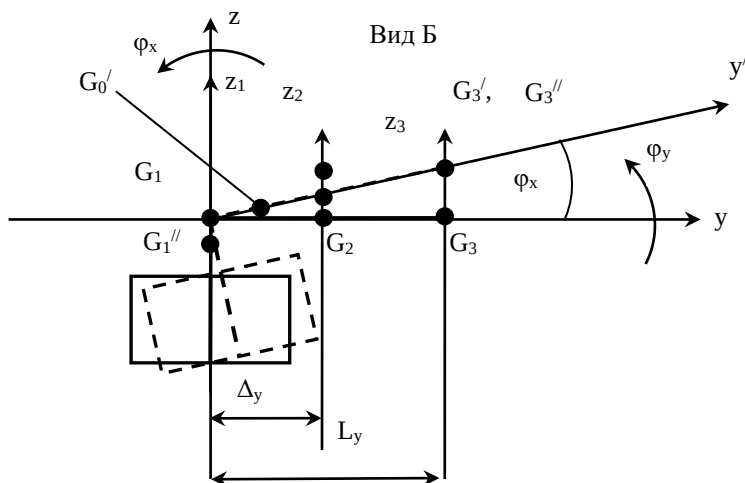


Рис. 5.9. Переміщення джерел світла при вимірах кута повороту  $\varphi_x$  та  $\varphi_y$ , горизонтального  $x$  та вертикального  $z$  переміщення платформи (вигляд збоку (вид Б) в напрямку вісі  $x$ )

При повороті платформи лише навколо вісі  $x$  кут

. При повороті навколо вісі  $y$  яка близька до  $y'$  кут повороту:

$$\varphi_x = \frac{z_3}{L_y} \quad \varphi_y = \frac{z_2 - z_1}{L_x}. \text{ Положення точки } G'_0 \text{ буде знайдено як } \varphi_D = \frac{z_2 + z_1}{2}.$$

Кут повороту навколо вісі  $x$  визначається залежністю:

$$\varphi_x = \frac{z_3 + \frac{z_2 + z_1}{2} - \frac{\Delta_y}{2} \cdot \varphi_y}{L_y} \quad \text{або} \quad \varphi_x = \frac{2z_3 + z_2 + z_1 - \Delta_y \varphi_y}{2L_y} = \frac{2z_3 + z_2 + z_1 - \frac{\Delta_y}{L_x} (z_2 - z_1)}{2L_y}$$

Якщо  $\Delta_y < L_y$  то :  $\varphi_x = \frac{2z_3 + z_2 + z_1}{2L_y}$ .

Вертикальне переміщення платформи буде визначено по формулі:

$$z = z_D - \Delta_y \varphi_y / 2 = (z_2 + z_1 - \Delta_y \varphi_y) / 2.$$

Переміщення платформи в напрямку вісі  $x$  не може бути визначено так як всі промені розповсюджуються паралельно вісі  $x$ . Для повного визначення положення платформи запропонована модифікація розглянутого вище методу (рис.5.10).

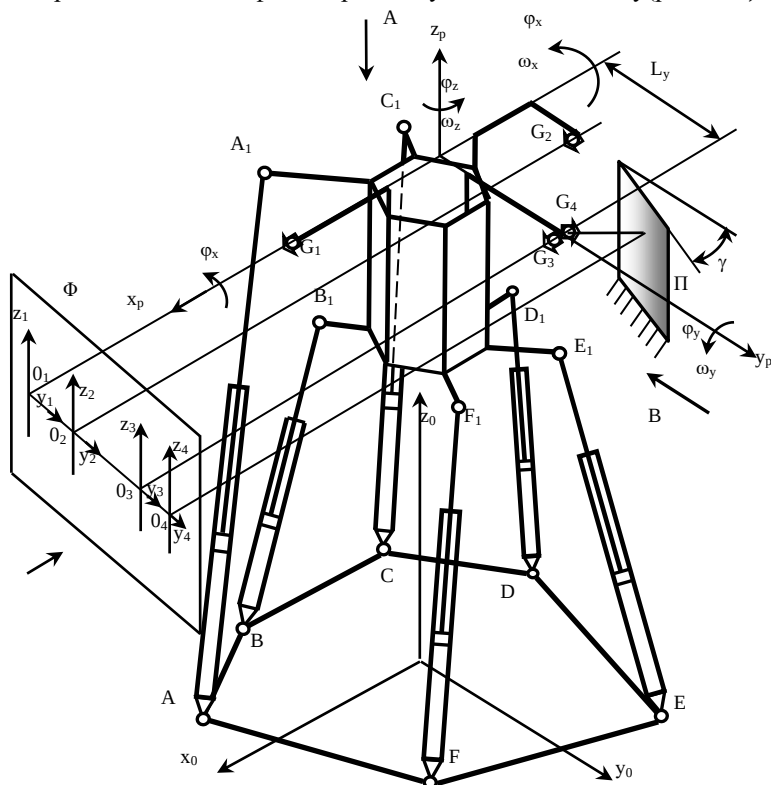


Рис. 5.10. Встановлення джерел світла на виконавчому органі та дзеркальної системи з метою вимірів повного просторового положення платформи

На виконавчому пристрої робота встановлюється додаткові поверхневі джерела світла. Зокрема встановлене додаткове джерело світла  $G_4$  орієнтоване в площині вісей  $x, y$  в напрямку близькому до напрямку вісі  $y$ . Нерухома дзеркальна система являє собою плоске дзеркало  $\Pi$  встановлене під кутом  $\gamma$  до площини  $yz$  (до площини фото). Зображення джерела світла  $G_4$  відбиваючись від дзеркала  $\Pi$  попадає на фото в



точку  $O_4$ . Дзеркало дає можливість фіксувати переміщення точки  $G_4$  в напрямку вісі  $x$ .

Розглянемо закономірності розповсюдження променів у вимірній системі. В площині  $xu$  має місце розповсюдження променя джерела  $G_4$  який відбивається від дзеркала  $\Pi$  (рис. 5.11).

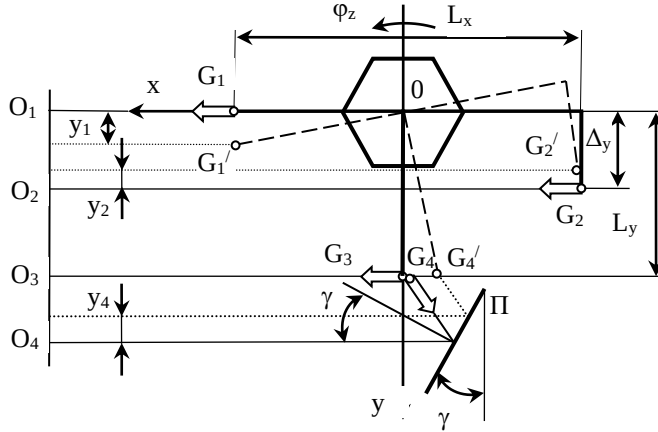


Рис. 5.11. Переміщення джерел світла та світлових плям в площині вісей  $xu$

Промінь від джерела  $G_4$  попадає на дзеркало  $\Pi$  і реєструється на фото у вигляді світлової плями  $O_4$ .

Переміщення точки  $G_4$  в напрямку вісі  $x$  призводить до зміщення світлових плям. Поворот платформи навколо вісі  $z$  на кут  $\phi_z$  також приводить до зміщення світлової плями на фото. До зміщення світлової плями також приводить і переміщення джерела  $G_4$  в напрямку вісі  $y$ . Розглянемо окремо вказані переміщення. Переміщення точки  $G_4$  в напрямку вісі  $x$  (рис. 5.12) зміщує світлову пляму в залежності від кута розташування дзеркала  $\gamma$ .

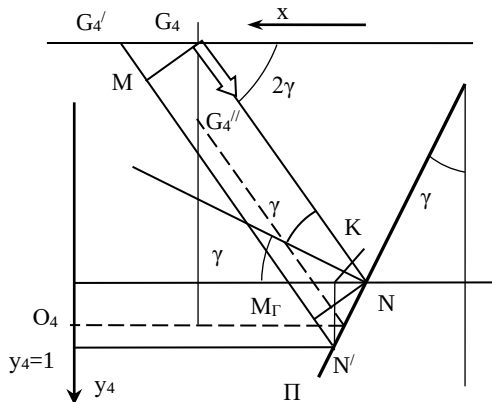


Рис. 5.12. Схема розповсюдження світлових променів у дзеркальній системі при зміщенні джерела світла  $G_4$  в напрямку вісі  $x$

Із  $\Delta G_4 M G_4'$  визначимо  $G_4 M = x \sin 2\gamma$ . Трикутники  $\Delta N M_1 N'$  і  $\Delta N' K N$  однакові тому  $N M_1 = K N' = M G_4 = y_4$ . Відповідно зміщення світлової плями:  $y_4 = x \sin 2\gamma$ .

Кут установки дзеркала  $\gamma$  може змінюватись в межах  $\gamma = 0..90^\circ$ . Тому кут  $\gamma$  здійснює масштабування зміщення світлової плями  $y_4$ . Зміни коефіцієнта масштабування:  $0 < \sin 2\gamma \leq 1$ .

Максимальне зміщення світлової плями має місце при  $2\gamma = 90^\circ$ ,  $\gamma = 45^\circ$ . При цьому джерела світла  $G_4$  орієнтуються в напрямку вісі  $y$  (рис. 5.13).

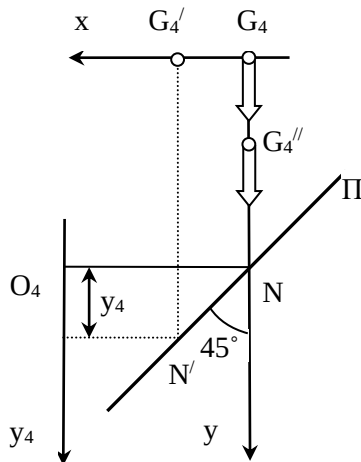


Рис. 5.13. Розповсюдження променів при установці дзеркала під кутом  $45^\circ$  до вісей  $x$  і  $y$

Тому кут установки дзеркала  $\gamma = 45^\circ$  можна вважати оптимальним з точки зору точності реєстрації на фото світлової плями.

При такому розташуванні дзеркала зміщення платформи в напрямку вісі  $y$  не змінює положення світлової плями на фото. При інших положеннях дзеркала переміщення в напрямку вісі « $y$ » будуть приводити до зміщення світлової плями.

Наявність чотирьох поверхневих джерел світла є необов'язковим. Достатньо трьох джерел  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_4$ . При цьому дзеркало повинно встановлюватись під кутом  $45^\circ$  до вісей  $x$  і  $y$ , джерела світла  $G_1$ ,  $G_2$  орієнтовані по вісі  $x$ , а джерело  $G_4$  пор вісі  $y$ . При цьому шість просторових координат платформи обчислюються за раніше виведеними співвідношеннями які мають наступний вигляд:

$$\varphi_z = \frac{y_1 - y_2}{L_x}, \quad y = \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad \varphi_y = \frac{z_2 - z_1}{L_x},$$

$$\varphi_x = \frac{2z_3 + z_2 + z_1 - \Delta_y \varphi_y}{2L_y}, \quad z = \frac{z_2 + z_1 - \Delta_y \varphi_y}{2}, \quad x = y_4.$$

Якщо джерело світла  $G_3$  не використовується то  $z_3$  треба змінити на  $z_4$ .

Наведений метод вимірів дає можливість здійснити як статичні так і динамічні виміри. При цьому є можливість визначення амплітуд (розмахів) коливань платформи. Застосування періодичного переривання світлових променів за допомогою стробоскопічних пристроїв дозволяє встановити характерні положення платформи в динаміці. В поєднанні із використанням періодичної (відео) зйомки стробоскопічна система дає можливість визначити високочастотні просторові переміщення платформи.

Розроблені методи дають можливість забезпечити параметри точності та стабільності положення маніпулятора мобільного робота по двом, трьом та шести просторовим координатам.

Проведений комплекс досліджень являє собою обґрунтування розробки високоточних систем просторового позиціонування рухомої платформи мобільного робота. Точне просторове положення платформи описано спеціально розробленими методами на основі дискретних моделей у вигляді просторових стохастичних матриць. Запропоновані моделі реалізують методи Монте-Карло для вирішення прямої та інверсної задачі кінематики платформи мобільного робота. При цьому запланована точність виходу платформи в позицію складає  $1 \dots 5$  кутових секунд ( $2 \dots 8$  см на дальності 3000 м). Запропоновані моделі забезпечують точне позиціонування платформи в статичному положенні мобільного робота. Запропоновані методи розвинені для рухомого мобільного робота та маніпулятора. Детерміновані задачі динаміки розв'язані в лінійній постановці. Для підвищення точності позиціонування маніпулятора використані прецизійні приводи мікропереміщень. Детерміновані задачі динаміки мобільного робота доповнені методами статистичної динаміки машин. При цьому враховується випадковий характер зміни позиції шасі мобільного робота та маніпулятора. В загальному випадку похибки позиціонування виконавчого органу маніпулятора визначаються в термінах теорії нечітких множин. Врахування нечіткості (розмитості, fuzzy) факторів, що визначають похибки позиціонування маніпулятора необхідно здійснити на основі аналізу реальних умов експлуатації маніпулятора. Похибки позиціонування визначаються багаточисельними факторами. При цьому встановлюються значущі фактори, що в основному визначають параметри точності та стабільності роботи маніпулятора. Необхідно розглянути показники точності і стабільності по двом, трьом, а в загальному випадку по 6-ти просторовим координатам, що визначають позиції виконавчого органу маніпулятора. Для підвищення точності позиціонування рекомендуються спеціальні алгоритми системи керування маніпулятора мобільного робота, які корегують параметри керування приводами мікропереміщень маніпулятора. Алгоритми реалізовано на основі штучних нейронних мереж.

## РОЗДІЛ 6

### Навігація та керування наземних роботизованих комплексів із застосування елементів штучного інтелекту

#### 6.1. Задачі орієнтації та навігації наземних роботизованих комплексів

В літературних та інформаційних джерелах існує обмежена інформація про конструктивні особливості наземних роботизованих комплексів, системи їх керування, орієнтацію та навігацію. Як правило, наводиться зовнішній вигляд та основні тактико-технічні характеристики окремих зразків комплексів [66].

Розглянемо типовий наземний роботизований комплекс (рис. 6.1).

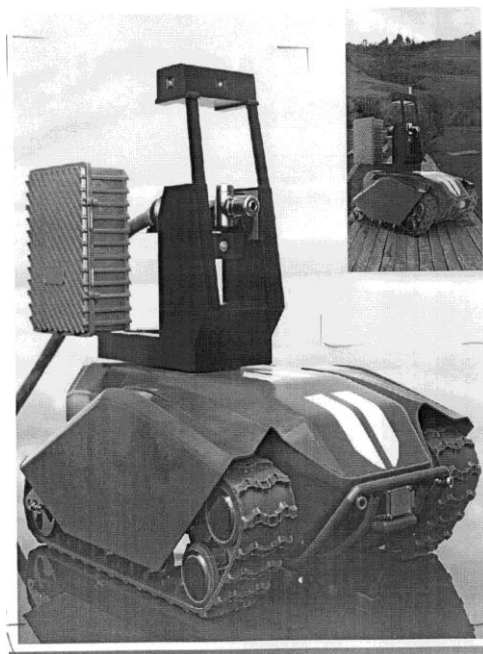


Рис. 6.1. Загальний вигляд типового наземного роботизованого комплексу

Наземний роботизований комплекс, який виконує свої функції без участі людини, потребує точної орієнтації в просторі на точно визначеній точці земної поверхні. Для цього вводиться абсолютна система координат, яка визначає положення характерної точки наземного робоизованого комплексу. Дана точка (полюс), як правило, вибирається в околиці центра мас комплексу. При цьому абсолютна система координат раціональним чином описує як статичні, так і динамічні параметри комплексу. Характерна точка узгоджується із розташуванням оптичних пристроїв, пристроїв інерційної орієнтації (гіроскопів) та інерційної навігації. Характерна точка (полюс), як правило, ідентифікується на шасі наземного роботизованого комплексу спеціальними пристроями. Ефективним рішенням є використання сферичного маркера (або сукупності трьох симетричних маркерів). Інноваційним конструктивним рішенням є використання в якості репера точної піраміди, вершина якої є характерною точкою (полюсом).

Відносно полюса визначається локальна система координат, яка має своїм центром полюс, а вісі координат паралельні відповідним вісям абсолютної системи координат. Орієнтація в просторі шасі наземного роботизованого комплексу

визначається кутовим положенням головних вісей шасі відносно вісей локальної системи координат. При обмежених поперечно-кутових переміщеннях шасі, положення шасі визначається кутами Ейлера-Крилова. При цьому мають місце лінійні залежності, що описують просторове положення шасі. Наявність значних поперечно-кутових відхилень головних вісей шасі відносно локальної системи координат потребує опису просторового положення шасі, наприклад, з допомогою певної системи кутів Ейлера. Для алгоритмічного забезпечення процесу орієнтації шасі наземного роботизованого комплексу в просторі рекомендується використати розглянуті раніше методи, основані на застосуванні гвинтового числення за допомогою визначеного набору геометричних, кінематичних та динамічних гвинтів, є можливість точного опису положення наземного роботизованого комплексу в просторі, а відповідно і забезпечення його орієнтації. В окремих випадках наземний роботизований комплекс потребує достатньо грубої орієнтації, наприклад в наземному роботизованому комплексі, що застосовуються для пожежогасіння (рис. 6.2).



*Рис. 6.2. Обладнання наземного роботизованого комплексу засобами пожежогасіння*

Для орієнтації наземного роботизованого комплексу такого типу застосовується азимутальний кут, тангенціальний кут нахилу шасі та поперечно-кутове відхилення шасі від поздовжньої вісі. Дані координати визначаються відносно геодезичних напрямків на місцевості та напрямку дії гравітаційної сили.

При вирішенні задач орієнтації та навігації важливе значення мають окремі технічні характеристики наземного роботизованого комплексу. В якості прикладу наведені дані характеристики для типового наземного роботизованого комплексу (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1

Технічні характеристики наземного роботизованого комплексу, які є суттєвими для вирішення задач його орієнтації та навігації

| №  | Назва параметра                                                                                                 | Значення параметра                 |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1  | Габаритні розміри платформи (ШхВхД), мм                                                                         | 860х500х105                        |
| 2  | Габаритні розміри загальні (ШхВхД), мм                                                                          | 860х1900х1320                      |
| 3  | Клиренс, мм                                                                                                     | 140                                |
| 4  | Маса платформи, кг                                                                                              | 200                                |
| 5  | Маса додаткового вантажу, що перевозиться (за допомогою причепа), кг                                            | 200                                |
| 6  | Матеріал корпусу платформи                                                                                      | 2 мм сталь                         |
| 7  | Колір платформи                                                                                                 | зелений (за запитом)               |
| 8  | Ступінь захисту                                                                                                 | > IP65                             |
| 9  | Робоча температура, °C                                                                                          | від -25° до +60°                   |
| 10 | Швидкість руху:<br>тільки з комплексом озброєння, км/год<br>при максимальному навантаженні, км/год              | 5-10 рекомендована (макс. 40)<br>5 |
| 11 | Запас ходу на одній заправці<br>тільки з комплексом озброєння, км/год<br>при максимальному навантаженні, км/год | 40<br>30                           |
| 12 | Силовий агрегат                                                                                                 | 2*5 кВт                            |
| 13 | Потужність агрегата, к.с.                                                                                       | 20                                 |
| 14 | Рушій                                                                                                           | гусеничний                         |
| 15 | Гучність роботи двигуна, Дб                                                                                     | 70                                 |
| 16 | Звук працюючого двигуна чути на відстані, м                                                                     | 100                                |
| 17 | Напруга електроживлення, В                                                                                      | 48                                 |
| 18 | Ємність батареї для забезпечення живлення, Ач                                                                   | 2*60                               |

Для вирішення задач орієнтації та навігації наземний роботизований комплекс має відповідне обладнання та оснащення. Зокрема наявна система відеокамер короткого та дальнього огляду та система відеокамер, що працює в інфрачервоному діапазоні. Застосовуються відеокамери встановлені на шасі роботизованого комплексу або на спеціальних штангах та відеокамери встановлені на маніпуляторі. Окремі відеокамери виконані рухомими і переміщуються спеціальними сервоприводами.

Геометричні характеристики системи спостереження охоплюють весь навколишній простір (рис. 6.3).

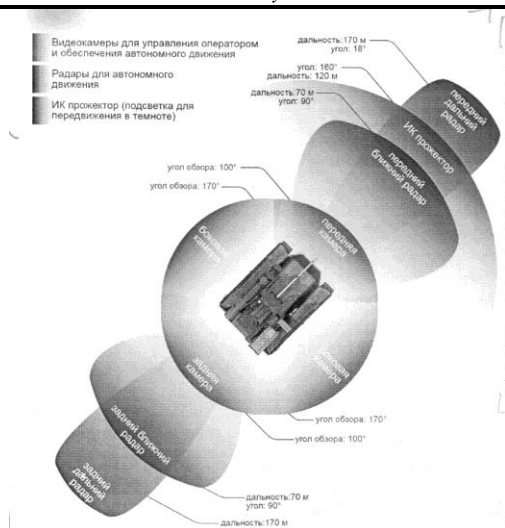


Рис. 6.3. Области огляду наземного роботизованого комплексу для різних засобів спостереження, огляду та ідентифікації об'єктів навколишнього середовища

В наземних роботизованих комплексах застосовують радары різної дальності. Використання радарів дальньої дії забезпечує огляд в радіусі близько 200 м. Радари ближньої дії забезпечують більш широкий огляд на відстані до 70 м.

Оптична система огляду і наведення ефективна на значних відстанях і охоплює необхідні кутові діапазони (рис. 6.4).

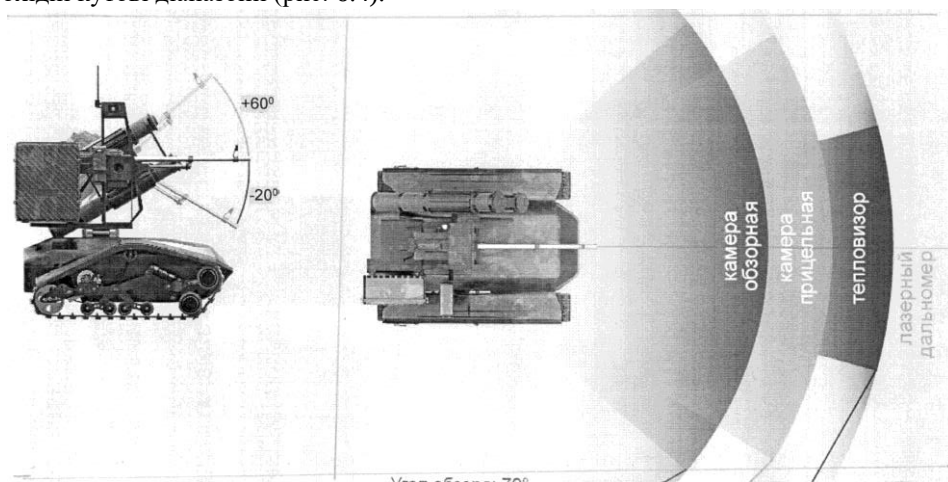


Рис. 6.4. Поле огляду типового наземного роботизованого комплексу по горизонталі (а) та діапазони спостереження по вертикалі (б)

Камери огляду мають кути огляду порядку 80° при дальності до 500 м. Системи огляду зброї по горизонталі мають кут зору близько 70° при дальності до 2000 м.

Тепловізор і лазерний далекомір мають кут зору близько 30°. Орієнтація по вертикалі здійснюється в діапазоні -20°...+60°.

Окремі характеристики системи огляду регламентуються технічними умовами (табл. 6.2).

Таблиця 6.2.

Характерні параметри системи огляду наземного роботизованого комплексу, що регламентуються технічними умовами

| № | Параметр                                                                                            | Значення параметра                                                                                                                      |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Оптичне оснащення                                                                                   | Відеокамери (оглядова та прицільна)<br>Тепловізор (опціонально)<br>Лазерний дальномір                                                   |
| 2 | Втримання та автоматичне супроводження                                                              | Забезпечується                                                                                                                          |
| 3 | Система стабілізації маніпулятора в процесі переміщення мобільного робота по пересіченій місцевості | Забезпечується                                                                                                                          |
| 4 | Додаткові опції                                                                                     | Система покращення видимості телевізійних та тепловізорних зображень в складних та невизначених умовах спостереження (дощ, сніг, туман) |
| 5 | Наявність засобів доповненої реальності при розпізнаванні та ідентифікації об'єктів                 | Забезпечується                                                                                                                          |
| 6 | Дальність виявлення об'єкту, м                                                                      | Відеокамера 1000<br>Тепловізор 1000<br>Дальномір 1100                                                                                   |
| 7 | Кількість режимів, що запам'ятовують об'єкти в автоматизованому режимі                              | 10                                                                                                                                      |
| 8 | Швидкість переміщення поворотної платформи, град/с                                                  | 60                                                                                                                                      |

Для забезпечення функціонування всіх систем наземного роботизованого комплексу служить спеціальна система керування (рис. 6.5).

Блок схема відображає складність взаємодії окремих підсистем. Для їх функціонування в реальному часі необхідні спеціальні алгоритми і оптимізовані числові методи керування. Загальна ідеологія розроблення систем керування складних мехатронних систем базується на застосуванні елементів штучного інтелекту. В даний час системи штучного інтелекту вважаються безальтернативним напрямком реалізації методів керування наземними роботизованими комплексами.



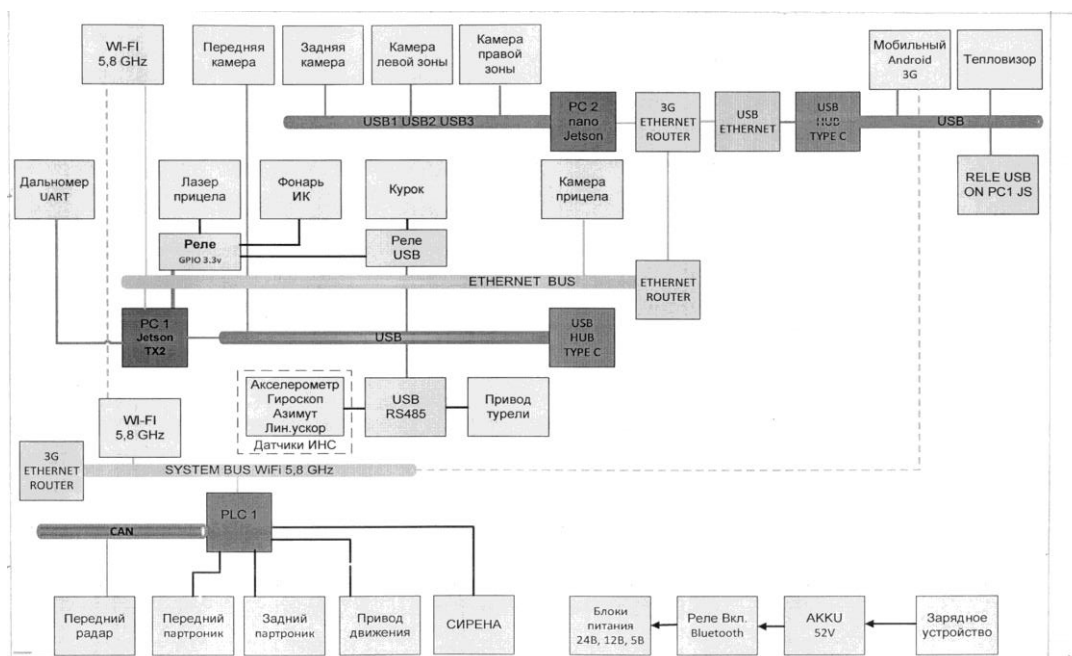


Рис. 6.5. Функціональна схема системи керування наземного роботизованого комплексу

В наземних роботизованих комплексах застосовуються системи керування із використанням елементів штучного інтелекту. Основними напрямками роботи системи із використанням елементів штучного інтелекту є :

- вирішення задач навігації наземних роботизованих комплексів;
- оброблення даних оптичних сенсорів (машинний зір) наземних роботизованих комплексів;
- додана (доповнена) реальність в окремих модулях систем керування;
- включення елементів віртуальної та доповненої реальності в процедури оброблення даних оптичних сенсорів;
- тощо).

Штучний інтелект застосовується для задач навчання (аналіз і обробка даних, абстрагування, розподіл даних формування образів тощо).

Для реалізації алгоритмів керування, що включають планування роботи, оптимізація алгоритмів та законів керування також застосовуються спеціальні машинні засоби і процедури. Важливими напрямками є: формування баз знань; процедур машинної логіки; -вибір шляхів і методів досягнення поставленої мети.

Для розв'язання вказаних задач в даний час використовуються алгоритми на основі штучних нейронних мереж.

## 6.2. Елементи штучного інтелекту реалізовані в системах керування наземних роботизованих комплексів, штучні нейронні мережі

Штучні нейронні мережі являють собою обчислювальні процедури, що мають здатність накопичувати інформацію [99].

Штучний нейрон є основним елементом нейронної мережі. Він являє собою засіб перетворення інформації по певному закону. Штучний нейрон реалізує адаптивну схему перетворення векторного інформаційного об'єкта. Типова структура штучного нейрона має своїм входом вектор вхідних параметрів  $x$ , а виходом скалярну функцію  $y$  (рис. 6.6).

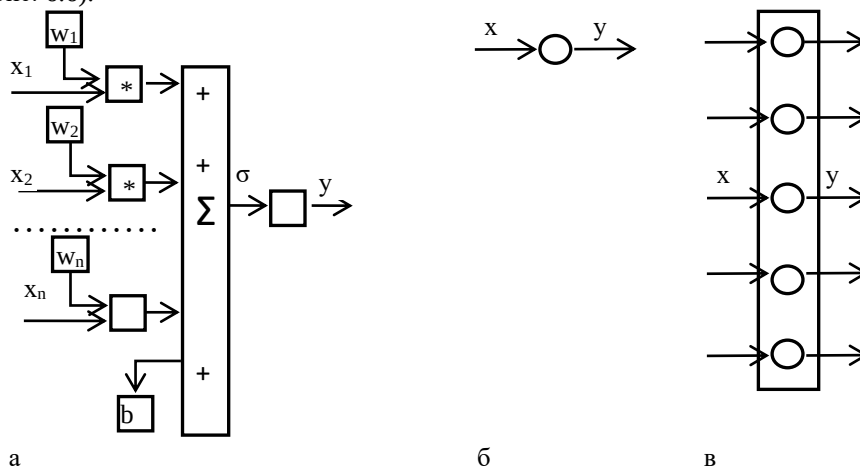


Рис. 6.6. Структура штучного нейрона (а), його умовне зображення (б) та шар нейронів (в)

Вектор вхідних параметрів  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$  подається на суматор по вхідним (синаптичним) зв'язкам. Кожний зв'язок відповідає компоненті вектора. Зв'язок має засіб регулювання інтенсивності у вигляді множення на коефіцієнт  $w_1, w_2, \dots, w_n$  (вагу синапса). Якщо коефіцієнт (вага синапса) додатний то маємо збуджуючий синаптичний зв'язок, а коли коефіцієнт від'ємний то зв'язок гальмуючий.

Штучний нейрон має додатковий вхід (зміщення) на який подається параметр  $b$ . Інформація, яку несуть в собі кожна окрема компонента вектора вхідних параметрів підсилюється або послаблюється в синапсах. Коли синаптичні зв'язки є гальмуючими, то інформація відповідної компоненти вектора змінює (компенсує) інформацію останніх компонент. Для порівняння інформативності окремих компонент служить додатковий вхід і величина зміщення  $b$  яка виступає мірою порівняння інформаційного вкладу окремих компонент вектора в загальний вихід.

Адаптивна математична модель, реалізована в штучному нейроні, має вигляд лінійної комбінації компонент вектора входу

$$\sigma = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b,$$

де  $w_i$  – вага синапса.

Вихід штучного нейрона є результатом деякого функціонального перетворення адаптивної моделі. Функціональне перетворення задається у вигляді функції активації  $f$ , яка може мати різний вигляд. Найбільш поширені лінійні та нелінійні порівняно прості функції активації (табл.5.1).

Однією з найбільш поширених є нелінійна функція з насиченням (логістична, сигмоїд) визначена формулою:

$$f(\sigma) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha\sigma}}.$$

При зменшенні коефіцієнта  $\alpha$  логістична функція стає більш пологою, а при збільшенні коефіцієнта  $\alpha$  наближається до ступінчастої функції  $1(\sigma)$ . Однією із позитивних властивостей сигмоїди є простий вигляд похідної

$$\frac{df(\sigma)}{d\sigma} = \alpha f(\sigma)(1 - f(\sigma)).$$

Логістична функція активації має властивість підсилювати слабкі сигнали краще, ніж великі, та знижує дію сигналів високого рівня.

Вважається, що практично кожен обчислювальну задачу можна звести до задачі, вирішуваної за допомогою нейронних мереж [76]. Але із досвіду практичного застосування нейронні мережі ефективно застосовуються в наступних областях:

- класифікація образів таких як символи, області, сигнали і т.п.;
- кластеризація (категоризація) яка полягає в групуванні подібних образів з встановленням центрів окремих груп;
- апроксимація функцій яка здійснюється по деякій (навчальній) виборці пар вхідних і вихідних даних з одержанням оцінки невідомої функції, що апроксимує дані;
- прогноз значень деякої залежності по набору (виборці) відомих значень даної залежності;
- вирішення задачі оптимізації яка полягає у знаходженні розв'язку, що задовольняє системі обмежень і максимізує чи мінімізує цільову функцію;
- розв'язок задач розробки оптимальних законів керування динамічних систем.

В системах керування наземних роботизованих комплексів штучні нейронні мережі використовуються при сенсорній обробці даних, що включає аналіз даних шляхом навчання мережі, використовуються в задачах керування, які включають планування, оптимізацію, поліваріантність вирішення задач. Ефективним є застосування штучних нейронних мереж в питаннях орієнтації та навігації наземних роботизованих комплексів.

Елементи штучного інтелекту включають бази знань, логіку, огляди та аналіз, що виконуються за допомогою штучних нейронних мереж.

При побудові нейронної мережі розв'язується ряд задач. Основні з них це вибір типу (архітектури) мережі та вибір вагових коефіцієнтів (навчання) мережі.

При побудові архітектури визначаються із видом нейронів кількістю їх входів та видом функцій активації, а також яким чином вибрані нейрони з'єднуються між собою та які зв'язки (порти) прийняті в якості входів і виходів.

Застосовуються різні види нейронних мереж. Ефективність деяких з них доведена математично. В залежності від функцій які виконуються нейронами мережі виділяють три типи нейронів. До першого типу відносять вхідні нейрони. В них звичайно не здійснюються обчислювальні процедури. Інформація подається із входу на вихід нейрона шляхом зміни його активації. Вихідні нейрони – це нейрони виходи яких є виходами нейронної мережі. Проміжні нейрони це нейрони які складають основу нейронної мережі.

Застосовуються нейронні мережі з різною топологією. Повнозв'язні мережі мають нейрони кожний із яких передає свій вихідний сигнал всім останнім нейронам, в тому числі самому собі (рис. 6.7 а).

Слабозв'язні мережі мають лише окремі локальні зв'язки між нейронами. Поширеними є багат шарові або шарові нейронні мережі (рис. 6.7 б).

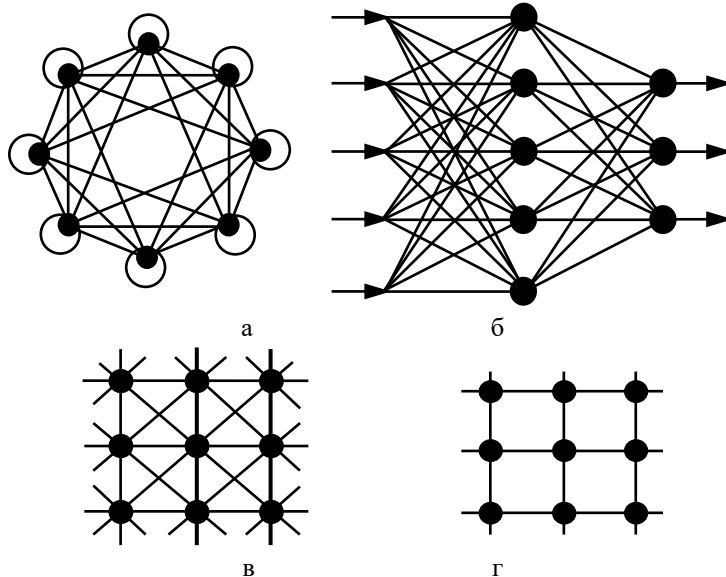


Рис. 6.7. Варіанти архітектури нейронних мереж: а – повнозв'язна мережа; б – багатшарова мережа із послідовними зв'язками; в - слабозв'язна мережа кожен нейрон якої зв'язаний із сусідніми (в кількості 8) нейронами; г - слабозв'язна мережа в якій кожен нейрон зв'язаний із 4-ма сусідніми нейронами

В багатшарових мережах нейрони об'єднуються по шарам. Шар включає нейрони з однаковими вхідними сигналами. Число нейронів у шарі може бути

довільним. Мережа включає ряд шарів, які розташовані послідовно від входу до виходу мережі. Вихід кожного нейрона попереднього шару з'єднано із входами нейронів наступного шару (рис. 6.8).

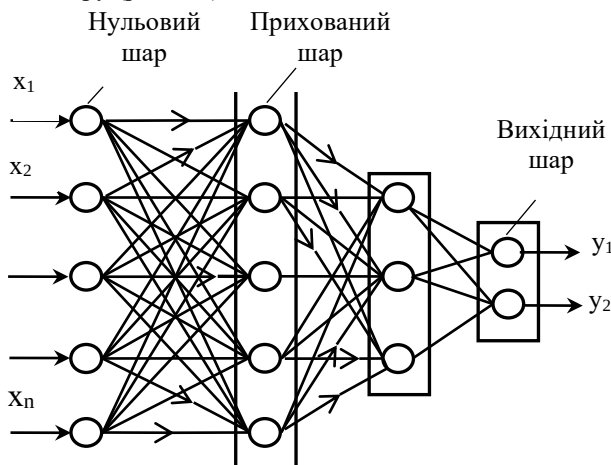


Рис. 6.8. Схема зв'язку нейронів у шарах мережі

Вхідні сигнали подаються на нейрони першого (нульового) шару. Виходами мережі служать виходи нейронів останнього шару. В мережі наявний хоч б один проміжний (прихований) шар. Наведена схема мережі відповідає мережі прямого розповсюдження сигналу.

Застосовуються також нейронні мережі із зворотніми зв'язками. До таких мереж відносяться частково рекурентні мережі Елмана і Жордана [76]. В мережах Елмана реалізують місцеві зворотні зв'язки на прихований шар повністю або частково. Мережі Елмана реалізуються для прихованого шару або для його частини. Введені контекстні нейрони забезпечують формування законів зворотного зв'язку. В мережах Жордана реалізують головні зворотні зв'язки нейронної мережі.

Використовуються синхронні та асинхронні мережі. В асинхронних мережах в певний момент часу змінює свій стан лише один нейрон. В синхронних мережах одночасно змінює свій стан ціла група нейронів (як правило шар нейронів).

Прийнято, що для довільної множини пар вхідних-вихідних векторів  $X$  та  $Y$  існує двошарова нейронна мережа з послідовними зв'язками, сигмоїдальними функціями активації при кінцевому числі нейронів, яка для кожного вхідного вектора  $X_k$  формує відповідний йому  $Y_k$ . Таким чином, для подання багатовимірних функцій багатьох змінних може бути застосована нейронна мережа, яка має лише один прихований шар із сигмоїдальними функціями активації нейронів.

Доведено, що довільна неперервна функція на замкнутому інтервалі може бути рівномірно наближена функціями обчислюваними нейронними мережами.

### 6.3. Окремі штучні нейронні мережі, які застосовуються в системах керування наземними роботизованими комплексами та їх функції

Задачі, які виконуються наземних роботизованих комплексів застосовуються значною складністю. Тому для їх виконання використовуються спеціальні штучні нейронні мережі, розроблені і апробовані на професійному рівні. Їх надійність підтверджена багаторічним досвідом їх застосування.

В системах керування наземним роботизованим комплексом реалізовані наступні штучні нейронні мережі:

- ENETN – для сегментації дорожніх умов;
- JOLOV3- для знаходження і класифікації об'єктів;
- POSE ESTIMATOR- для розрізнення жестів людини;
- GOOGLE SPECH – TO TEXT для розпізнавання мови;

Штучна нейронна мережа ENETN застосовується для сегментації дорожніх умов. Вони служать для сегментації сцени та розуміння відеосюжету. Здійснюється прив'язка до місцевості (точки верифікації) та навігація комплексу.

Штучна нейронна мережа ENETN має пошарову структуру і відноситься до мереж послідовного розповсюдження із зворотніми зв'язками. Входом мережі є спеціальне відеозображення дороги, виходом оброблене зображення дороги (рис. 6.9).

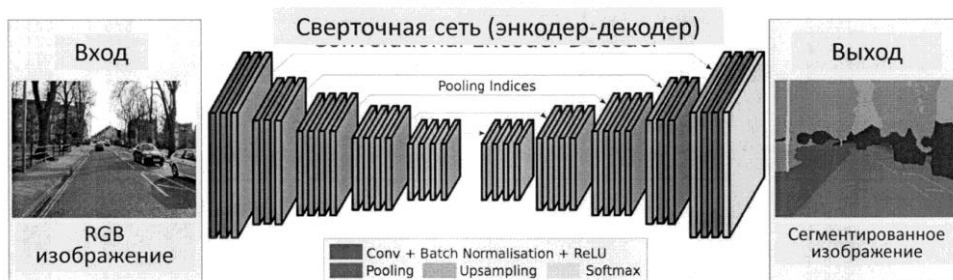


Рис. 6.9. Структура повнозв'язної згорткової мережі ENETN, призначеної для сегментації зображень.

В результаті застосування нейромережі ENETN система керування наземним роботизованим комплексом одержує цифрову інформацію відповідну відеосюжету, який одержано оптичною системою.

Основні задачі, які вирішуються в результаті застосування мережі включають: визначення точних меж дороги; пошук і класифікація позначень на дорозі та введених спеціальних знаків; позиціонування на місцевості відносно одержаного сегментованого відео.

Відповідно має місце сегментація та розуміння відеосюжету (рис. 6.10).



Важливими задачами системи керування наземним роботизованим комплексом в області навігації та машинного зору є розпізнання зображень, виявлення та ідентифікація характерних об'єктів.

Для знаходження і класифікації об'єктів застосовується штучна нейронна мережа JOLOV3 (рис. 6.12)

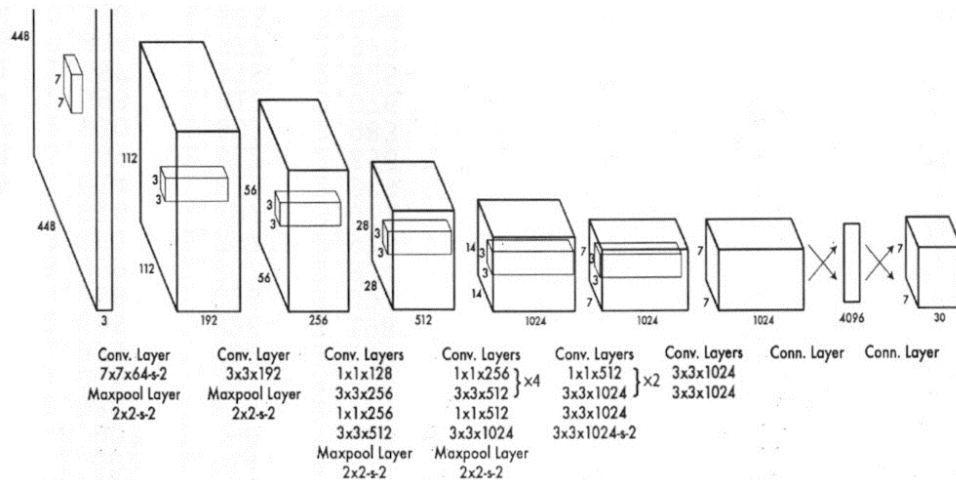


Рис. 6.12. Структура штучної нейронної мережі JOLOV3

Мережа служить для розпізнавання типових об'єктів таких як люди, автомобілі, поїзди, літаки, кораблі, дорожні знаки, тощо (рис. 6.13).



Рис. 6.13. Типові об'єкти, які ідентифікуються штучною нейронною мережею JOLOV3

Мережа має можливості навчання для ідентифікації спеціальних об'єктів (бронетехніка та ін) (рис. 6.14).



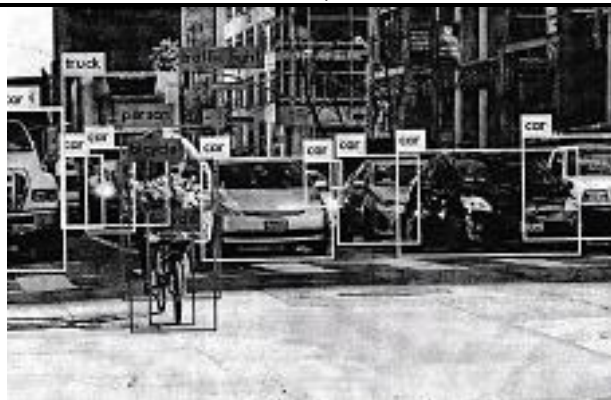


Рис. 6.14. Розпізнавання зображень, знаходження та локалізація спеціальних об'єктів

Мережа служить для знаходження і класифікації об'єктів. Частина з них є стандартною. До них відносяться люди, автомобілі різних типів, автобуси, поїзди, літаки, гелікоптери, кораблі. В перелік стандартних об'єктів входять дорожні знаки, дороговкази, світлофори та ін. Мережа шляхом відповідного навчання придатна для ідентифікації спеціальних об'єктів, зокрема споруд різного виду, інфраструктурних об'єктів, особливостей дороги та рельєфу місцевості.

Для розрізнення жестів людини застосовується штучна нейронна мережа POSE ESTIMATOR (рис. 6.15).

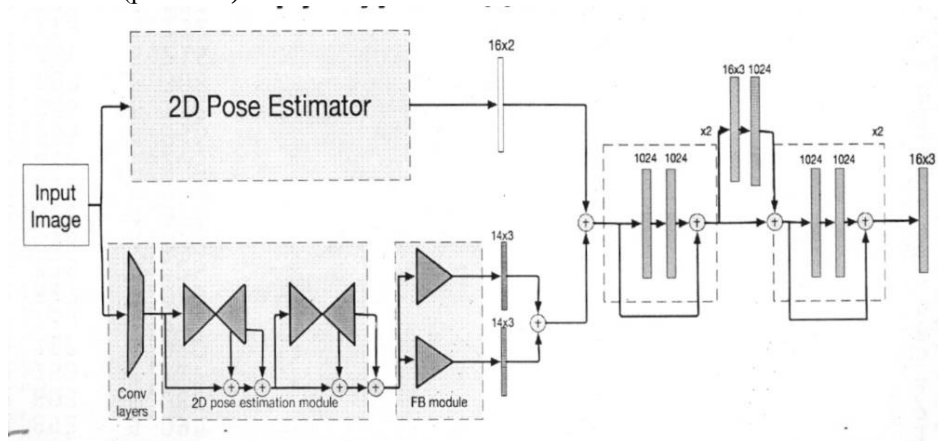


Рис. 6.15. Структура штучної нейронної мережі POSE ESTIMATOR для визначення жестів.

Жести фіксуються шляхом впевненого розпізнавання положення суглобів людини (рис. 6.16).



Рис. 6.16. Схема фіксації положення суглобів людини, які є вхідною інформацією для штучної нейронної мережі розпізнавання жестів

Штучна нейронна мережа дає можливість реалізації різних керуючих жестів (команд). Реалізуються наступні основні команди (жести): увага; заводь; глуши; рухайся за мною; зупинись; інші.

Приклад команди «Зупинись» наведено на рис. 6.16.

Мережа дає можливість ідентифікувати жести людини навіть при частковому перекритті тіла різними перепонами. Це здійснено широким застосуванням методів доповненої реальності.

Одним із ефективних способів керування наземним роботизованим комплексом є дистанційне керування комплексом за допомогою голосових команд українською мовою.

Для розпізнавання мови застосовується штучна нейронна мережі GOOGLE SPEECH – TO TEXT (рис. 6.17).

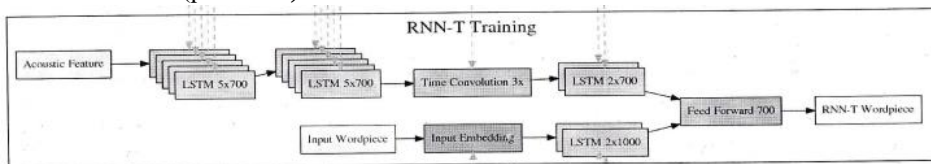


Рис. 6.17. Структура мережі для розпізнавання голосових команд українською мовою

Голосові команди забезпечують дистанційне керування наземним роботизованим комплексом.

Команди фіксуються в реальному часі. Розпізнавання голосових команд реалізується за допомогою бібліотеки GOOGLE SPEECH – TO TEXT, яка використовує мережі глибокого навчання RNN-T. Засоби розпізнавання мови працюють в реальних умовах, в тому числі, в умовах зашумленого навколишнього середовища.

#### 6.4. Системи зв'язку, керування та моніторингу наземних роботизованих комплексів

Система керування АСУ являє собою апаратний програмно-технічний комплекс, який складається з:

- бортових технічних засобів, які встановлені на наземному роботизованому комплексі;
- системи радіозв'язку для передачі даних в режимі реального часу;
- комп'ютерного устаткування, у тому числі серверів та робочих станцій користувачів;
- спеціального програмного забезпечення моніторингу та диспетчерського керування наземним роботизованим комплексом, ведення бази даних.

На борту кожного наземного роботизованого комплексу встановлений комплект устаткування з «мобільним терміналом даних», що включає:

- бортовий промисловий контролер;
- радіоприймач системи GPS для визначення знаходження і переміщення наземного роботизованого комплексу;
- радіостанцію для прийому і передачі технологічної та керуючої інформації на наземний роботизований комплекс.

Приклади пристроїв, що входять в склад системи керування та їх технічні характеристики наведені в табл. 6.3-6.5.

Таблиця 6.3

Основні вимоги та характеристики бортового контролера наземного роботизованого комплексу

|                                                                       |                                                |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Низька енергоємність системи живлення контролера                      | ETHERNET 10/100 Mb – 1 шт.                     |
| Відповідає встановленим вимогам до ударних та вібраційних навантажень | USB-USB2.0 – 1 шт.                             |
| Напруга 24V                                                           | CAN Bus – 1 шт.                                |
| Максимальна потужність, що споживається контролером                   | Digital I/O                                    |
| GPS                                                                   | Ethernet – Video – VGA displays to 1920 x 1440 |
| GPRS/GSM module                                                       | Linux                                          |
| Bluetooth                                                             | Maca 2,0 кг                                    |

Таблиця 6.4

Бортовий комп'ютер Jetson TX2

| Processing Components                                         | Ports & Peripherals                        |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| - dual-core NVIDIA Denver2+quad-core ARM Cortex-A57           | - HDMI 2.0                                 |
| - 256-core Pascal GPU                                         | - 802.11 a/b/g/n/ac 2x2 867Mbps WiFi       |
| - 8GB LPDDR4, 128-bit interface                               | - Bluetooth 4.1                            |
| - 32GB eMMC                                                   | - USB3, USB2                               |
| Software Support                                              | - 10/100/1000 BASE-T Ethernet              |
| - Linux4Tegra R31.2 (L4T)                                     | - 12 lanes MIPI CSI2.2, 2.5Gb/sec per lane |
| - Linux kernel 4.9                                            | - PCIe gen 2.0, 1x4+1x1 or 2x1+1x2         |
| - Ubuntu 18.04 aarch64                                        | - SATA, SDcard                             |
| Form-Factor                                                   | - dual CAN bus                             |
| - 5.5-19.6VDC input power (consuming 7.5W under typical load) | UART, SPI, I2C, I2S, GPIOs                 |

Таблиця 6.5

Програмований контролер PLC SIMATIC S7 1200 SIEMENS

| Центральний процесор                                  | CPU 1211C                                            | CPU 1212C          | CPU 1214C          |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Вбудована пам'ять, що завантажуються                  | 1 МБ                                                 | 1 МБ               | 2 МБ               |
| - розширення                                          | Картою пам'яті Memory Card ємністю до 24 МБ          |                    |                    |
| Вбудована робоча пам'ять                              | 25 КБ                                                | 25 КБ              | 50 КБ              |
| Енергонезалежна пам'ять для збереження даних          | 2 КБ                                                 |                    |                    |
| Адресний простір вводу-виводу, не більше              | 1024 байт на ввід/ 1024 байт на вивід                |                    |                    |
| Час виконання, не менше:                              |                                                      |                    |                    |
| - логічної операції                                   | 0,1 мкс                                              |                    |                    |
| - операції із словами                                 | 12 мкс                                               |                    |                    |
| - математичної операції                               | 18 мкс                                               |                    |                    |
| ПДД регулювання                                       | Підтримується до 16 контурів                         |                    |                    |
| Швидкісні лічильники                                  | 3x100 кГц                                            | 3x100 кГц +1x30кГц | 3x100 кГц +3x30кГц |
| Імпульсні виходи                                      | 2x100 кГц тільки в моделях з транзисторними виходами |                    |                    |
| Годинники                                             | Вбудовані, апаратні, запас ходу 240 годин            |                    |                    |
| Інтерфейс Ethernet                                    | 1xRJ45, 10/100 МБ                                    |                    |                    |
| Максимальна конфігурація                              | 1xSB+3xCM                                            | 1xSB+3xCM+2xSM     | 1xSB+3xCM+8xSM     |
| Вбудовані входи та виходи                             | 2AI+6DI+4DO                                          | 2AI+8DI+4DO        | 2AI+14DI+10DO      |
| Кількість каналів системи локального вводу/виводу:    |                                                      |                    |                    |
| - каналів вводу/виводу дискретних сигналів, не більше | 8/6                                                  | 42/40              | 144/140            |
| - каналів вводу/виводу аналогових сигналів, не більше | 3/1                                                  | 19/9               | 67/33              |

Система керування має розгалужену структуру (рис. 6.18).

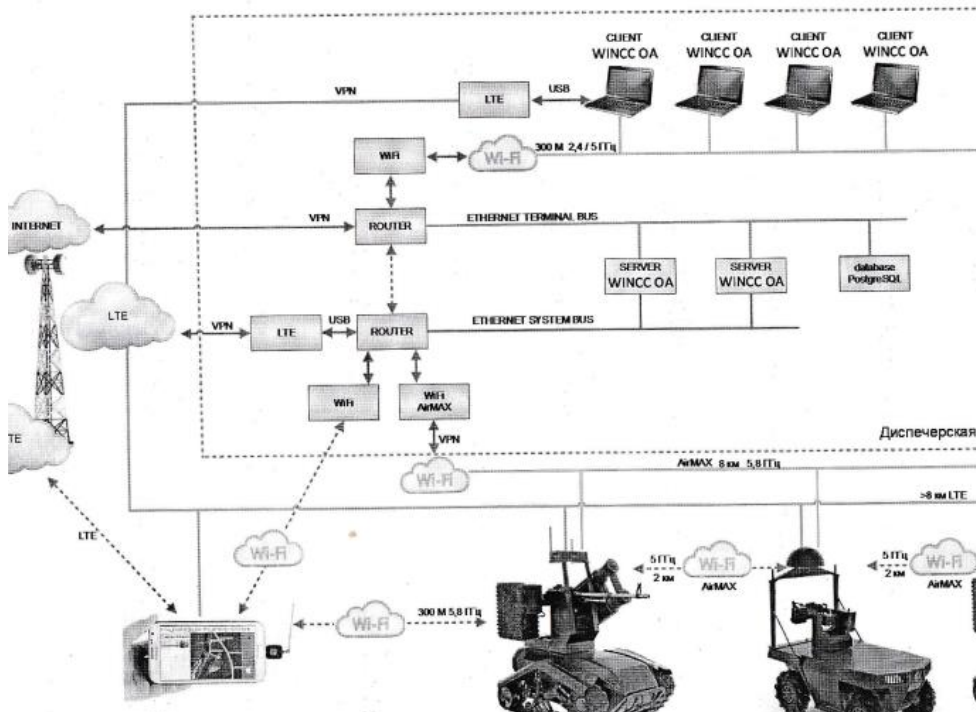


Рис. 6.18. Структура керування наземним роботизованим комплексом

Структура керування має відповідну архітектуру (рис. 6.19).

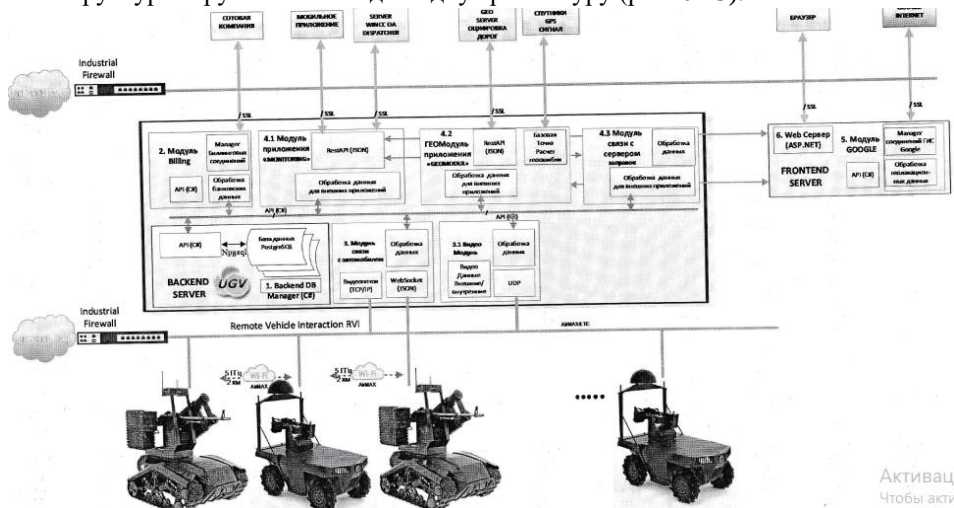


Рис. 6.19. Архітектура сервера баз даних диспетчеризації роботизованого комплексу

Для реалізації системи керування наземного роботизованого комплексу застосовуються відповідні мережі (рис. 6.20).

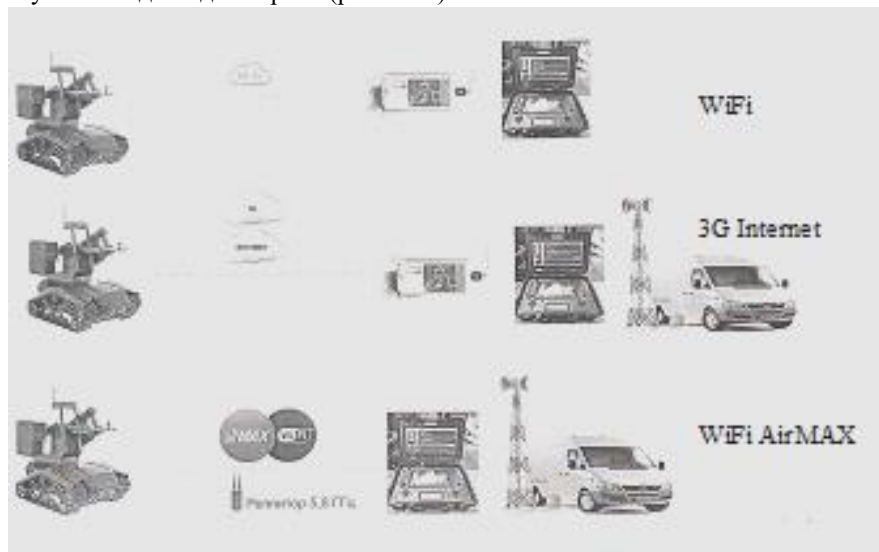


Рис. 6.20. Мережі керування наземним роботизованим комплексом

В наземних роботизованих комплексах забезпечено передачу даних від мобільних пристроїв. В якості мережі передачі даних використовуються канали зв'язку, що дозволяють передавати весь обсяг інформації від усіх мобільних об'єктів в реальному часі з можливістю додавання нові мобільні об'єкти до сервісних даних. Паралельно з технологією передачі даних на базі LTE передбачається основний канал зв'язку з можливістю використання альтернативних технологій швидкісної передачі даних на базі WiFi з елементами будови mash-системи.

Р-мережа SmartMesh від Analog Devices складається з добре масштабованої самоформуючої багатосекційної сітки бездротових вузлів, які відомі як супутники, що збирають та ретранслюють, і адміністратора мережі, який відстежує та керує продуктивністю та безпекою мережі, а також обмінюється даними з хост-додатком.

В НРК реалізована інфраструктура бездротової системи комунікацій. Запропоновано впровадження нової технології системи зв'язку SmartMesh від Analog Devices. Бездротова багатовузлова сотова мережа побудована на широкополосній радіочастоті 2,4GHz з переходом на 5,8 GHz. Мобільна мережа MESH легше вирішує питання зміни конфігурації, так як в інших системах потрібна більша кількість стаціонарних точок доступу, а їх перенесення пов'язано з додатковими витратами. Це бездротова мережа, що самостійно адаптується до динамічнозмінних технічних умов. Мережа відповідає архітектурі стандарту 802. 11n.

Склад обладнання мережі MESH: маршрутизатори, інтелектуальні точки доступу, пристрій комунікаційної щогли з устаткуванням MESH та з радіопристроями точка/точка Ubiquiti Rocket або аналогічним.

Навігація наземного роботизованого комплексу включає систему визначення його перебування в режимі реального часу. В місцях, при присутності і відсутності сигналу GPS, та де необхідна точна інформація про координати знаходження того чи іншого транспортного засобу, або необхідне точне позиціонування, в місцях дислокації з подальшою передачею та обробкою цієї інформації в диспетчерському центрі, застосовуються датчики класу систем RTLS (Real-time Locating Systems – системи позиціонування в режимі реального часу). Кожен транспортний засіб обладнується транспондером, а на місці дислокації стаціонарно встановлюється не менше трьох якорів. Точність позиціонування не більше 10 см.

Транспондери: прийомовідповідачі встановлюються на транспортному засобі і передають сигнал через визначені проміжки часу інформацію про знаходження безпосередньо в локальну систему диспетчеризації.

Якори: записують сигнали транспондера, присвоюють їм фіксоване положення та відмітку часу і передають зв'язані дані. Як мінімум з трьома синхронізованими між собою якорями, транспондер може бути розташований в 3D з точністю, вимірюваною в сантиметрах (рис. 6.21).

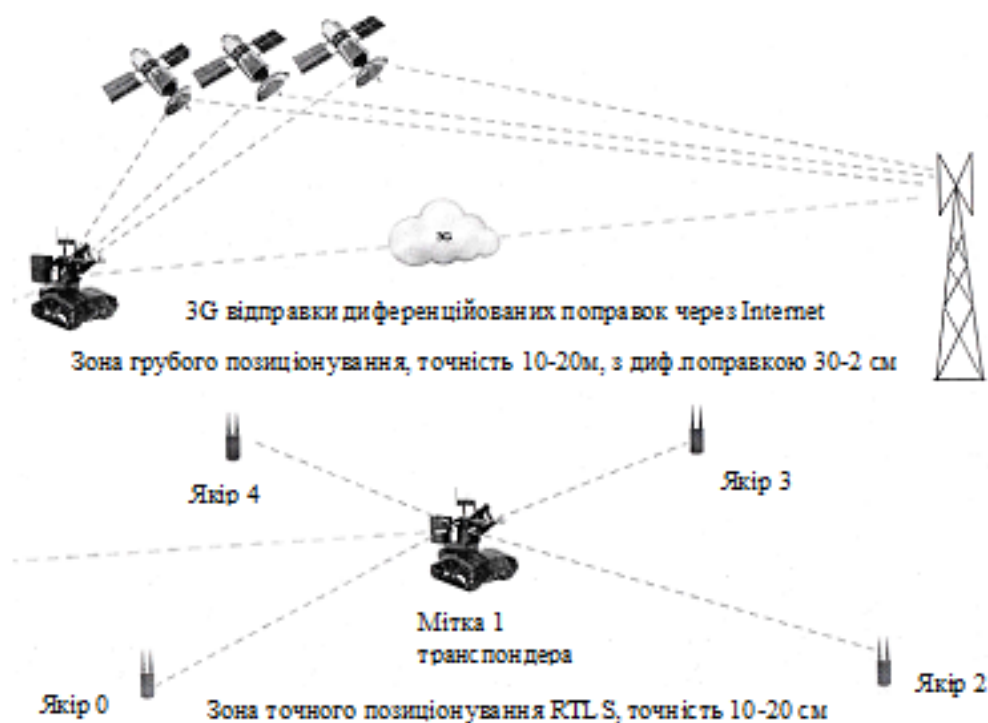


Рис. 6.21. Ідеологія визначення місцезнаходження (навігації) наземного роботизованого комплексу

В системах навігації використані наступні засоби: транспондер-приймач-передавач розміщується на транспортному засобі. Вони періодично передають інформацію про місцезнаходження засобу безпосередньо в локальну систему диспетчеризації.

Якір – фіксує сигнали транспондери, обробляє дані використовуючи інформацію інших якорів.

Застосування, як мінімум трьох якорів дає можливість визначити положення транспондери з точністю кількох сантиметрів.

Розрізняють різні види позиціонування наземних роботизованих комплексів (табл. 6.6).

Таблиця 6.6

Різновиди позиціонування наземних роботизованих комплексів

| № | Зональне позиціонування                                                                                              | Точне позиціонування                                                                      | Глобальне позиціонування                                                                                                                                          | Гібридне позиціонування                                                                                                                                                                                                                                 |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Технологія локального позиціонування об'єктів                                                                        | Технологія локального позиціонування                                                      | Технологія позиціонування з використанням космічних супутників                                                                                                    | Технологія, в якій об'єднуються переваги локального і глобального позиціонування та зводяться до мінімуму недоліки обох технологій позиціонування                                                                                                       |
| 2 | Визначення місцезнаходження об'єктів здійснюються всередині зони радіовидимості точки доступу системи позиціонування | Визначення місцезнаходження об'єкта здійснюється всередині зони обмеженої точками доступу | Плюсом даного типу позиціонування є великий спектр різноманітних абонентських пристроїв та необмежена сфера застосування на відкритих просторах поза приміщеннями | Пристрої, що виконують визначення місцезнаходження об'єкта підтримують технологію гібридного позиціонування, можуть переходити від локального до глобального позиціонування і навпаки, в залежності від можливості прийому того або іншого радіосигналу |



Таблиця 6.6 (продовження)

|   |                                                                                                         |                                                                                                                                           |                                                                                               |                                                             |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 3 | Для зонального позиціонування необхідна мінімум 1 точка доступу, щоб визначити місцезнаходження об'єкта | Для точного позиціонування потрібно мінімум 3 точки доступу, так як для визначення місцезнаходження використовується принцип триангуляції | Мінімум 3х супутників (для стабільної роботи пристрою необхідно бачити від 5 супутників)      |                                                             |
| 4 | Технологія BLE (Bluetooth Low Energy)                                                                   | Технологія: UWB (Ultra-wide band)                                                                                                         | Технологія: GNSS (Global Navigation Satellite Systems) GPS/ ГЛОНАСС/ BeiDou / Galileo / IRNSS | Технологія: BLE, UWB, GNSS                                  |
| 5 | Точність: +/-20м                                                                                        | Точність: 0,1-3 м                                                                                                                         | Точність: 2-6 м                                                                               | Точність: 0,1-6 м                                           |
| 6 | Позиціонування: всередині приміщення та на обмеженій зоні поза приміщенням                              | Позиціонування: всередині приміщення та на обмеженій зоні поза приміщенням                                                                | Позиціонування: поза приміщеннями в умовах видимості                                          | Позиціонування: поза приміщеннями та на відкритій території |
| 7 | Час роботи тега від батарейки: до 2х років                                                              | Час роботи тега на одному заряді акумулятора: до 48 годин                                                                                 | Час роботи тега на одному заряді акумулятора: до 48 годин                                     | Час роботи тега на одному заряді акумулятора: до 48 годин   |

Застосовуються наступні основні режими керування наземними роботизованими комплексами: - ручний режим від пілота за допомогою механічного повідця;- ручний режим навчання руху;- дистанційний режим від планшета/смартфона;- дистанційний режим керування жестами;- дистанційний режим керування голосом;- дистанційний режим дотове керування;- дистанційний режим керування «розумною рукавичкою»;- автономний режим з GPS;- автономний режим без GPS;- автономний режим руху в колонії;- автономний режим руху «електронний повідець».

Програмне забезпечення наземного роботизованого комплексу забезпечує наступні функції:- допомога водію, вплив на керування комплексом (наприклад, примусове гальмування комплексу або відхилення керма вліво/вправо);

- компонента ПЗ для дистанційного керування наземним роботизованим комплексом;
- компонента ПЗ для руху в режимі тиші або електромагнітного подавлення зв'язку;
- компонента ПЗ для автономного руху наземного роботизованого комплексу;
- компонента ПЗ розпізнає: знаки, розмітку, ландшафт, перешкоди;
- ідентифікація дорожніх знаків, доріг, вулиць, напрямків за допомогою RFID міток;

- компонента ПЗ навчає наземний роботизований комплекс автономному руху;
- компонента ПЗ забезпечує автономний рух наземного роботизованого комплексу в колоні.

При цьому використовується стандартне програмне забезпечення рухомих транспортних засобів (рис. 6.22).



Рис. 6.22. Основні види стандартного програмного забезпечення рухомих транспортних засобів

Основні режими керування наземним роботизованим комплексом (рис. 6.23).

Система керування має компоненти SmartTrack, що входить до складу SMART SOFT UGV, що включає в себе розробку програмного забезпечення і розробку програмного забезпечення та алгоритмів для систем машинного зору, розпізнавання образів, систем просторової орієнтації при відсутності керуючих сигналів від GPS, для наземних роботизованих комплексів з метою безпечного та автономного переміщення в складі колон.

Керування та координація наземним роботизованим комплексом здійснюється з диспетчерського пункту. Оперативно-диспетчерський пункт – це високоавтоматизований керівний технічний комплекс, оснащений засобами комунікації та інтерактивними засобами представлення інформації, стаціонарного або мобільного базування.

Метою оперативно-диспетчерського пункту є забезпечення контролю території та призначено для координації, моніторингу та керування наземним роботизованим комплексом.

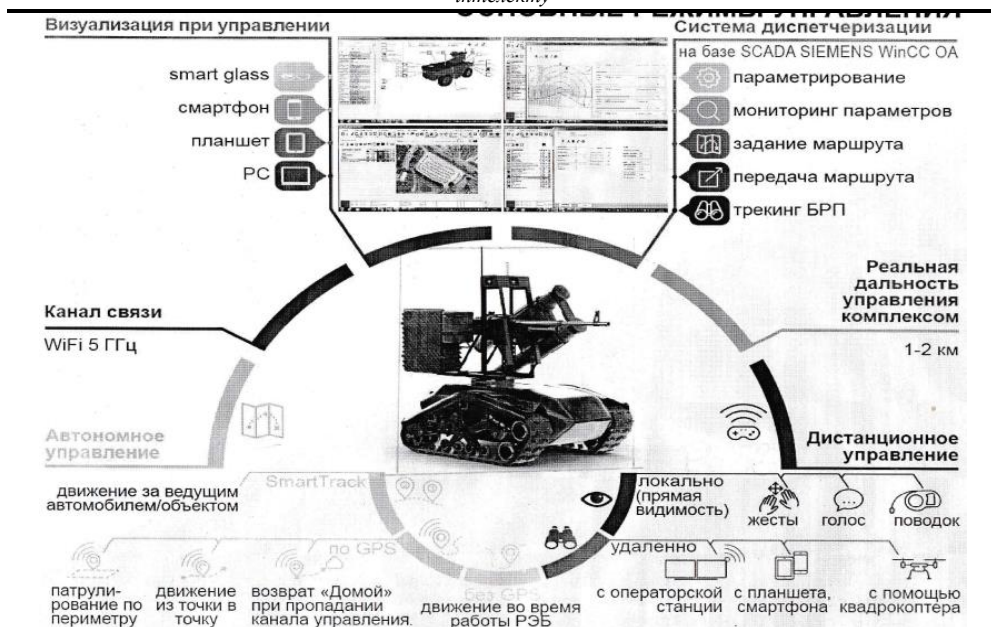


Рис. 6.23. Основні режими керування наземним роботизованим комплексом

Система зв'язку, керування та моніторингу дозволяє мати повну інформацію про місцезнаходження, напрямку руху наземного роботизованого комплексу, пройдений шлях, швидкість на будь якому етапі руху, повний стан дієздатності систем керування наземним роботизованим комплексом.

Керування наземним роботизованим комплексом здійснюється з центрального диспетчерського пункту. Центральний диспетчерський центр/ пункт (ситуаційний центр) – це високоавтоматизований організаційно-технічний комплекс, оснащений засобами комунікацій та інтерактивними засобами представлення інформації.

Метою центрального диспетчерського центру є цілодобове забезпечення контролю ситуації для оперативного прийняття керівних рішень, контролю та моніторингу підконтрольних об'єктів та критичних ситуацій, що виникають.

Основними задачами диспетчерського центру є: обробка інформації в режимі реального часу всіх сигналів з наземних та повітряних об'єктів, з оперативно-диспетчерських пунктів, про ситуації, що виникають на підконтрольній території; моніторинг стану об'єкта керування з прогнозуванням розвитку ситуації на основі інформації, що надходить; моделювання наслідків керівних рішень на базі використання інформаційно-аналітичних систем; оцінювати ризики виникнення позаштатних ситуацій; експертна оцінка прийнятих рішень та їх оптимізація; оцінка та керування кризовою та поточною ситуації; видача рекомендацій ОДП на основі експертно-аналітичного аналізу поточної ситуації.

## ЧАСТИНА III

### Визначення характеристик наземних роботизованих комплексів

#### РОЗДІЛ 7

#### Розвиток методів теорії гвинтів для визначення характеристик наземних роботизованих комплексів

##### 7.1 Математичні об'єкти відповідні нормалізованому гвинту

Одержані кінематичні і силові параметри маніпуляторів мобільних роботів підлягають основним положенням теорії гвинтів. При дослідженні статички і кінематики механізмів традиційно використовуються динамічний гвинт (динама) та кінематичний гвинт (кінета) [24,25].

Для опису гвинта необхідно два векторних або шість скалярних компонент. Тому гвинти відносяться до групи взаємопов'язаних скалярних математичних об'єктів, що має порядок 6 [90].

Нормалізований гвинт, що відповідає геометричному, силовому та кінематичному гвинтам визначається у вигляді:

$$Gt = \begin{bmatrix} \vec{g} \\ \vec{g} \times \vec{r} + h\vec{g} \end{bmatrix},$$

де  $\vec{g}$  - одиничний вектор направлений по вісі гвинта;  $\vec{r}$  - вектор початок якого знаходиться на системі координат  $oxyz$ ;  $h$  - параметр.

Окремими випадками є гвинти з  $h=0$ ,  $Gt_0 = \begin{bmatrix} \vec{g} \\ \vec{g} \times \vec{r} \end{bmatrix}$ , або відповідно:  $h = \infty$ ,

$$Gt_\infty = \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{g} \end{bmatrix}.$$

Одиничний вектор направлений вісі гвинта в системі координата  $X, Y, Z$  записується у вигляді:

$$\vec{g} = e_x \vec{i} + e_y \vec{j} + e_z \vec{k},$$

де  $e_x \vec{i}, e_y \vec{j}, e_z \vec{k}$  - проєкції одинична вектора на вісі координат;  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  - орти системи координат.

Вектор  $\vec{r}$  визначається своїми проєкціями згідно залежності:

$$\vec{r} = -X\vec{i} - Y\vec{j} - Z\vec{k},$$

де  $X, Y, Z$  - координати точки  $A$  яка знаходиться на вісі гвинта.

Знак мінус в останній залежності враховує напрямок вектора  $\vec{r}$ .

Розглянемо окремі випадки гвинтів зокрема гвинт із нескінченним параметром  $h=\infty$ :

$$Gt_{\infty} = \begin{bmatrix} 8 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{matrix}$$

Таким чином гвинт із нескінченним параметром являє собою вектор, що є результатом об'єднання по вертикалі нульового вектора та одиничного вектора направленного по вісі гвинта.

Гвинт із нульовим параметром буде визначено вектором:

$$Gt_0 = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ +(e_y \cdot Z - e_z \cdot Y) \\ -(e_z \cdot X - e_x \cdot Z) \\ -(e_x \cdot Y - e_y \cdot X) \end{bmatrix}$$

Даний математичний об'єкт відповідає вектору, що є результатом об'єднання по вертикалі координат одиничного вектора та координат векторного добутку  $\vec{g} \times \vec{r}$ . Даний вектор перпендикулярний площині розташування векторів  $\vec{g}$  і  $\vec{r}$  і направлений у додатному напрямку.

Розглянемо геометричну інтерпретацію складових шестивимірної вектора, що визначає гвинт або його окремі випадки. Складові гвинта є векторами які мають по 3 компоненти. Тому вони інтерпретовані векторами у евклідовому просторі.

Розглянемо вектори, що є складовим гвинта, в системі координат XYZ (рис. 7.1).

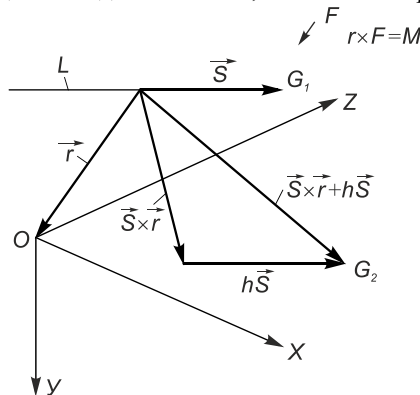


Рис. 7.1. Геометрична інтерпретація окремих складових гвинта

Складові гвинта являють собою одиничний вектор  $\vec{g}$  який направлений по вісі гвинта (лінія L) та вектор  $\vec{g} \times \vec{r} + h\vec{g}$  який визначається вектором  $\vec{r}$  або положенням точки A та параметром гвинта h. Приведемо дані вектори до початку системи координат (рис. 7.2).

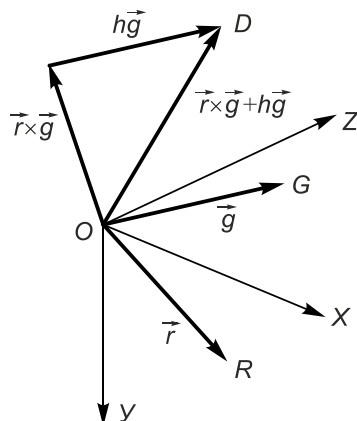


Рис. 7.2. Приведення векторів-складових гвинта до початку системи координат

Одержані після приведення два вектори  $OG$  та  $OC$  є складовими гвинта. Модулі даних векторів та кут  $\varphi$  між ними можуть бути довільними. Тому їх можна трактувати як головний вектор сил  $\vec{F}$  та головний момент  $\vec{M}$ , систем сил, що діють на об'єкт. Відповідно гвинт може бути визначено через головний вектор сил та головний момент. Для геометричної інтерпретації гвинта приймемо, що вектор  $\vec{g}$  направлено по вісі координат  $u$  і він знаходиться у площині  $XOY$  (направлено по вісі координат  $u$  і він знаходиться у площині  $XOY$ ) (рис. 7.3).

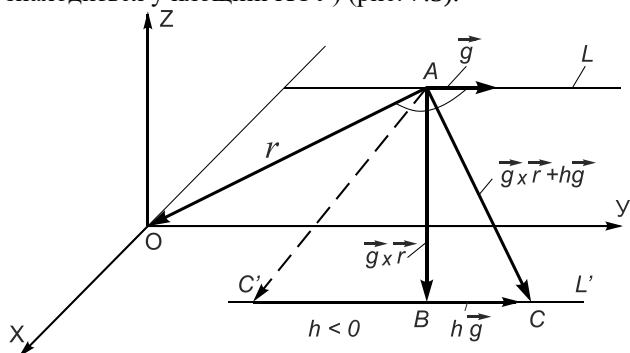


Рис. 7.3. Геометрична інтерпретація нормалізованого гвинта спеціального виду

При цьому гвинт  $Gt_{\infty}$  буде мати складові у вигляді нульового вектора та вектора  $\vec{g}$ . Згідно правих векторного добутку вектор  $\vec{g} \times \vec{r}$  буде колінеарним вісі Z. Прийемо початок даного вектора в точці А, при цьому кінець вектора буде в точці В. Векторна

сума  $\vec{g} \times \vec{r} + h\vec{g}$  буде визначати вектор кінець якого знаходиться в точці С на лінії L, яка паралельна напрямку одиничного вектора  $\vec{g}$ . В даному випадку лінії L та  $L_1$  колінеарні вісі Y. Гвинт має складові у вигляді вектора  $\vec{g}$  та перпендикулярного йому вектора  $\vec{AB}$ . В загальному вигляді складовими гвинта є вектор  $\vec{g}$  та вектор  $\vec{AC}$  який знаходиться в площині перпендикулярній векторам  $\vec{g}$  і  $\vec{r}$ , а кінець даного вектора розміщено на лінії L, яка паралельна напрямку одиничного вектора  $\vec{g}$ .

## 7.2. Групи гвинтів та їх властивості

Розглянемо двох членні групи гвинтів. Характерними для цієї групи є група гвинтів типу  $Gt_\infty$  напрямки яких паралельні деякій площині (рис. 7.4 а).

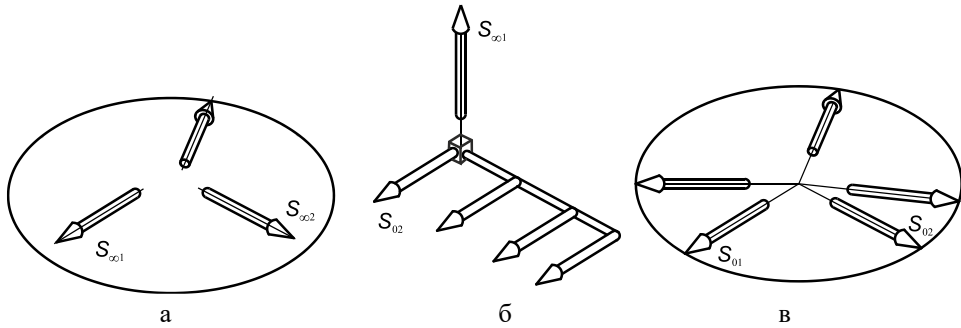


Рис. 7.4. Групи гвинтів: а - напрямки яких паралельні деякій площині  $\Pi$ ; б- схематичне зображення 2-х членної групи гвинтів спеціального виду; в- зображення 2-х членної групи гвинтів  $Gt_0$ , вісі яких розташовані в одній площині та перетинаються в одній точці

Практично важливими є 2-х членна група гвинтів, яка включає всі гвинти  $Gt_0$ , вісі яких компланарні та паралельні. Група гвинтів включає всі гвинти  $Gt_0$ , напрямки яких перпендикулярні напрямкам деякого гвинта  $Gt_\infty$  (рис. 7.4 б).

Характерною є 2-х членна група гвинтів  $Gt_0$  які є компланарними, а лінії дії всіх гвинтів перетинаються в одній точці (рис. 7.4 в).

За визначанням введені 3-х членні групи гвинтів. Окремим випадком є групи гвинтів  $Gt_\infty$  (рис. 7.5).

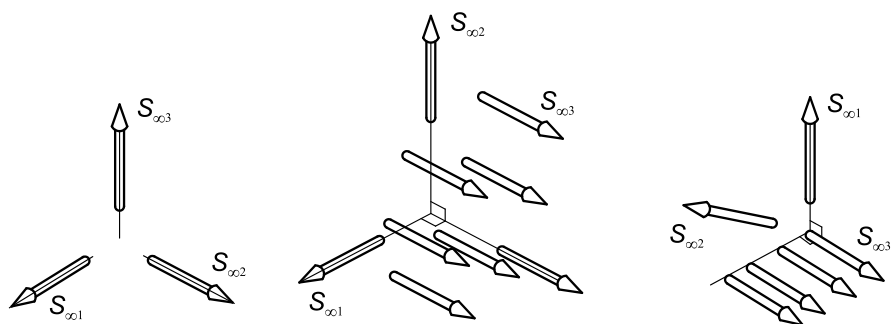


Рис. 7.5. Трьохчленна група яка включає всі гвинтиорієнтовані по вісям координат

Із даної групи гвинтів можна скласти гвинт довільного напрямку складові якого мають нульові проекції сил та довільні проекції моментів.

Із даної групи гвинтів виділяються окремі підгрупи. Зокрема наведена група включає одночленну групу  $Gt_{\infty}$ , 2-х членну групу  $Gt_{\infty}$ , 3-х членну  $Gt_{\infty}$  групу та 0 – членну групу (рис. 7.6).

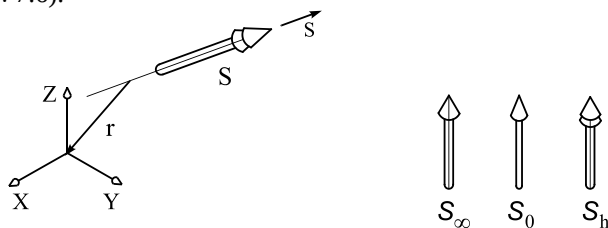


Рис. 7.6. Підгрупи гвинтів, які виділені в загальній 3-х членній групі  $Gt_{\infty}$

Підгрупа є лінійною комбінацією базисних гвинтів групи.

Практично важливою 3-х членною групою є група (загальний випадок), що включає 2-х члену групу  $Gt_{\infty}$  та одночленну групу  $Gt_0$ . При цьому напрямки гвинтів  $Gt_{\infty}$  паралельні площині яка не перпендикулярна вісі гвинта  $Gt_{\infty}$ , а також якій завгодно лінійній комбінації  $Gt_0$  та  $Gt_{\infty}$  (рис. 7.7 а).

В даній групі наявні гвинти із відмінним від нуля параметром  $h$ .

Окремим випадком даної групи є група в якій напрямок гвинтів одночленної групи  $Gt_0$  перпендикулярній площині в якій розташовані вісі гвинтів двох членної групи  $Gt_{\infty}$  (рис. 7.7 б).

Трьохчленна група може включати гвинт  $Gt_{\infty}$ , а також двохчленну групу  $Gt_0$ . При цьому вісі гвинтів  $Gt_0$  розташовані в площині перпендикулярній напрямку гвинта  $Gt_{\infty}$  (рис. 7.7 в).



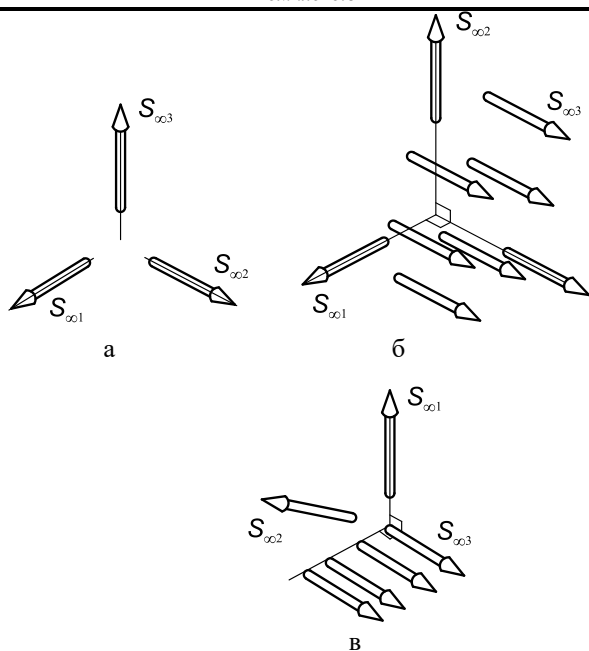


Рис. 7.7. Загальний випадок груп гвинтів: а - 3-х членної групи, що включає 2-х членну  $Gt_{\infty}$  групу та одної членну  $Gt_0$  групу; б- Трьох членна група (перпендикулярний випадок), що включає 2-х членну  $Gt_{\infty}$  групу та одночленну  $Gt_0$  групу; в - графічне зображення трьохчленної групи гвинтів яка включає  $Gt_{\infty}$  та 2-х членну групу  $Gt_0$  розташовану перпендикулярно  $Gt_{\infty}$

Практично важливою є трьохчленні групи гвинтів  $Gt_0$ , вісі яких перетинаються в одній точці. Дана точка є центром даної групи гвинтів (рис. 7.8).

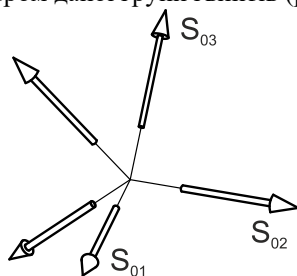


Рис. 7.8. Трьохчленна група гвинтів  $Gt_0$  вісі яких перетинаються в одній точці

Аналогічним чином визначаються групи гвинтів 4-х і більше членних груп. Практично важливою є 4-х членна груп, що включає трьохчленну підгрупу  $Gt_{\infty}$  та всі гвинта  $Gt_0$  які паралельні одній прямій (рис. 7.9).

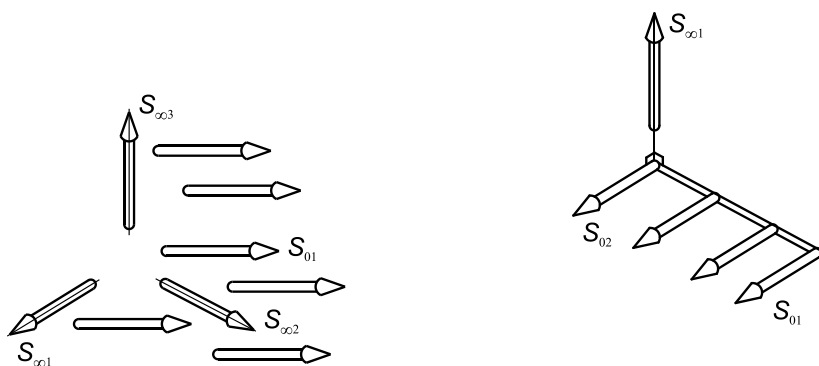


Рис. 7.9. Практично важлива 4-х членна група гвинтів, що включає 3-х члену групи  $Gt_{\infty}$  та гвинт  $Gt_0$  паралельні одній прямій

Лінійна комбінація двох груп гвинта складається із всіх лінійних комбінацій всіх базисних гвинтів даних груп гвинтів. Порядок цієї групи гвинтів менший або рівний сумі порядків вихідних груп гвинтів. Наприклад, лінійною комбінацією 1 -  $Gt_{\infty}$  групи та 2 -  $Gt_{\infty}$  групи може бути 2 -  $Gt_{\infty}$  група, якщо напрямок  $Gt_{\infty}$  в 1 -  $Gt_{\infty}$  групі паралельний площині, яка паралельна напрямкам всіх гвинтів у 2-х  $Gt_{\infty}$  групі (рис. 7.10).

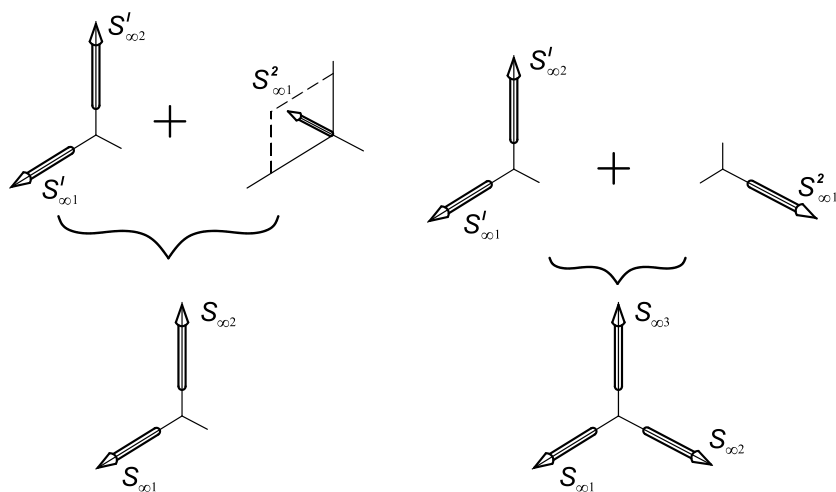


Рис. 7.10. Варіант лінійної комбінації одночленної групи гвинтів  $Gt_{\infty 1}$  та 2-х членної групи гвинтів  $Gt_{\infty 2}$  та  $Gt_{\infty 3}$

Іншим варіантом лінійної комбінації вказаних груп гвинтів є трьохчленна група гвинтів  $Gt_{\infty}$ , якщо напрямок гвинта в одночленній групі  $Gt_{\infty}$  не паралельний площині відповідній напрямкам всіх гвинтів 2-х членної  $Gt_{\infty}$  групи (рис. 7.11).

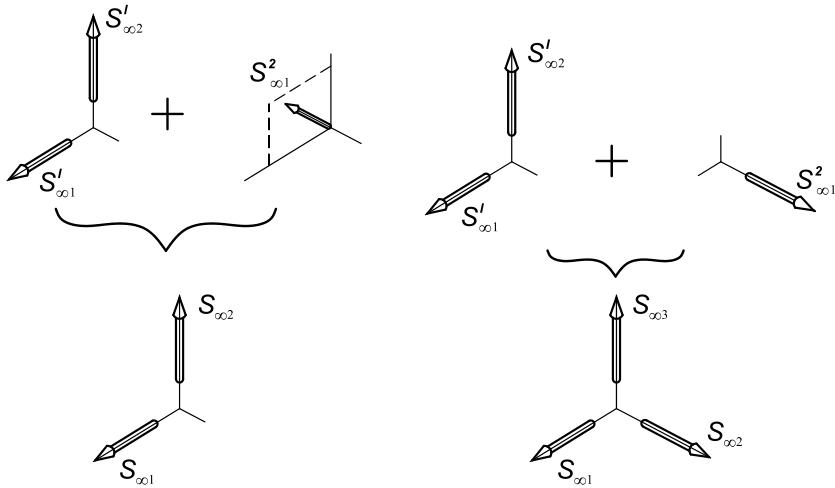


Рис. 7.11. Другий варіант лінійної комбінації двох груп гвинтів  $Gt_{\infty 1}$  та групи  $Gt_{\infty 2}$  та  $Gt_{\infty 3}$

Розглядаються взаємні гвинти та взаємні групи гвинтів. При цьому два гвинти  $Gt_1$  та  $Gt_2$  вважаються взаємними, якщо їх скалярний добуток дорівнює нулю. У цьому випадку скалярний добуток гвинтів:

$$Gt_1 \cdot Gt_2 = 0 = [ \Pi \cdot Gt_1 ]^T Gt_2,$$

де матриця  $\Pi$  визначена залежністю:

$$\Pi = \begin{bmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{bmatrix},$$

де  $0$  – нульова матриця розмірності  $3 \times 3$ , а  $I$  – одинична матриця розмірності  $3 \times 3$ .

Умови взаємності гвинтів має графічну інтерпретацію (рис. 7.12).

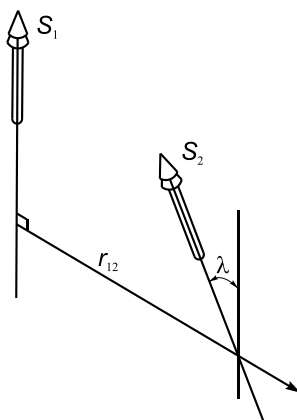


Рис. 7.12. Умова взаємності двох гвинтів

Умова взаємності гвинтів різного виду сформулюється у вигляді наступних пунктів:

- Гвинти взаємними без обмежень якщо  $h_1$  та  $h_2$  рівні  $\infty$ ;
- Гвинти взаємні коли  $\cos \lambda = 0$  та  $h_1$  або  $h_2$  дорівнюють  $\infty$ ;
- Взаємність потребує умови  $(h_1 + h_2) \cos \lambda - r_{12} \sin \lambda = 0$ , якщо  $h_1$  та  $h_2$  є кінцевими.

В даних формулах  $r_{12}$  – довжини перпендикуляра опущеного і вісі гвинта  $G_1$  на вісь гвинта  $G_2$ ;  $\lambda$  – кут між площинками вісей гвинтів  $G_1$  та  $G_2$  виміряний у додатному напрямку.

Наведені вище залежності мають наступні висновки. Два гвинта  $G_{\infty 1}$  та  $G_{\infty 2}$  завжди є взаємними. Гвинти  $G_{\infty}$  та  $G_0$  є взаємними при умові, що вісі даних гвинтів взаємно перпендикулярні. Два гвинти  $G_{01}$  та  $G_{02}$  взаємні лише за умови, що вісі даних гвинтів компланарні.

Аналогічно визначаються взаємні групи гвинтів.

### 7.3. Параметри наземних роботизованих комплексів відповідні нормалізованому гвинту

Приймемо, що вектор  $\vec{g}$  є вектором сили  $\vec{F}$ , а вектор  $\vec{r}$  є геометричним вектором, що визначає момент  $M$  сили відносно точки. Згідно визначення моменту сили маємо

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = -(\vec{r} \times F).$$

\Тобто складова гвинта  $\vec{g} \times \vec{r}$  є моментом даної сили відносно початку складові гвинта являють собою силу та момент даної сили складений із вектором пропорційним силі. Коефіцієнтом пропорційності є параметр гвинта.

Згідно теорії гвинтів розглядається група гвинтів порядна  $n$ , де  $0 < n < 6$  тобто  $n=1,2,\dots,5$ . Група гвинтів визначає всі гвинти лінійно залежні від  $n$  даних лінійно незалежних гвинтів.

Група гвинтів порядку 1 включає всі гвинти які мають один і той же напрямок. Гвинти даної групи лінійно залежать від одного гвинта певного напрямку. Дані гвинти мають один і той же тип. Зокрема всі гвинти  $Gt_0$  та  $Gt_\infty$  будуть виражені через гвинти даного типу. Запишемо лінійну комбінацію гвинтів у групі порядку 1:

$$C_1(Gt_0) + C_2(Gt_0) + \dots = C_\Sigma Gt_0.$$

Тобто, гвинти в групі порядку 1 різняться лише множником. Для гвинта, що визначає силові фактори маємо. Даний гвинт необов'язково є нормалізованим:

$$Gp_0 = \begin{bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M} \end{bmatrix}.$$

Відповідно при зміні сили  $\vec{F}_1 = CF$  маємо  $Gp_0 = CGp_0$ , де  $C$  – константа.

Напрямок гвинта відповідає напрямку сили. Тому всі гвинти в групі порядку 1 мають один напрямок. В окремому випадку всі гвинти групи лежати на одній прямій.

Компоненти (проекції) гвинта з нульовим параметром залежить від двох розмірних складових.

Одна із них  $\vec{g}$  має розмірність сили (для силового гвинта), а інша  $\vec{r}$  має розмірність довжини. Тобто, складові гвинта мають різну розмірність і не є однорідними. Враховуючи функціональну залежність:

$$Gp_0(\vec{g}, \vec{r}) = \begin{bmatrix} f_1(g) \\ f_2(g) \\ f_3(g) \\ f_4(g, r) \\ f_5(g, r) \\ f_6(g, r) \end{bmatrix} \quad Gp_0 = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}.$$

Можна зробити висновок про те, що три останні компоненти можна вважати мало залежними від  $g$ , а виключно залежними від  $r$ . Для приведення компонент гвинта до одного роду можна ввести множники  $\mu_r$ . При цьому одержимо два різновиди гвинта:

$$Gpr_0 = \begin{bmatrix} \vec{F} \cdot \mu_r \\ \vec{M} \end{bmatrix} \quad \text{та} \quad Gpg_0 = \begin{bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M} / \mu_r \end{bmatrix}.$$

Компоненти першого силового гвинта будуть мати розмірність моменту [Н·м], а другого сили [Н]. З однорідними компонентами можна виконувати операції векторної алгебри, зокрема знаходити довжину гвинта у шестивимірному просторі, знаходити скалярний добуток двох гвинтів. По суті однорідні компоненти дають можливість трактувати гвинт як вектор визначений у шестивимірному евклідовому

просторі. Для динамічного гвинта шестивимірний вектор визначає шість компонент з розмірністю сила (для  $Gpg_0$ ) або шість компонентів з розмірністю моментів (для  $Gpr_0$ ), які повністю описують всі сили та моменти, що діють на об'єкт, наприклад у вигляді традиційного головного вектора та головного моменту.

В теоретичній механіці під динамічним силовим гвинтом розуміють силовий фактор у вигляді сили та моменту вектор якого є колінеарним вектору сили. Даний силовий фактор (динама) є окремим випадком динамічного гвинта нормалізованого або загального виду. Даний гвинт визначено у вигляді:

$$Gpr_{0d} = \begin{bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M}_{\vec{M} \parallel \vec{F}} \end{bmatrix} \quad (\vec{F} - \text{колiнеар } \vec{M})$$

Окремими випадками є динамічні гвинти такого виду орієнтовані по вісям координат

$$Gpxr_{0d} = \begin{bmatrix} F_x \\ 0 \\ 0 \\ M_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Gpyr_{0d} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_y \\ 0 \\ 0 \\ M_y \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Gp zr_{0d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_z \\ 0 \\ 0 \\ M_z \end{bmatrix}.$$

Ці гвинти не є нормалізованими.

Дана система силових гвинтів утворює базис, що складається із трьох динам  $D_x, D_y, D_z$  (рис. 7.13).

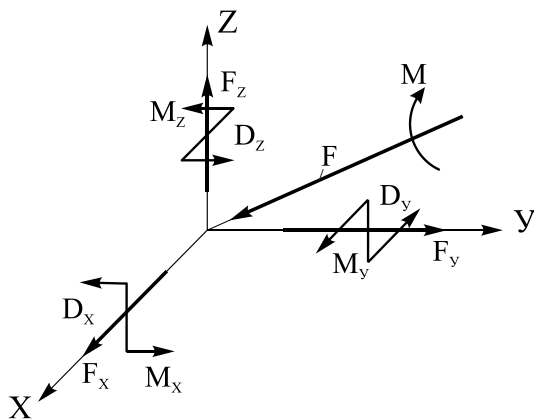


Рис. 7.13. Група гвинтів із трьох складових яка утворює базис в якому визначається довільний силовий гвинт

Базис із трьох наведених силових гвинтів у своїй лінійній комбінації описує довільний силовий гвинт зокрема гвинт типу динами, що включає колінеарні силу  $\vec{F}$  та момент  $\vec{M}$  орієнтовані у довільному напрямку. Нормалізований гвинт застосовується для опису геометричних параметрів.

242

Вектор кутових переміщень визначимо у вигляді:

$$\vec{\Phi} = \psi \vec{i} + \theta \vec{j} + \phi \vec{k}.$$

Для забезпечення відповідності складових гвинта і вектора переміщень по роду (розмірності) введемо масштабний множник для блоку  $\vec{\Phi}$  геометричного гвинта:

$$\mu_{\Phi} = -\frac{1}{e_x Y} = -\frac{1}{|\vec{x}| \cdot |\vec{r}|}.$$

При цьому  $\varphi = -\mu_{\Phi} \cdot e_x Y$ .

Таким чином блок  $\vec{\Phi}$  геометричного гвинта буде подано у вигляді вектора кутів повороту об'єкта.

Відповідно геометричний гвинт подано загальному у вигляді:

$$Gxr_0 = \begin{bmatrix} \vec{X} \\ \vec{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix},$$

де  $\vec{g} = \vec{X}$  - вектор геометричних переміщень полюса об'єкту;  $X, Y, Z$  - компоненти вектора переміщення полюса;  $\vec{\Phi}$  - вектор просторових поперечно-кутових переміщень об'єкту;  $\psi, \theta, \phi$  - кути повороту об'єкту навколо вісей  $X, Y, Z$ . При визначенні вектора  $\vec{\Phi}$  прийнято, що кути повороту  $\psi, \theta, \phi$  - є малими.

Геометричний гвинт також може бути приведено до однорідного виду введенням масштабних множників  $\mu_i$ .

Геометричний гвинт визначає просторове положення виконавчого органу маніпулятора. Він визначається числовими значеннями керованих координат. Для малих змін керованих координат маємо лінійне співвідношення вектора, що відповідає геометричному гвинту та вектора керованих координат:

$$Gxr_0 = (J_{ij})(q_j), \quad (q_j) = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_6 \end{bmatrix},$$

де  $(J_{ij})$  - матриця Якобі;  $(q_j)$  - шестивимірний вектор керованих координат.

Вектор керованих координат визначає число ступенів вільності маніпулятора. В даному випадку воно дорівнює шести. Коли число ступенів вільності маніпулятора перевищує шість вектор керованих координат відповідає еквівалентному шестивимірному вектору визначеному залежність:



$$(q_j) = (Q_{jk}) \cdot (e_k), \quad (e_k) = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_m \end{bmatrix},$$

де  $m$  – число наявних керованих координат;  $(Q_{jk})$  – прямокутна матриця розмірністю  $(6 \times m)$  яка формує еквівалентний шестивимірний вектор керованих координат.

Залежність описує мікропереміщення в системі маніпулятора відповідні розв'язку прямої та інверсної задачі кінематики. Якщо матриця Якобі не є сингулярного розв'язок інверсної задачі кінематики маніпулятора є однозначним і відповідає залежності:

$$(q_j) = (J_{ij})^{-1} \cdot Gx r_0,$$

де  $(J_{ij})^{-1}$  – матриця обернена матриці Якобі.

В загальному вигляді задача визначення геометричного гвинта, що описує просторове положення виконавчого органу маніпулятора є нелінійною. Її доцільно подати у вигляді:

$$Gx r_0 = \psi_a(q_j) + (J_{ij})(q_j),$$

де перший доданок в правій частині визначає макропереміщення в системі маніпулятора, які мають нелінійний характер, а другий доданок визначає просторові мікропереміщення виконавчого органу маніпулятора.

Геометричний гвинт, що описує положення виконавчого органу залежить від змін керованих координат, статичних силових факторів динамічного гвинта та динамічних силових факторів.

Зв'язок між геометричним і силовим гвинтами встановлюється матрицями жорсткості  $(C_{ij})$  або деформативності  $(D_{ji})$  згідно співвідношень

$$Gp = (C_{ij})Gx, \quad Gx = (D_{ji})Gp,$$

де  $Gp$  – силовий гвинт загального виду, що діє на об'єкт;  $Gx$  – геометричний гвинт, що визначає просторове переміщення об'єкту.

Наведене співвідношення визначає малі зміни гвинтів (мікропереміщення). Вони формулюють задачу статички лінійних систем. В загальному вигляді при врахуванні нелінійностей, співвідношення між геометричним та силовим гвинтам має вигляд:

$$Gp = \Phi_a(Gx) + (C_{ji})Gx.$$

Останній доданок визначає мікропереміщення в системі, які відповідають лінійній моделі, а перший доданок описує макропереміщення, які як правило є нелінійними та неоднозначними (гістерезис).

Вказані співвідношення між геометричним та силовим гвинтам розділяють статичні процеси деформування пружної системи маніпулятора на дві групи макродеформації та мікродеформації.

Аналогічно вводиться кінематичний гвинт який є шестивимірним вектором, три перші компоненти якого відповідають проекціями швидкості полюса об'єкту, а три останні компоненти визначають проекції кутових швидкостей об'єкта на вісі системи координат:

$$Gvr_0 = \begin{bmatrix} \vec{V} \\ \vec{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix},$$

де  $\vec{V}$  – швидкість полюсу об'єкту;  $\vec{\omega}$  – вектор кутової швидкості об'єкту;  $V_x, V_y, V_z$  – проекції швидкості полюса на вісі  $X, Y, Z$  системи координат.

В багатьох практично випливах випадках між геометричним і кінематичним гвинтами встановлено диференціальний зв'язок:

$$Gvr_0 = \frac{d}{dt}[Gxr_0].$$

В теоретичній механіці широко використовується поняття кінематичний гвинт (кінета), що являє собою об'єднання вектори швидкості та вектори кутової швидкості який є колінеарним вектору швидкості. Відповідно кінета є окремим випадком кінематичного гвинта загального виду визначеного залежністю:

$$Gvr_{0k} = \begin{bmatrix} \vec{V} \\ \vec{\omega}_{\omega|\vec{V}} \end{bmatrix}, \quad (\vec{\omega} \text{ колінеарний } \vec{V}).$$

Окремими випадками є кінематичні гвинти орієнтовані по вісям координат:

$$Gvxr_{0k} = \begin{bmatrix} V_x \\ 0 \\ 0 \\ \omega_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Gvyr_{0k} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_y \\ 0 \\ 0 \\ \omega_y \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Gvzr_{0k} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_z \\ 0 \\ 0 \\ \omega_z \end{bmatrix}.$$

Кінематичний гвинт загального виду може бути поданий у вигляді лінійної комбінації даної групи гвинтів:

$$Gvr_0 = C_1 Gvxr_{0k} + C_2 Gvyr_{0k} + C_3 Gvzr_{0k}.$$

Аналогічно визначаються нормалізований гвинт, що описує пришвидження виконавчого органу маніпулятора:

$$Gar_0 = \begin{bmatrix} \vec{a} \\ \vec{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix},$$

де  $\vec{a}$  – вектор пришвидшення полюса;  $\vec{\varepsilon}$  – вектор поперечно-кутового пришвидшення.

Наявний диференціальний зв'язок між введеними гвинтами:

$$Gar_0 = \frac{d}{dt}[Gvr_0] = \frac{d^2}{dt^2}[Gxr_0].$$

Дані співвідношення корисні для оцінки кінематичних характеристик маніпуляторів мобільних роботів.

Також введений об'єкт у вигляді гвинта, що визначає пришвидшення об'єкта при його просторовому переміщенні  $Ga$ . Перші три компонента даного гвинта визначають пришвидшення полюса, а три останні поперечно-кутові пришвидшення просторового сферичного руху об'єкта навколо полюса. Наведені вище визначення геометричного, кінематичного та силового гвинтів узагальнюють поняття кінематичного гвинта (кінети) та динамічного гвинта (динами) на випадок коли складові гвинтів мають різні напрямки, тобто вектори сили та моменту або швидкості та кутової швидкості не є колінеарними. Колінеарність є особливим випадком гвинта загального виду.

## РОЗДІЛ 8

### Геометрія та кінематика маніпуляторів із розімкненим кінематичним ланцюгом

#### 8.1. Математичне моделювання важільного маніпулятора планарного виду

Геометричні співвідношення визначають основні характеристики маніпулятора промислового робота. Найбільш поширеними видами маніпуляторів є маніпулятори важільного типу. Для важільної шарнірної системи геометричні співвідношення визначаються встановленням геометричних положень векторів відповідним важелям маніпулятора.

Поширеним видом маніпуляторів промислових роботів є важільні маніпулятори, важелі яких переміщуються в паралельних площинах. Ці площини знаходяться на незначній відстані у порівнянні з розмірами та робочим діапазоном переміщень маніпулятора (рис. 8.1).

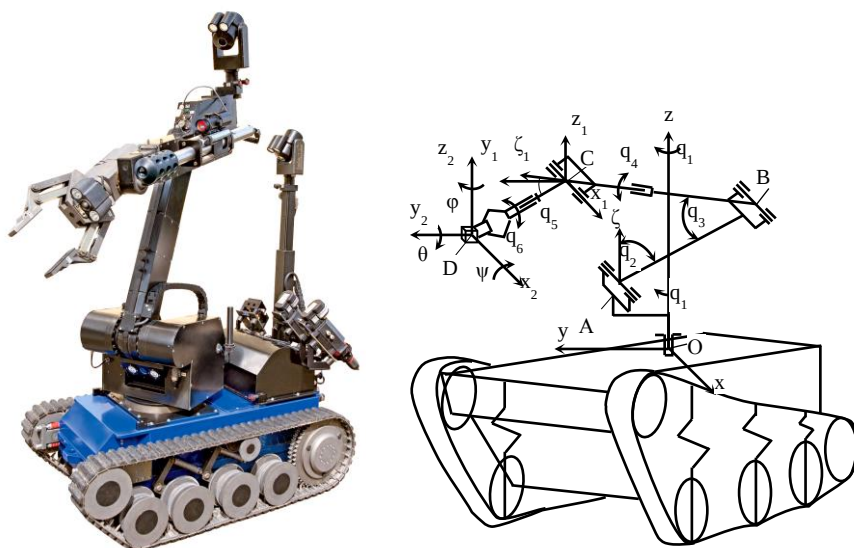


Рис. 8.1. Загальний вигляд мобільного робота (а) та кінематична схема маніпулятора планарного виду (б)

Положення виконавчого органу маніпулятора (параліпіед D) характеризується шестивимірним вектором  $x$ -координат: поступальних  $x$ ,  $y$ ,  $z$  та поворотних  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  переміщень параліпіеда D.

Кожна з цих координат залежить від шести керованих координат ( $q$  координат) маніпулятора, що прийняті у вигляді кутів повороту важелів  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ ,  $q_5$ ,  $q_6$ .

Зміни  $x$  координат відбуваються по причині зміни  $q$  координат. Невеликі зміни координат знаходяться в околиці номінального положення маніпулятора.

Причинно-наслідковий зв'язок встановлює кількісну залежність кожної координати  $x$  із всіма керованими  $q$  координатами:

$$\begin{aligned}x &= f_x(q_1, q_2, \dots, q_6), \\y &= f_y(q_1, q_2, \dots, q_6), \\z &= f_z(q_1, q_2, \dots, q_6), \\ \psi &= f_\psi(q_1, q_2, \dots, q_6), \\ \theta &= f_\theta(q_1, q_2, \dots, q_6), \\ \varphi &= f_\varphi(q_1, q_2, \dots, q_6).\end{aligned}$$

Відповідно маємо шість функцій шести змінних, які визначають геометрію маніпулятора. Дані співвідношення відповідають прямій задачі кінематики, коли по змінам керованих координат  $q_i$  знаходяться  $x$ -координати, що встановлюють положення виконавчого органу [19].

Пряма задача є однозначною. Заданим значенням ( $q_i$ ) відповідає один набір  $x$ -координат  $x, y, z, \psi, \theta, \varphi$ .

Зворотня (інверсна) задача кінематики полягає у знаходженні керованих координат ( $q_i$ ) по заданим значенням  $x, y, z, \psi, \theta, \varphi$ . Дана задача є неоднозначною.

Зміна  $x$ -координат та  $q$ -координат можуть бути великими і малими. При розгляді геометрії і кінематики маніпулятора розрізняють закономірності великих переміщень та особливості мікропереміщень [80]. Малими змінами координат (мікропереміщеннями) вважаються зміни, які набагато (на кілька порядків) менші характерних лінійних та кутових розмірів.

Великими переміщеннями вважаються переміщення, порядок яких відповідає характерному розміру маніпулятора (наприклад, середній довжині важеля). Великі переміщення відповідають великим змінам координат маніпулятора.

Задачею опису геометрії та кінематики маніпулятора є аналітичний опис руху маніпулятора в абсолютній системі координат без урахування сил і моментів, що породжують цей рух.

Розглянемо планарний маніпулятор який утворений плоским механізмом, що обертається навколо вісі  $z$  (координата  $q_0$ ). Плоский механізм рошташовано в радіальній відносно вісі  $z$  площині (рис. 8.2).

При знаходженні великих переміщень в маніпуляторі використаємо геометричні співвідношення між векторами, що описують положення шарнірів у точках  $A, B, C$  і  $D$ .

Для розрахунку геометричні кінематичних характеристик великих переміщень (макропереміщень) маніпулятора використовуються векторні величини. Положення точок  $A, B, C$  і  $D$  визначаються радіусами векторами  $\vec{r}_A, \vec{r}_B, \vec{r}_C, \vec{r}_D$ .

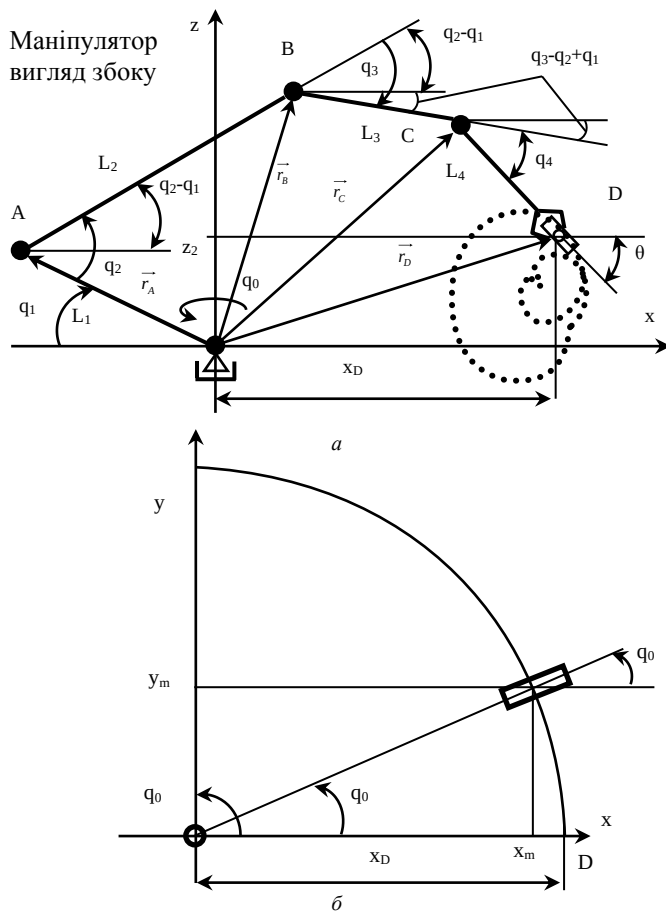


Рис.8.2. Схема 5-ти координатного маніпулятора: а – вид в радіальній площині; б – вид в напрямку вісі z

Визначимо послідовно координати точок А...D в радіальній площині. Координати в напрямку радіуса відносно осі обертання обчислені для положення маніпулятора при  $q_0=0$ . При цьому:

$$\begin{aligned}x_A &= -L_1 \cos q_1, \\x_B &= x_A + L_2 \cos(q_2 - q_1), \\x_C &= x_B + L_3 \cdot \cos(q_3 - q_2 + q_1), \\x_D &= x_C + L_4 \cdot \cos(q_4 + q_3 - q_2 + q_1).\end{aligned}$$

Координати z точок А, ...D обчислені по формулам:

$$\begin{aligned}z_A &= L_1 \sin q_1, \\z_B &= z_A + L_2 \sin(q_2 - q_1), \\z_C &= z_B - L_3 \sin(q_3 - q_2 + q_1),\end{aligned}$$

$$z_D = z_C - L_4 \sin(q_4 + q_3 - q_2 + q_1).$$

Кутове зміщення об'єкта маніпулювання у вигляді кута повороту:

$$\theta = q_4 + q_3 - q_2 + q_1.$$

Одержані співвідношення мають місце для різних за величиною і характером координат. При змінах координат в часі маємо кінематичні співвідношення в маніпуляторі. Розглядаються повільні зміни  $q$  координат та швидкі зміни. Прийmemo, що  $q$  координати змінюються в часі за певним законом. Швидкі зміни координат визначені різними законами.

Важливими спеціальними законами змін  $q$ -координат є закон рівномірних змін та закон рівноприскорених змін  $q$ -координат.

При зміні  $q$  координат мають місце відповідні зміни  $x$ -координат. При цьому виконавчий орган рухається по певній траєкторії.

Траєкторія точки  $D$  визначиться вектором  $\vec{r}_D(q_i)$ , або його проекціями  $x_D(q_i)$ ,  $y_D(q_i)$ ,  $z_D(q_i)$ . Для фіксованих значень  $(q_i)$  одержується масив  $x$  – координат  $(x, y, z)$  точки  $D$   $x_{Dj}$ . Масиву  $x$ -координат відповідають точки на траєкторії (рис. 8.3).

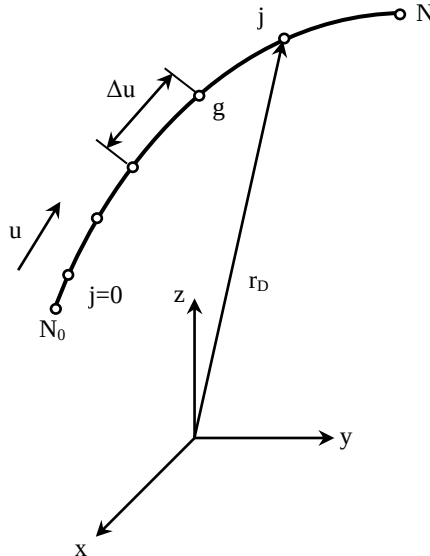


Рис. 8.3. Точки на траєкторії об'єкта маніпулювання відповідні набору значень  $(q_i)_j$  координат

Траєкторія визначає переміщення точки  $D$  із початкового положення  $N_0$  в кінцеве положення  $N$ . Траєкторія являє собою неперервну лінію складної форми.

Довжина дуги траєкторії визначиться інтегралом:

$$u = \int_{\Phi} du = \int_{\Phi} \sqrt{d\vec{r} \cdot d\vec{r}} = \int_{\Phi} \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}.$$

Прийmemo початкове положення системи  $(q_{ij}) = (q_i)_j$  в точці  $N_0$ . Інтегрування здійснюється по криволінійній траєкторії від початкового до поточного положення.

Прийmemo, що  $q$  – координати робота змінюються в часі за законом  $q_i = q_i(t)$ , починаючи з початкового положення  $t=0$ .

Відповідні зміни в часі координат точки D складуть  $x_D(t)$ ,  $y_D(t)$ ,  $z_D(t)$ .

Тоді довжина дуги траєкторії визначиться інтегралом в часі:

$$u(t) = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{dx_D}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_D}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz_D}{dt}\right)^2} dt.$$

Вектор швидкості точки D визначено як похідну в часі

$$\vec{V} = \frac{d\vec{r}_D}{dt} = \vec{i} \frac{dx_D}{dt} + \vec{j} \frac{dy_D}{dt} + \vec{k} \frac{dz_D}{dt}.$$

де  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  – орти системи координат.

Аналогічно шляхом диференціювання визначається вектор пришвидшення:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{i} \frac{d^2x_D}{dt^2} + \vec{j} \frac{d^2y_D}{dt^2} + \vec{k} \frac{d^2z_D}{dt^2}.$$

Наведені вище залежності використані для практичних розрахунків маніпулятора планарною. Проведені розрахунки геотеричних та кінематичних параметрів п'ятикоординатного маніпулятора для заданих геометричних розмірів важелів:

$$L_1 = 1 \text{ м},$$

$$L_2 = 1,4 \text{ м},$$

$$L_3 = 0,8 \text{ м},$$

$$L_4 = 0,7 \text{ м},$$

В якості тестової задачі обчислено координати точок A, B, C і D при  $q = \text{const}$ . Обчислення здійснені відповідно процедури:

$$xa(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) := -L1 \cdot \cos(q1)$$

$$xb(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) := xa(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) + L2 \cos(q2 - q1)$$

$$xc(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) := xb(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) + L3 \cos(q3 - q2 + q1)$$

$$xd(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) := xc(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) + L4 \cos(q4 + q3 - q2 + q1)$$

$$za(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) := L1 \cdot \sin(q1)$$

$$zb(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) := za(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) + L2 \sin(q2 - q1)$$

$$zc(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) := zb(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) - L3 \sin(q3 - q2 + q1)$$

$$zd(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) := zc(L1, L2, L3, L4, q1, q2, q3, q4) - L4 \sin(q4 + q3 - q2 + q1)$$

Проведено контроль обчислень для  $q_1=1$ ,  $q_2=q_3=q_4=0$ :

$$zd(L1, L2, L3, L4, 1, 0, 0, 0) = -1.599$$

З метою контролю роботи процедури визначено траєкторію точки D при зміні лише однієї керованої координати ( $q_1$ ). Розрахована траєкторія являє собою плавну криву параболічного типу (рис. 8.4).



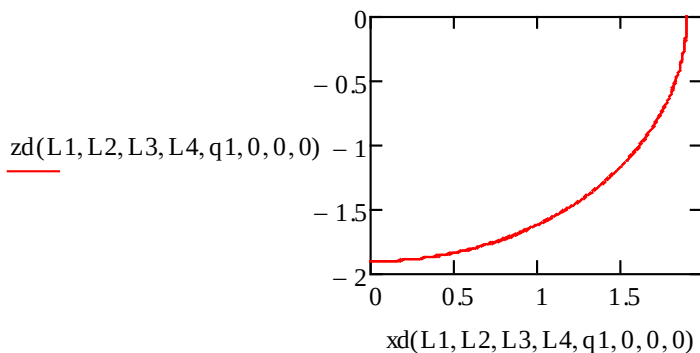


Рис. 8.4. Розрахунок траєкторії переміщення точки D в радіальній площині при зміні лише однієї керованої координати  $q_1=1$ ,  $q_2=q_3=q_4=0$

Для розрахунку геометрії і кінематики планарного маніпулятора прийняті лінійні закони зміни керованих координат. При цьому задані закони зміни координат  $q_1, \dots, q_4$  в часі у вигляді наступних лінійних залежностей від часу:

$$\begin{aligned} q_1(t) &:= \frac{\pi}{6} + t & q_2(t) &:= \frac{\pi}{3} - t \\ q_3(t) &:= \frac{\pi}{4} + t & q_4(t) &:= \frac{\pi}{6} + t \end{aligned}$$

Для даних законів зміни положення важелів маніпулятора обчислені зміни координат точок A, B, C і D маніпулятора в залежності від часу:

$$\begin{aligned} x_a(L1, L2, L3, L4, t) &:= -L1 \cdot \cos(q_1(t)) \\ x_b(L1, L2, L3, L4, t) &:= x_a(L1, L2, L3, L4, t) + L2 \cos(q_2(t) - q_1(t)) \\ x_c(L1, L2, L3, L4, t) &:= x_b(L1, L2, L3, L4, t) + L3 \cos(q_3(t) - q_2(t) + q_1(t)) \\ x_d(L1, L2, L3, L4, t) &:= x_c(L1, L2, L3, L4, t) + L4 \cos(q_4(t) + q_3(t) - q_2(t) + q_1(t)) \\ z_a(L1, L2, L3, L4, t) &:= L1 \cdot \sin(q_1(t)) \\ z_b(L1, L2, L3, L4, t) &:= z_a(L1, L2, L3, L4, t) + L2 \sin(q_2(t) - q_1(t)) \\ z_c(L1, L2, L3, L4, t) &:= z_b(L1, L2, L3, L4, t) - L3 \sin(q_3(t) - q_2(t) + q_1(t)) \\ z_d(L1, L2, L3, L4, t) &:= z_c(L1, L2, L3, L4, t) - L4 \sin(q_4(t) + q_3(t) - q_2(t) + q_1(t)) \end{aligned}$$

Виконано контроль розрахунків у конкретні моменти часу:

$$z_d(L1, L2, L3, L4, 1.) = 0.399$$

Додатково обчислено поперечно-кутове положення виконавчого органу маніпулятора. Для цього використано залежність:

$$\theta(t) := q_4(t) + q_3(t) - q_2(t) + q_1(t)$$

Побудовано графік залежності кута повороту виконавчого органу робота від часу. Враховуючи прийняті закони зміни  $q$ -координат, залежність кута повороту від часу являє собою лінійну функцію (рис. 8.5).

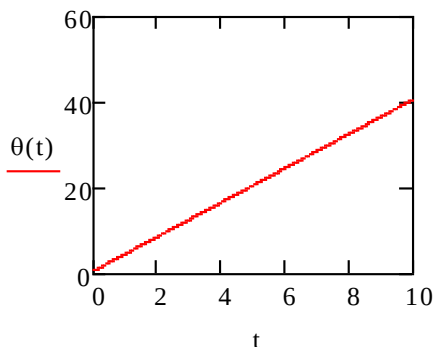


Рис. 8.5. Залежність кута повороту виконавчого органу робота від часу

Згідно розробленої процедури обчислені зміни в часі координат  $z_D$  та  $x_D$  в радіальній площині. Побудовані їх графіки (рис. 8.6).

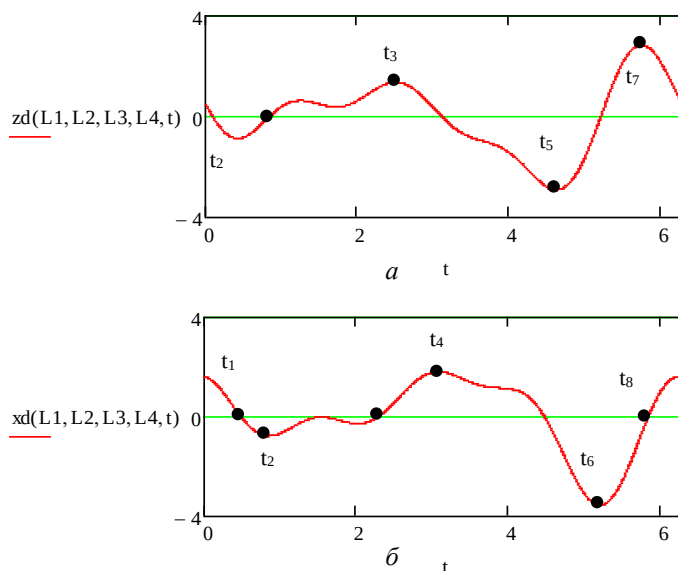


Рис. 8.6. Розраховані проекції переміщення точки  $D$  в радіальній площині:  
 $a$  – у вертикальному напрямку,  $b$  – в горизонтальному напрямку

На графіках проекцій переміщень зазначені характерні точки і моменти часу, які відповідають нульовим та екстремальним значенням проекцій переміщень. Дані точки є характерними при аналізі траєкторії переміщень точки  $D$  для прийнятих законів зміни  $q$  координат.

Наведені проекції переміщень визначають траєкторію руху точки  $D$  у радіальній площині (рис. 8.7).

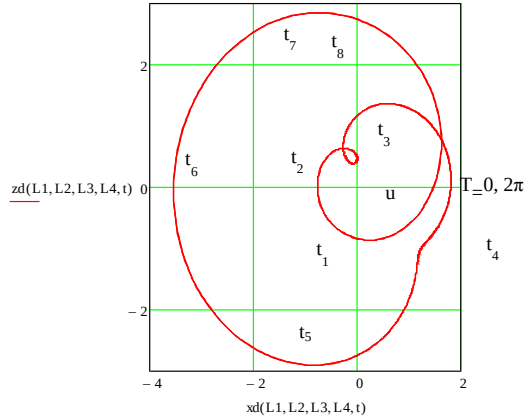


Рис. 8.7. Траєкторія переміщення точки D у радіальній площині

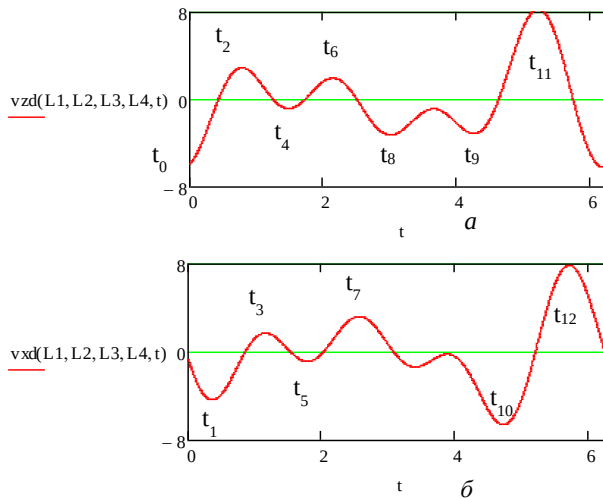
Траєкторія являє собою складну петле подібну криву. Для ідентифікації положення точки D відносно системи координат використані точки  $t_1, \dots, t_8$ .

Визначені проекції швидкостей точки D у радіальній площині. Це здійснено в результаті диференціювання відповідних проекцій координат:

$$v_{zd}(L1, L2, L3, L4, t) := \frac{d}{dt} z_d(L1, L2, L3, L4, t)$$

$$v_{xd}(L1, L2, L3, L4, t) := \frac{d}{dt} x_d(L1, L2, L3, L4, t)$$

Побудовано графіки залежностей швидкості переміщення точки від часу (рис. 8.8).

Рис. 8.8. Проекції швидкості переміщення точки D в радіальній площині на вісі координат  $z$  і  $x_D$

По проєкціям швидкостей знайдено модуль швидкості

$$V = \sqrt{V_z^2 + V_d^2}.$$

Побудовано годограф вектора швидкості точки D в радіальній площині (рис. 8.9).

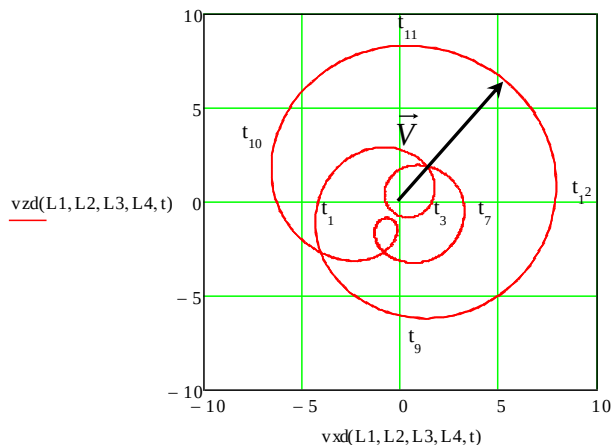


Рис. 8.9. Годограф вектора швидкості точки D в радіальній площині

Із аналізу годографа швидкості випливає, що напрямок швидкості виконавчого органу суттєво змінюється в часі, а модуль швидкості є обмеженим.

Побудовані фазові траєкторії точки D у вигляді залежностей проєкцій швидкостей від відповідних переміщень (рис. 8.10).

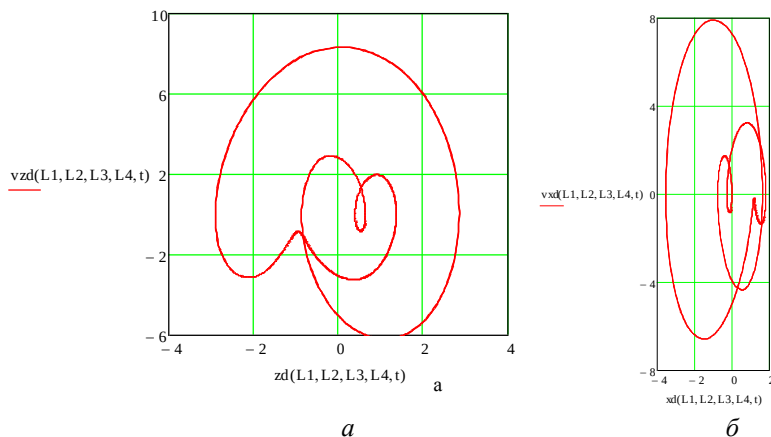


Рис. 8.10. Фазові траєкторії точки D у вигляді залежностей проєкцій швидкостей від проєкцій переміщень: а -  $V_z = V_z(z_d)$ , б -  $V_x = V_x(x_d)$

Розрахунок проєкцій швидкостей став основою для знаходження довжини дуги траєкторії. Це зроблено шляхом інтегрування:

$$ud(L1, L2, L3, L4, t) := \int_0^t \sqrt{vxd(L1, L2, L3, L4, t)^2 + vzd(L1, L2, L3, L4, t)^2} dt$$

В результаті побудована залежність довжини дуги від часу (рис. 8.11).

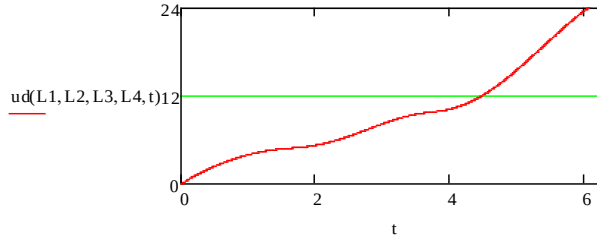


Рис. 8.11. Одержана розрахунком довжина дуги траєкторії в функції часу

Проекції пришвидшення виконавчого органу у радіальній площині знайдено шляхом диференціювання швидкостей згідно формул:

$$axd(L1, L2, L3, L4, t) := \frac{d^2}{dt^2} xd(L1, L2, L3, L4, t)$$

$$azd(L1, L2, L3, L4, t) := \frac{d^2}{dt^2} zd(L1, L2, L3, L4, t)$$

Побудовано графіки залежностей проекцій пришвидшення від часу (рис. 8.12).

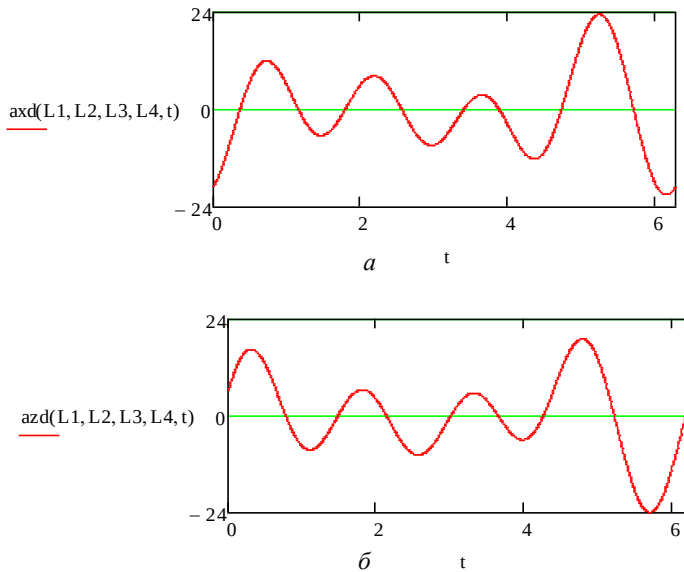


Рис. 8.12. Графіки залежностей проекцій пришвидшення точки D від часу в радіальній площині

За даними графіками знаходяться сили інерції, що діють на маніпулятор.

Розглянуті раніше розрахунки геометричних та кінематичних параметрів руху маніпулятора в радіальній площині доповнені дослідженням просторового руху маніпулятора.

Для здійснення просторового руху забезпечується поворот радіальної площини, відносно вісі  $z$  (координата  $q_0$ ).

Задано закон повороту площини розташування ланок маніпулятора прийнято у вигляді лінійної функції часу:

$$\begin{aligned} q_0(t) &:= t \\ q_0(t) &:= t \quad 0 \leq t \leq 2\pi \end{aligned}$$

При цьому просторові координати точки  $D$  визначаються у вигляді:

$$x_m(L1, L2, L3, L4, t) := x_d(L1, L2, L3, L4, t) \cdot \cos(q_0(t))$$

$$z = z_d$$

$$y_m(L1, L2, L3, L4, t) := x_d(L1, L2, L3, L4, t) \cdot \sin(q_0(t))$$

Розраховано залежності переміщення точки  $D$  в проекції на площину  $хоу$  (рис. 8.13).

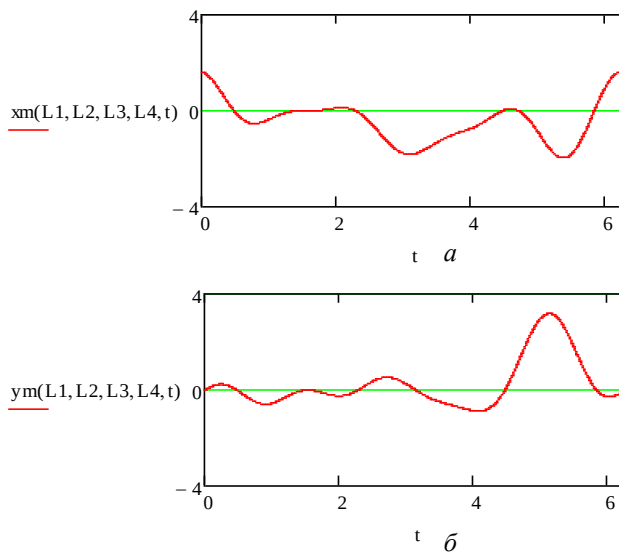


Рис. 8.13. Переміщення точки  $D$  в площині  $хоу$  в функції часу:  
 $a$  – зміни координати  $x$ ,  $б$  – зміни координати  $y$

Переміщення виконавчого органу в горизонтальній площині має коливальний характер із ростом амплітуди. На основі проведених розрахунків побудована траєкторія переміщення точки  $D$  в площині  $хоу$  (рис. 8.14).

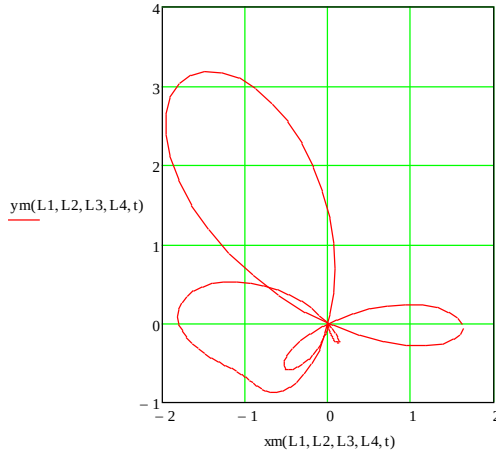


Рис. 8.14. Траєкторія переміщення точки D в площині хоу

Траєкторія має складний петле подібний характер. Вона включає кілька ізольованих петель орієнтованих у радіальних напрямках.

Шляхом диференціювання визначено проекції швидкостей точки D на осі координат x і y.

$$v_{xm}(L1, L2, L3, L4, t) := \frac{d}{dt} x_m(L1, L2, L3, L4, t)$$

$$v_{ym}(L1, L2, L3, L4, t) := \frac{d}{dt} y_m(L1, L2, L3, L4, t)$$

Побудовано розрахункові графіки проекцій швидкостей (рис. 8.15).

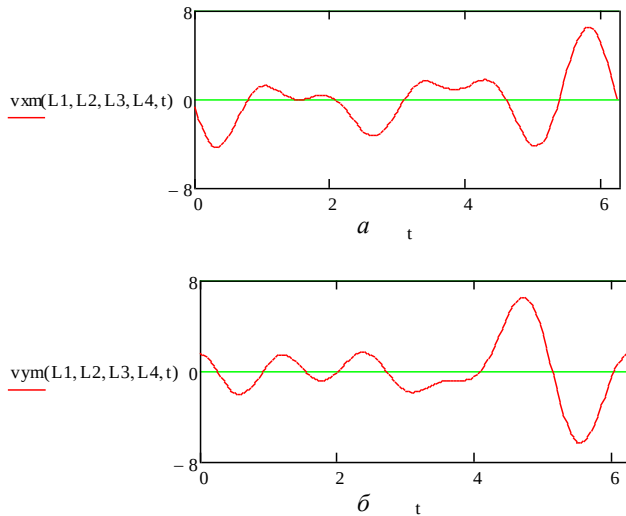


Рис. 8.15. Розрахункові проекції швидкостей на вісі координат x і y

Використовуючи одержані залежності розраховано годограф вектора швидкості в площині  $хоу$  (рис. 8.16).

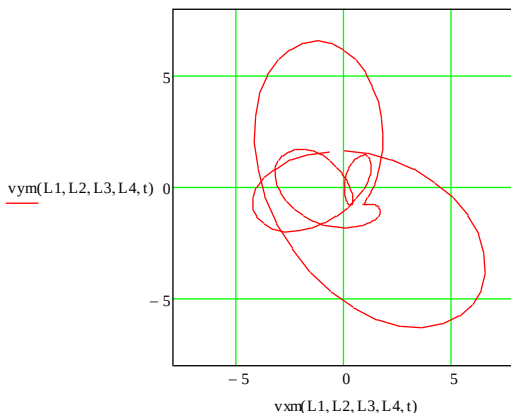


Рис. 8.16. Годограф проекції вектора швидкості на площину  $хоу$

Знайдені фазові траєкторії просторових переміщень виконавчого пристрою маніпулятора (точки D). в площині  $хоу$  (рис. 8.17).

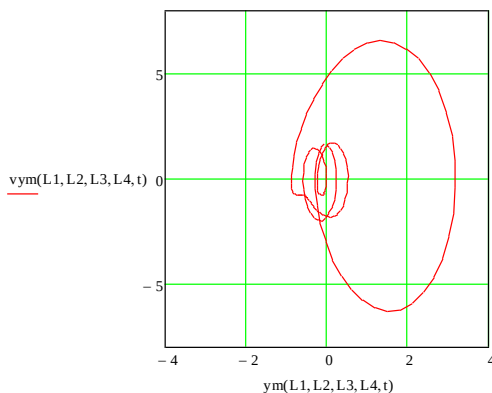


Рис. 8.17. Розрахункова фазова траєкторія точки D відповідна координаті  $y$

На основі наявних залежностей знайдені необхідні кінематичні параметри руху виконавчого органу робота (точка D).

Шляхом диференціювання знайдено проекції пришвидшення точки D на вісі координат  $x$  і  $y$ :

$$a_{xn}(L1, L2, L3, L4, t) := \frac{d^2}{dt^2} x_n(L1, L2, L3, L4, t)$$

$$a_{ym}(L1, L2, L3, L4, t) := \frac{d^2}{dt^2} y_m(L1, L2, L3, L4, t)$$



Побудовані залежності пришвидшення від часу (рис. 8.18).

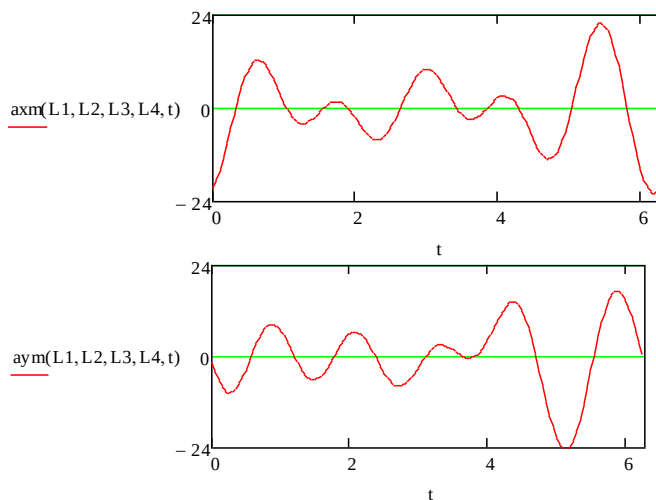


Рис. 8.18. Проекції пришвидшення точки  $D$  на вісі координат  $x$  і  $y$

По проєкціям швидкостей шляхом інтегрування знайдена довжина дуги просторової траєкторії переміщення точки  $D$ :

$$um(L1, L2, L3, L4, t) := \int_0^t \sqrt{v_{xm}(L1, L2, L3, L4, t)^2 + v_{ym}(L1, L2, L3, L4, t)^2 + v_{zd}(L1, L2, L3, L4, t)^2} dt$$

Побудована залежність довжини дуги від часу (рис. 8.19).

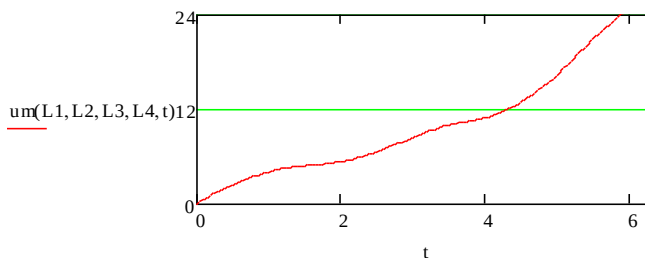


Рис. 8.19. Залежність довжини дуги просторової траєкторії переміщення точки  $D$  від часу

Наведений приклад розрахунку геометричних та кінематичних параметрів визначає методику визначення параметрів робіт при великих переміщеннях. При цьому зв'язки в кінематичних парах робота та в приводах вважаються ідеальними. Прийнято, що в них відсутні люфти і зазори. Всі елементи кінематичних ланцюгів вважаються стабільними і недеформованими.

В реальних конструкціях кінематичні ланцюги мають різноманітні дефекти як геометричні, так і динамічні. Система змінює свою форму і розміри внаслідок термічних та пружних деформацій. Наведений вище розрахунок геометрії і

кінематики застосовується в основному для визначення великих переміщень (макропереміщень) в роботах. Для розрахунку і аналізу малих переміщень використовувати нелінійні залежності є недоцільним. Тому застосовують інші підходи і методи.

Мікропереміщення визначають як малі відхилення координат виконавчого органу від номінального (нульового) положення.

Прийmemo, що робот має шість керованих координат  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ . Цими координатами є відносні кути повороту важелів, як показано на рис. 8.20.

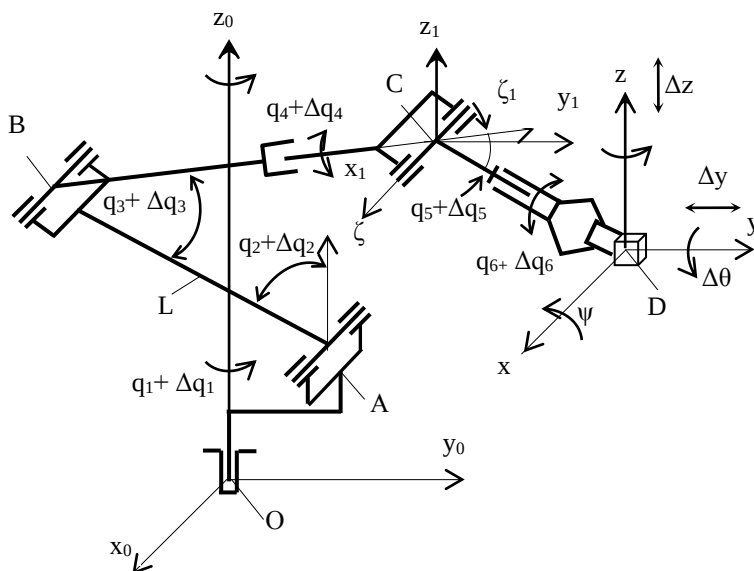


Рис. 8.20. Геометрична схема робота важільного типу та визначення мікропереміщень рухомої системи робота

Положення виконавчого органу (схвата) з об'єктом маніпулювання D визначається x-координатами які включають переміщення

$x, y, z$  та кути повороту об'єкта  $\psi, \theta, \phi$   
відносно вісей координат  $x, y, z$ .

Кожна з цих координат залежить від шести керованих координат у вигляді кутів повороту важелів

$q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ .

Розглянемо малі зміни геометрії рухомої важільної системи робота. Приймемо, що невеликі зміни  $x$  координат відбуваються по причині відповідних невеликих змін  $q$  координат. Вказані зміни координат знаходяться в околиці номінального положення маніпулятора і визначають мікропереміщення рухомої системи маніпулятора. Для кількісної характеристики змін  $x$ -координат зводиться вектор мікропереміщень виконавчого органу робота:

$$(\Delta x_i) = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \psi \\ \Delta \theta \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}.$$

В номінальному положенні  $(\Delta x_i) = 0$ . Мікропереміщення є обмеженими і малими у порівнянні із характерним розміром робота  $L$ . Відповідно:

$$\Delta x \ll L, \Delta y \ll L, \Delta z \ll L, \Delta \psi L \ll L, \Delta \theta L \ll L,$$

$$\Delta \varphi L \ll L, \text{ або } \Delta \psi \ll 1, \Delta \theta \ll 1, \Delta \varphi \ll 1.$$

Цим мікропереміщення відрізняються від великих переміщень на які не накладено жодних умов.

Причиною мікропереміщень є люфти, зазори та інші неточності деталей і спряжень, а також статичні і динамічні деформації пружної системи робота, або похибки приводів. Наслідком мікропереміщення є похибки позиціонування робота. Також виникають похибки теоретичного визначення геометричних та кінематичних параметрів. Вони є незначними. Для їх аналізу досліджуються процеси мікропереміщень елементів і вузлів маніпулятора.

Зв'язок між керованими  $q$  координатами і вихідними  $x$ -координатами робота є нелінійним і визначається функціями:

$$\begin{aligned} x &= f_x(q_1, q_2, \dots, q_6) & \psi &= f_\psi(q_1, q_2, \dots, q_6) \\ y &= f_y(q_1, q_2, \dots, q_6) & \theta &= f_\theta(q_1, q_2, \dots, q_6) \\ z &= f_z(q_1, q_2, \dots, q_6) & \varphi &= f_\varphi(q_1, q_2, \dots, q_6) \end{aligned}$$

Для малих приростів координат  $\delta q_i \rightarrow 0$  приймається лінійний зв'язок кожної із  $x$ -координат із всіма керованими координатами ( $q_i$ ) [1].

Наприклад для зміщення виконавчого органу (точка D) у напрямку  $x$  маємо лінійну залежність:

$$\delta x = m_{11}\delta q_1 + m_{12}\delta q_2 + m_{13}\delta q_3 + m_{14}\delta q_4 + m_{15}\delta q_5 + m_{16}\delta q_6.$$

Залежність пов'язує прирости керованих координат із зміщенням виконавчого органу робота. Дана залежність визначається різними способами. Загально прийнятим є теоретичний метод встановлення лінійних залежностей. Кожна із  $x$ -координат є функцією шести змінних ( $q$  координат).

Наявна диференціальна залежність для функції шести змінних:

$$dx = \frac{\partial f_x}{\partial q_1} dq_1 + \frac{\partial f_x}{\partial q_2} dq_2 + \dots + \frac{\partial f_x}{\partial q_6} dq_6.$$

Частинні похідні, які входять в дану залежність обчислюються в околиці номінального положення виконавчого органу робота і являють собою постійні величини. Позначивши:

$$m_{11} = \frac{\partial f_x}{\partial q_1}, \quad m_{12} = \frac{\partial f_x}{\partial q_2}, \dots, \quad m_{16} = \frac{\partial f_x}{\partial q_6}.$$

одержимо диференціальну залежність:

$$dx = m_{11}dq_1 + m_{12}dq_2 + \dots + m_{16}dq_6,$$

або в скороченому вигляді:

$$dx = \sum_{j=1}^6 m_{1j}dq_j.$$

Аналогічні залежності маємо для інших координат, що визначають положення виконавчого органу:

$$dy = \sum_{j=1}^6 m_{2j}dq_j, \quad dz = \sum_{j=1}^6 m_{3j}dq_j, \quad d\psi = \sum_{j=1}^6 m_{4j}dq_j, \quad d\theta = \sum_{j=1}^6 m_{5j}dq_j, \\ d\phi = \sum_{j=1}^6 m_{6j}dq_j.$$

Перейдемо в даних формулах від диференціалів до приростів координат:

$$dx \rightarrow \delta x, \quad dy \rightarrow \delta y, \dots, \quad dq_1 \rightarrow \delta q_1, \quad dq_2 \rightarrow \delta q_2, \dots$$

Одержимо матрично-векторну залежність:

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta \psi \\ \delta \theta \\ \delta \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{16} \\ m_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ m_{61} & & & m_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta q_1 \\ \delta q_2 \\ \mathbf{M} \\ \delta q_6 \end{bmatrix}.$$

В скороченому вигляді:

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

Квадратна матриця  $(m_{ij})$  є матрицею Якобі [9, 90] і пов'язує прирости керованих координат  $\delta q_j$  із приростами вихідних координат  $\delta x, \delta y, \dots$

Для невеликих змін координат можна вважати відхилення рівними приростам відповідних координат:

$$\delta x_i = \Delta x_i, \quad \delta q_j = \Delta q_j.$$

При цьому:

$$(\Delta x_i) = (m_{ij}) \cdot (\Delta q_j).$$

Наведені залежності пов'язують невеликі зміни координат між собою і характеризують мікропереміщення в рухомій системі маніпулятора промислового робота.

Матриця Якобі є основною кількісною характеристикою керованості промислового робота та мірою чутливості його системи керування і приводів. Дослідження мікропереміщень маніпулятора має практично важливе значення для

оцінки точності робота. Як правило, точність промислового робота визначається похибкою позиціонування його виконавчого органу і залежить від похибок приводів при відпрацюванні заданих значень узагальнених координат, а також програмування та навчання роботів. Програмні значення координат теоретично забезпечують виведення робочого органу маніпулятора мобільного робота в задане положення, але практично відтворюються системами керування з деякими похибками. Тому реальне положення робочого органу відрізняється від запрограмованого. При цьому мають місце геометрична, кінематична, статична деформаційна та динамічні похибки.

Для характеристики точності відпрацювання керованих координат введемо вектор похибок  $q$ -координат у вигляді їх відхилення від номінального (нульового) значення:

$$(\Delta q_j) = \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \\ \Delta q_5 \\ \Delta q_6 \end{bmatrix}.$$

Тоді похибки положення виконавчого органу (об'єкт маніпулювання D) будуть визначені вектором:

$$(\Delta x_i) = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \theta \\ \Delta \psi \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}.$$

Вектори похибок, як малі величини, зв'язані між собою через матрицю Якобі  $(m_{ij})$  згідно матрично-векторної залежності:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \psi \\ \Delta \theta \\ \Delta \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} & m_{26} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} & m_{35} & m_{36} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} & m_{45} & m_{46} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} & m_{54} & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_4 \\ \Delta q_5 \\ \Delta q_6 \end{bmatrix}$$

Таким чином матриця Якобі встановлює зв'язок похибок керованих координат робота

$$\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_6$$

із похибками координат виконавчого органу

$$\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \varphi.$$

Дані співвідношення є основою визначення і аналізу точнісних характеристик приводів промислових роботів.

## РОЗДІЛ 9

## Статика наземних роботизованих комплексів

## 9.1. Статичні навантаження переміщення шасі наземних роботизованих комплексів

Статичні характеристики наземних роботизованих комплексів (мобільних роботів) визначають їх прохідність та функціональні можливості. Статичні характеристики мобільних промислових роботів визначаються розподілом масо-жорсткісних параметрів, місцем і характером статичних навантажень та умовами розміщення маніпулятора на рухомій основі маніпулятора (шасі).

Як правило, конструктивне виконання шасі залежить від виду і характеру статичних навантажень на маніпулятор. На маніпулятор мобільного робота діють гравітаційні навантаження та корисні навантаження, обумовлені виконанням різноманітних робіт відповідних функціональному призначенню робота. Маса окремих вузлів маніпулятора має порядок, відповідний масі ходової частини (шасі). При цьому розподіл окремих мас в просторі змінюється в широких межах, а область розташування центра мас мобільного робота є достатньо протяжною.

За характером розподілу масо-жорсткісних параметрів роботизовані комплекси розподіляються на дві групи: з компактно розміщеною масою та із масою розподіленою по окремим вузлам (рис. 9.1 ).

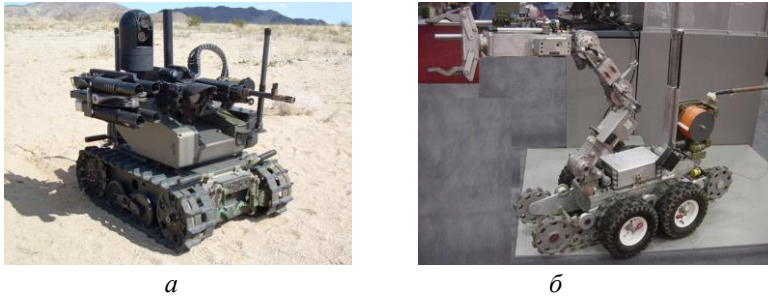


Рис. 9.1. Представники двох груп мобільних роботизованих комплексів: а – із компактно розміщеною масою; б – із масою розподіленою по окремим вузлам

Виконано аналіз комплексів по групам з точки зору розподілу мас та пружно-деформованих зв'язків між ними.

Основна маса роботизованого комплексу із компактно розміщеною масою зосереджена в центрі мас шасі (точка О) (рис. 9.2).

Маса маніпулятора  $m_k$  набагато менша маси шасі  $m_n$ . Тому переміщення рухомих частин мало впливають на розподіл мас і зміни поперечно-кутового положення комплексу, що характеризується кутом  $\theta$  є незначними.

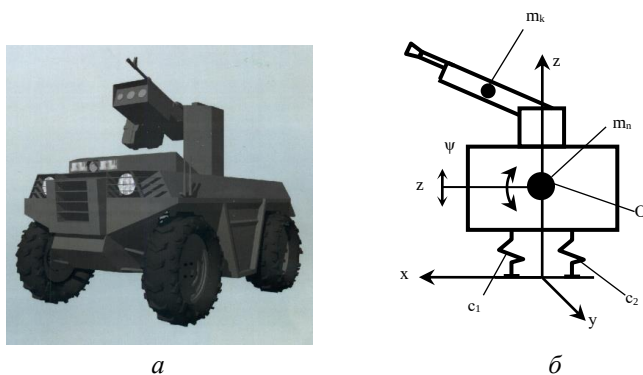


Рис. 9.2. Загальний вигляд (а) комплексу із компактно розміщеною масою та схема розподілу мас (б)

Комплекси із масою розподіленою по окремим вузлам змінюють положення центра мас в процесі свого функціонування.

Розглянемо комплекс маси вузлів якого мають близькі значення (рис. 9.3).

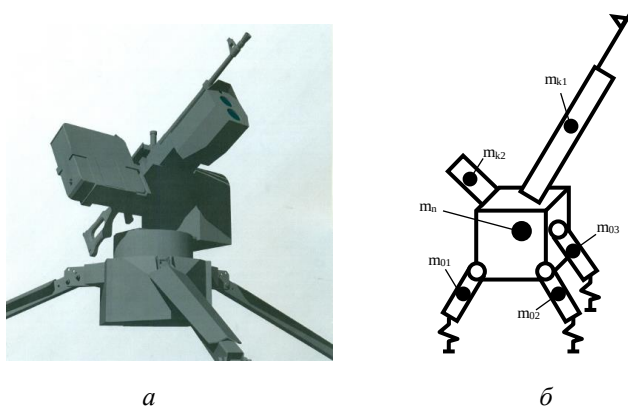


Рис. 9.3. Роботизований комплекс, вузли якого мають близькі по величині маси: а - загальний вигляд; б – схема розміщення мас окремих вузлів комплексу

В процесі роботи комплексу маса  $m_{k1}$  переміщується, а маса  $m_{k2}$  змінюється. Зміни величини мас і їх положення є незначними, тому центр мас та статичне навантаження на роботизований комплекс змінюється незначним чином.

Суттєво інша ситуація має місце в роботизованому комплексі, маса якого розподілена по окремим вузлам. В основному масивними вузлами є елементи маніпулятора та робочі органи комплексу.

Комплекс (рис. 9.4 а) включає наступні основні масивні вузли: платформу 1 на гусеничному шасі, модуль 2, консольно розташовану стійку 3.

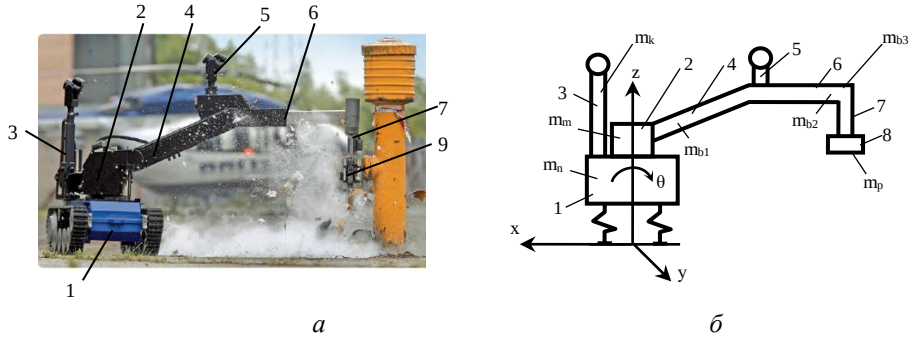


Рис. 9.4. Загальний вигляд мобільного робота із масою розподіленою по окремим вузлам (а) та схема розподілу мас основних вузлів робота (б)

Загальна маса в даній конструкції робота розподілена по окремим вузлам маніпулятора. Маніпулятор комплексу має важелі 4 та 6. На маніпуляторі консольно розташований модуль спостереження 5. Робочий орган маніпулятора включає приводи 7 та робочий модуль 8. Кожен вузол має відповідну масу  $m_n, m_m, \dots, m_p$ . При зміні геометрії маніпулятора має місце значний перерозподіл мас в просторі та суттєва зміна положення центра мас. Це приводить до значного поперечно-кутового переміщення шасі на кут  $\theta$ . Можлива втрата стійкості комплексу.

Маніпулятори мобільних роботів мають значний робочий простір. При певних корисних навантаженнях на маніпулятор можлива втрата стійкості.

В окремих випадках проблеми статичної рівноваги мобільного робота вирішуються спеціальною конструкцією шасі (рис. 9.5).

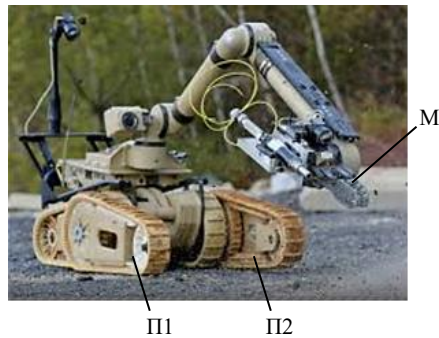


Рис. 9.5. Мобільний робот із суттєво змінним положенням центра мас

Шасі має додаткові гусеничні ділянки П1 та П2, які забезпечують рівновагу мобільного робота при великих вильотах маніпулятора М.

Шасі мобільного робота часто має пружне з'єднання окремих частин. Зміна положення маніпулятора при цьому приводить до переміщення окремих частин шасі (рис. 9.6).



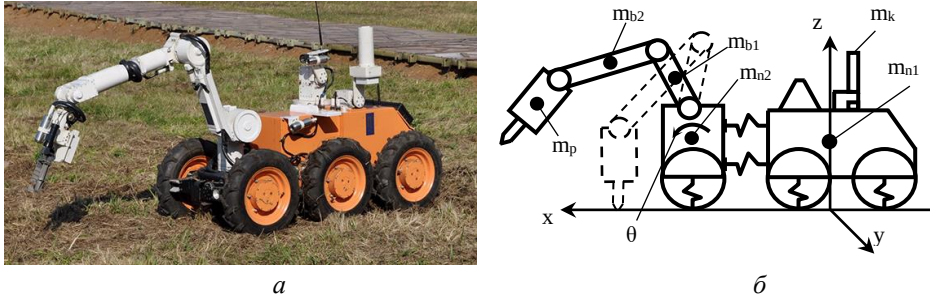


Рис. 9.6. Мобільний роботизований комплекс із пружно-з'єднаними частинами шасі: а – загальний вигляд; б – схема розподілу мас та деформації шасі комплексу при дії гравітаційних сил

Для визначення силових факторів обумовлених дією гравітаційного навантаження розглядають задачу статки робота із врахуванням гравітаційних навантажень [145]. Дана задача ілюструється на прикладі спрощеної конструктивної схеми мобільного робота (рис. 9.7).

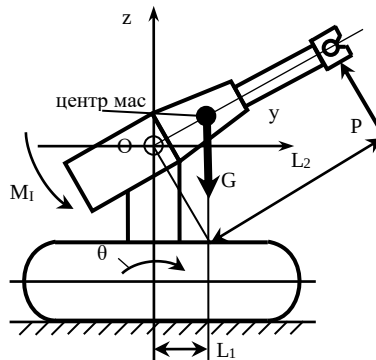


Рис. 9.7. Спрощена схема дії гравітаційних та корисних навантажень на мобільний робот

Згідно наведеної схеми на мобільний промисловий робот діють: корисне навантаження  $P$ ; гравітаційна сила  $G$ . Задача статки розв'язується на основі умов рівноваги. згідно якої сума моментів сил відносно точки  $O$  дорівнює нулю.

Відповідно момент  $M_{\Pi}$  привода робота:

$$M_{\Pi} = G \cdot L_1 + P \cdot L_2 \cdot \cos \theta,$$

де  $L_1$  - плече дії гравітаційної сили;  $L_2$  – плече дії корисного навантаження.

Даний крутний момент сприймається шасі робота, яке знаходиться на нерухомій основі. Це приводить до повороту шасі на деякий кут  $\theta$ . Для масивних маніпуляторів складної конструкції при розв'язку задачі статки враховуються гравітаційні сили, що діють на окремі вузли маніпулятора та розташування центрів мас основних вузлів (рис. 9.8).



$$\sum_{j=1}^4 R_j \cdot y_j = M_x, \quad \sum_{j=1}^4 R_j \cdot x_j = M_y, \quad \sum_{j=1}^4 R_j = \sum_{i=0}^N G_i + F_z.$$

Одержана система рівнянь статики є незамкненою. В три рівняння рівноваги входить чотири невідомих  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Для замикання системи рівнянь необхідно ввести додаткову умову. В певних випадках використовується припущення про опирання шасі на три точки. При цьому одна із реакцій  $R_{j0} = 0$ . Більш загальною умовою є умова планарності (недеформованості) шасі. Введення даної умови розглянуто нижче.

Статика мобільного роботизованого комплексу відповідає режиму його повільного руху, коли всі похідні координат змінюються мало і можна прийняти:

$$\frac{d}{dt} = 0.$$

Обґрунтована статична модель комплексу у вигляді твердих тіл із пружними зв'язками. Основою статичної моделі є подання шасі, що має підвіску та знаходиться на нерівному ґрунті у вигляді твердого тіла (платформи), положення якого змінюється в просторі. Шасі взаємодіє з ґрунтом різноманітним чином з виникненням силових факторів (опорних реакцій  $R_j$ ) (рис. 9.9).

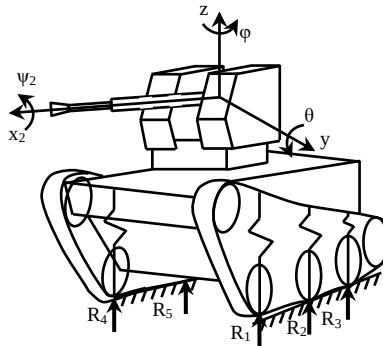


Рис. 9.9. Взаємодія шасі роботизованого комплексу з ґрунтом із виникненням опорних реакцій

Не знижуючи ступінь узагальнення розглянемо роботизований комплекс із компактно розподіленими масами та відповідні статичні навантаження на нього (рис. 9.10).

Якщо комплекс розташований на нерівній основі, то виникає змінна системи реакцій  $R_1, R_2, \dots$ , яка залежить від статичних навантажень на комплекс та від нерівностей основи.

Шасі має жорстку конструкцію. Подамо його у вигляді плоскої платформи прямокутної форми із вершинами  $P_1 P_2 P_3 P_4$ .

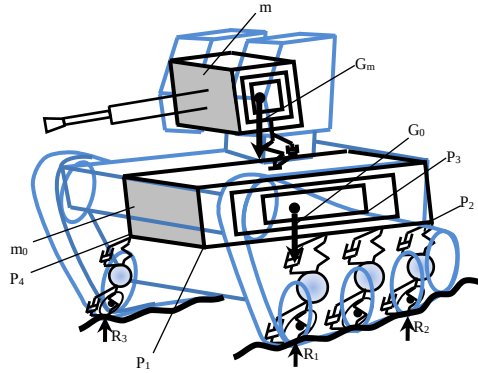


Рис. 9.10. Розподіл мас та відповідних статичних навантажень у комплексі з компактно розташованими масами

Платформа являє собою жорстку конструкцію. Тому відносне положення точок  $P_1, \dots, P_n$  не змінюються в процесі руху. Прийнято, що ці точки знаходяться в одній площині (рис. 9.11).

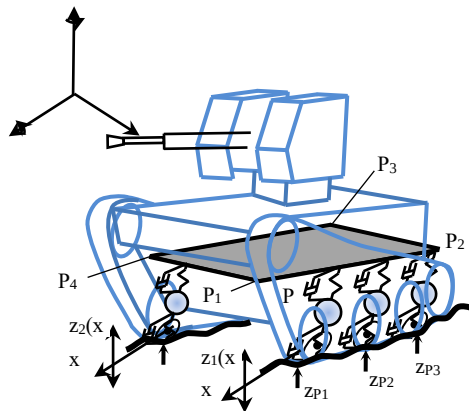


Рис. 9.11. Базове самохідне шасі подане у вигляді жорсткого прямокутника  $P_1 P_2 P_3 P_4$  та схема його переміщення по коліям з нерівностями визначеними в залежності від координат  $x_1$  та  $x_2$

Прямокутник  $P_1 P_2 P_3 P_4$  змінює своє положення, а відповідно змінюються внаслідок перекосу його зв'язки з основними вузлами комплексу. Положення базового прямокутника змінюється в межах малих переміщень (мікропереміщень) платформи внаслідок зміни вертикальних координат областей контакту поверхні гусениці з дорогою.

Приймемо, що точки контакту гусениці з дорогою є незмінними і відповідають розташуванню катків (коліс), на які опирається шасі. В залежності від конструкції гусеничної або колісної платформи має місце різне число точок опирання шасі на

грунт. Мінімальне число точок опирання шасі на грунт складає  $n=3$ . Для шестиколісного  $n=6$ . При наявності 8 чи 10 коліс  $n=8$  або 10.

Зафіксуємо серед всіх точок опирання шасі ( $n=3, 4, 6, 8, 10$ ) три точки по яких вводиться площина відліку положення платформи. Три точки прийняті за базові з координатами  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $P_3(x_3, y_3, z_3)$ .

Введені три точки відповідні триколісному транспортному засобу. Центр системи координат приймемо в центрі мас платформи  $C$ . Варіанти при виді зверху транспортних засобів із різним числом точок контакту включають триколісні, чотириколісні, шести та восьми колісні платформи (рис. 9.12).

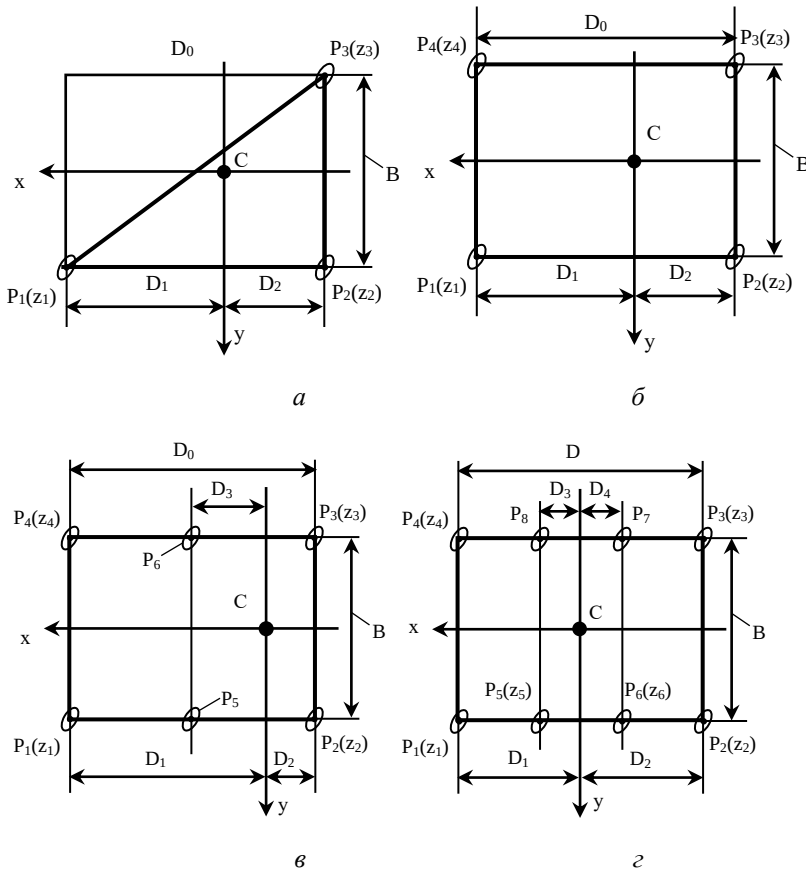


Рис. 9.12. Варіанти ходових частин шасі з різним числом коліс (точок опирання гусениці на грунт): а - триколісна; б – чотириколісна; в – шестиколісна ; г – восьмиколісна

Задачу визначення просторового положення платформи при переміщенні платформи по нерівній поверхні розглянемо для типового шестиколісного варіанта платформи.

Платформа являє собою жорстку конструкцію. Тому закріплення точок опирання підвісок  $P_1, \dots, P_6$ , не змінюються в процесі руху. Прийнято, що ці точки знаходяться в одній площині (рис. 9.13).

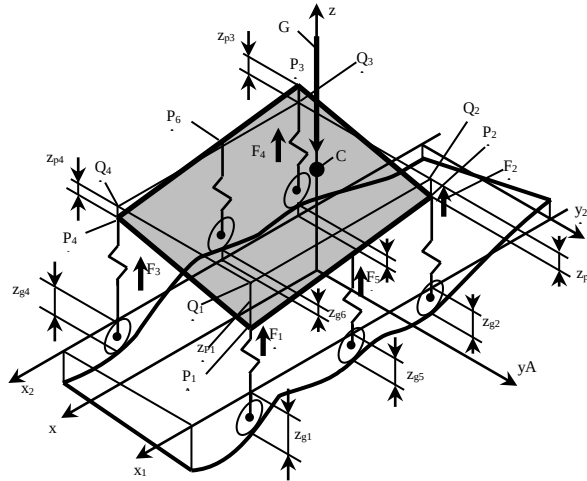


Рис. 7.13. Принципова схема зміни положення платформи шестиколісного шасі при переміщенні комплексу по дорозі з нерівностями

Для опису переміщення платформи приймемо, що всі точки контакту підвісок із платформою ( $i=1,2,\dots,6$ ) лежать в одній площині. Введемо базову горизонтальну площину, яка визначає ідеалізовану плоску поверхню по якій рухається платформа. Дана площина паралельна координатній площині  $oxy$  і зображена графічно прямокутником  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ .

Встановлення співвідношення між координатами точок  $P_1, \dots, P_6$ , які знаходяться у одній площині проведено на основі розгляду просторового переміщення прямокутника  $P_1P_2P_3P_4$  (рис 9.14).

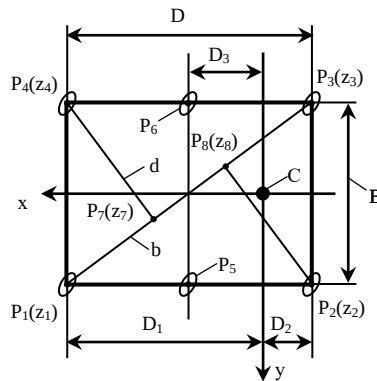


Рис. 9.14. Геометричні співвідношення при зміні просторового положення шестиколісної платформи

Координати вертикального переміщення  $z_1$  та  $z_2$  точок  $P_1$  та  $P_3$  визначають положення діагоналі прямокутника при просторовому його переміщенні в напрямку  $z$  перпендикулярному площині рисунка.

Із геометричних співвідношень для трикутників  $P_1P_4P_7$  та  $P_1P_2P_4$  випливає:

$$b = \frac{B^2}{\sqrt{D^2 + B^2}}, \quad d = \frac{D \cdot B}{\sqrt{D^2 + B^2}}.$$

Визначимо координати  $z_7$  та  $z_8$  точок  $P_7$  і  $P_8$ , що знаходяться на діагоналі  $P_1P_3$  прямокутника  $P_1P_2P_3P_4$ .

Координата  $z_7$  точки  $P_7$ :

$$z_7 = z_1 + \frac{(z_3 - z_1)B^2}{(D^2 + B^2)}.$$

Координата  $z_8$  точки  $P_8$ :

$$z_8 = z_1 + \frac{(z_3 - z_1)}{\sqrt{D^2 + B^2}} \left[ \sqrt{D^2 + B^2} - \frac{B^2}{\sqrt{D^2 + B^2}} \right] = z_1 + \frac{(z_3 - z_1)D^2}{(D^2 + B^2)}.$$

Співвідношення координат точок  $P_4$  та  $P_2$ ,  $P_7$ ,  $P_8$  визначається на основі розгляду повороту прямокутника  $P_1P_2P_3P_4$  відносно діагоналі  $P_1P_3$ . Радіуси повороту точок  $P_4$  і  $P_2$  відносно діагоналі є однаковими. Тому маємо співвідношення між  $z$  координатами точок  $P_4$  і  $P_2$  у вигляді:

$$z_4 = z_7 - (z_2 - z_8).$$

Після підстановки координат  $z_7$  та  $z_8$  одержимо основне геометричне співвідношення між координатами точок  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , яке відображає наявність цих точок в одній площині і має вигляд:

$$z_1 + z_3 - z_2 - z_4 = 0.$$

Дане співвідношення має місце як в статичній, так і в динамічній і встановлює умову знаходження 4-х точок  $P_1, \dots, P_4$  в одній площині.

Для шестиколісної платформи додаються додаткові умови знаходження точок  $P_5$  і  $P_6$  в одній площині. Дані умови знаходяться із врахуванням того, що точка  $P_5$  знаходиться на лінії  $P_1P_2$ , а точка  $P_6$  на лінії  $P_4P_3$ .

Умова знаходження точки  $P_5$  на лінії  $P_1P_2$ :

$$z_5 = z_1 + (z_2 - z_1)D_3 / D.$$

Після перетворень одержимо відповідно зв'язок координат точок:

$$z_5 = (1 - D_3 / D)z_1 + z_2 D_3 / D.$$

Аналогічним чином одержана умова знаходження точки  $P_6$  на лінії  $P_4P_3$ :

$$z_6 = (1 - D_3 / D)z_4 + z_3 D_3 / D.$$

Встановлені співвідношення мають місце як в статичних, так і в динамічних режимах зміни положення платформи.

Аналогічним чином може бути визначена умова знаходження точок в одній площині для 8-колісної та 10-колісної платформи.

На основі наведених співвідношень формуються умови знаходження точок платформи для гусеничного рушія, в якому кількість точок опирання та їх положення змінюються в процесі переміщення шасі.

На основі наведених співвідношень визначаються опорні реакції в підвісках окремих коліс при переміщенні шасі по нерівній дорозі.

Реакції в підвісках для кожного колеса будуть залежати від положення точок платформи  $z_{pi}$ ,  $i=1,2,3,\dots$  та від вертикального зміщення точок контакту коліс із нерівностями дороги  $z_{gi}$ ,  $i=1,2,3,\dots$  (див. рис. 9.13).

Розглянемо задачу статички. В залежності від нерівностей дороги при повільному русі визначимо поперечно-кутові переміщення платформи із площини та її вертикальні переміщення.

Складемо рівняння, що визначають умови статичної рівноваги платформи. Для цього розглянемо паралельну систему сил, які діють на платформу (рис. 9.15).

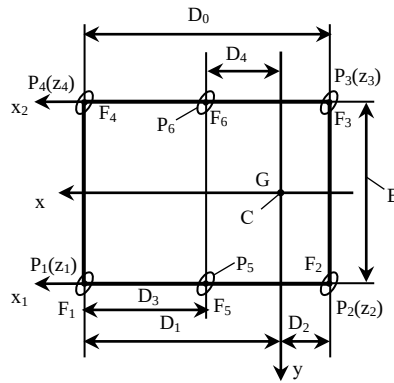


Рис. 9.15. Геометрична схема точок прикладення сил до підвісок шасі мобільного комплексу та позначення вертикальних сил

Сили реакції підвісок коліс позначені через  $F_i$ ,  $i=1,2,3,\dots,6$ . Гравітаційна сила  $G$  прикладена в центрі мас платформи (в точці  $C$ ).

Використаємо умови рівноваги системи паралельних сил, що діють на платформу в напрямку вісі  $z$ .

Сума проекцій сил на вертикальну вісь  $z$ :

$$F_1 + F_2 + \dots + F_6 = G.$$

Дана умова статички не є раціональною і служить лише для перевірки.

Сума моментів сил відносно вісі  $x_1$ :

$$(F_4 + F_6 + F_3) = G/2. \quad (9.1)$$

Сума моментів сил відносно вісі  $x_2$ :

$$(F_1 + F_5 + F_2) = G/2. \quad (9.2)$$

Сума моментів сил відносно вісі, що проходить через точки  $P_5P_6$ :

$$(F_1 + F_4)D_3 = GD_4 - (F_2 + F_3)(D_0 - D_3).$$

Після перетворень одержимо:



$$F_1 + F_4 + (F_2 + F_3) \left( \frac{D_0}{D_3} - 1 \right) = G \frac{D_4}{D_3}, \quad (9.3)$$

Сили, які входять в дані рівняння визначаються через відносні переміщення точок шасі  $P_i$  та дорожніх нерівностей:

$$F_i = c(z_{gi} - z_{pi}), \quad i = 1, \dots, 6,$$

де  $c$  – еквівалентна жорсткість підвіски окремого опорного елемента (колеса);  $z_{gi}$  – висота нерівності дороги;  $z_{pi}$  – переміщення шасі в точці  $P_i$ .

Підставимо дані значення сил в рівняння (9.1)-(9.3):

$$cz_{g4} - cz_{p4} + cz_{g6} - cz_{p6} + cz_{g3} - cz_{p3} = G/2, \quad (9.4)$$

$$cz_{g1} - cz_{p1} + cz_{g5} - cz_{p5} + cz_{g2} - cz_{p2} = G/2, \quad (9.5)$$

$$cz_{g1} - cz_{p1} + cz_{g4} - cz_{p4} + cz_{g2} \left( \frac{D_0}{D_3} - 1 \right) - \\ - cz_{p2} \left( \frac{D_0}{D_3} - 1 \right) + cz_{g3} \left( \frac{D_0}{D_3} - 1 \right) - cz_{p3} \left( \frac{D_0}{D_3} - 1 \right) = G \frac{D_4}{D_3} \quad (9.6)$$

До трьох даних рівнянь додаються умови знаходження точок шасі в одній площині:

$$z_{p1} + z_{p3} - z_{p2} - z_{p4} = 0, \quad (9.7)$$

$$z_{p5} = \left( 1 - \frac{D_3}{D} \right) z_{p1} + \frac{D_3}{D} z_{p2}, \quad (9.8)$$

$$z_{p6} = \left( 1 - \frac{D_3}{D} \right) z_{p4} + \frac{D_3}{D} z_{p3}. \quad (9.9)$$

Підставимо  $z_5$  з рівняння (9.8) у рівняння (9.5), а  $z_{p6}$  із рівняння (9.9) у рівняння (9.4) і розділимо рівняння (9.5) і (9.6) на  $c$ :

$$z_{g4} - z_{p4} + z_{g6} - \left( 1 - \frac{D_3}{D} \right) z_{p4} - \frac{D_3}{D} z_{p3} + z_{g3} - z_{p3} = \frac{G}{2c},$$

$$z_{g1} - z_{p1} + z_{g5} - \left( 1 - \frac{D_3}{D} \right) z_{p1} - \left( 1 - \frac{D_3}{D} \right) z_{p1} - \frac{D_3}{D} z_{p2} + z_{g2} - z_{p2} = \frac{G}{2c}.$$

Приведемо подібні в даних рівняннях:

$$z_{g4} + z_{g6} + z_{g3} - z_{p4} \left( 2 - \frac{D_3}{D} \right) - z_{p3} \left( \frac{D_3}{D} + 1 \right) = \frac{G}{2c}, \quad (9.10)$$

$$z_{g1} + z_{g5} + z_{g2} - \left( 2 - \frac{D_3}{D} \right) z_{p1} - z_{p2} \left( \frac{D_3}{D} + 1 \right) = \frac{G}{2c}. \quad (9.11)$$

Із рівняння (9.7) визначимо:

$$z_{p4} = z_{p1} + z_{p3} - z_{p2}. \quad (9.12)$$

Підставимо дане значення (9.12) в (9.10) і одержимо:

$$z_{g4} + z_{g6} + z_{g3} + \left(\frac{D_3}{D} - 2\right)z_{p1} + \left(\frac{D_3}{D} - 2\right)z_{p3} - \left(\frac{D_3}{D} - 2\right)z_{p2} - \left(\frac{D_3}{D} + 1\right)z_{p3} = \frac{G}{2c}. \quad (9.13)$$

Приведемо подібні і перетворимо рівняння (7.13):

$$\left(\frac{D_3}{D} - 2\right)z_{p1} + \left(2 - \frac{D_3}{D}\right)z_{p2} - 3z_{p3} = \frac{G}{2c} - z_{g4} - z_{g6} - z_{g3}. \quad (9.14)$$

$$\left(\frac{D_3}{D} - 2\right)z_{p1} - \left(1 + \frac{D_3}{D}\right)z_{p2} = \frac{G}{2c} - z_{g1} - z_{g5} - z_{g2}. \quad (9.15)$$

Відніmemo від рівняння (9.14) рівняння (9.15) і одержимо:

$$z_{p2} - z_{p3} = \frac{1}{3}(z_{g1} + z_{g5} + z_{g2} - z_{g4} - z_{g6} - z_{g3}).$$

Звідси знаходимо:

$$z_{p2} = z_{p3} + \frac{1}{3}(z_{g1} + z_{g5} + z_{g2} - z_{g4} - z_{g6} - z_{g3}). \quad (9.16)$$

Із рівняння (7.14) після підстановки  $z_{p2}$  із залежності (7.16) одержимо:

$$z_{p1} = z_{p3} + \left(1 - \frac{3}{2 - D_2/D}\right)(z_{g1} + z_{g5} + z_{g2} - z_{g4} - z_{g6} - z_{g3}) - \frac{1}{(2 - D_3/D)}(z_{g4} - z_{g6} - z_{g3} - G/(2c)) \quad (9.17)$$

Підставимо значення  $z_{p2}$  і  $z_{p1}$  із (9.16) і (9.17) у рівняння. Перетворимо рівняння (9.6). Одержимо:

$$z_{p1} + \left(2 - \frac{D}{D_3}\right)z_{g2} - \left(\frac{D}{D_3} - 1\right)z_{g3} - \frac{GD_4}{cD_3}. \quad (9.18)$$

Підставимо значення  $z_{p1}$  та  $z_{p2}$  із формул (9.16) і (9.17) і одержимо:

$$z_{p3} = \frac{1}{3}(z_{g4} + z_{g6} + z_{g3} - z_{g1} - z_{g5} - z_{g2}) \left[1 - \frac{3}{(2 - D_2/D)}\right]. \quad (9.19)$$

Залежність (9.19) визначає вертикальну координату однієї з точок платформи (точка  $P_3$ ) в залежності від нерівностей дороги в шести точках, де має місце контакт коліс із дорожнім полотном.

Підставивши значення (9.19) у залежність (9.17) визначимо вертикальне положення точки  $P_1$  платформи. Із залежностей (9.16) та (9.19) знайдемо положення точки  $P_2$ . Об'єднавши залежності (9.12), (9.17), (9.19), (9.16), визначимо положення точки  $P_4$ .

Таким чином положення платформи визначено в залежності від нерівностей дороги в точках контакту коліс із дорожнім покриттям.

просторове положення платформи (шасі) визначає статичні переміщення окремих вузлів роботизованого комплексу. Для комплексу, який подано у вигляді трьох твердих тіл, одним із яких є шасі (платформа), маємо просторову пружно-деформовану систему (рис. 9.16).

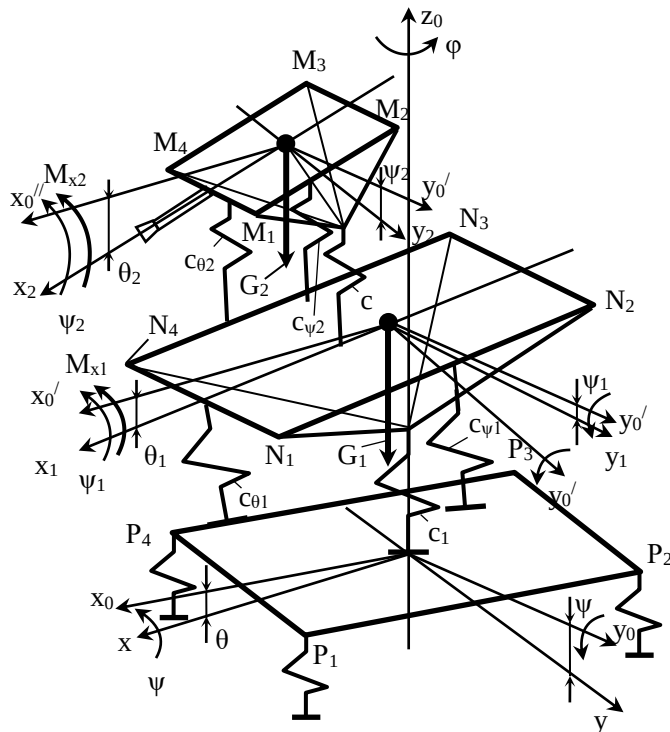


Рис. 9.16. Схема просторових статичних деформацій окремих складових наземного роботизованого комплексу, які подано у вигляді трьох твердих тіл із пружними зв'язками

Для даної просторової системи визначаються взаємні пружні деформації окремих модулів комплексів. Недоліком визначення статичних деформацій у загальному вигляді є недостатня точність. Це обумовлено одночасним розглядом великих деформацій (макродеформацій) та малих деформацій (мікродеформацій). Для розгляду мікродеформацій використовуються лінійні методи на основі матриць жорсткості, які розглянуті в наступному підрозділі.

## 9.2. Статична стійкість шасі наземних роботизованих комплексів

В результаті аналізу літературних джерел зроблено висновок про наявність проблеми у вигляді забезпечення працездатності роботизованого комплексу при невизначених параметрах траєкторії переміщення мобільного робота. Такими особливими ділянками є рух по похилих площинах, уклонах, долаття перешкод тощо. Однією із причин втрати якісних показників маніпуляторів та їх працездатності є недостатня статична стійкість мобільного роботизованого комплексу[145]. Тому

важливою проблемою є забезпечення статичної стійкості наземного роботизованого комплексу.

В процесі досліджень застосовані теоретичні методи на основі розв'язку задач статички механічних систем, методів Монте-Карло та аналітичної геометрії. Теоретичні положення підтверджені шляхом апробації на розробленому і виготовленому дослідному зразку мобільного наземного роботизованого комплексу.

Особливі ділянки траєкторій переміщення мобільного робота відрізняються значною різноманітністю. Прийнята для розгляду ділянка підйому або спуску із змінним уклоном.

Статична рівновага комплексу залежить від конфігурації маніпулятора, гравітаційного навантаження  $G_N$  з боку об'єкта маніпулювання, що знаходиться в схваті маніпулятора та від нахилу дорожнього полотна, на якому розташоване шасі. Умови статичної рівноваги визначаються дією гравітаційних сил  $G_1, \dots, G_4$ ,  $G_N$  та розташуванням загального центра мас із відповідною гравітаційною силою  $G_0$  відносно крайніх точок опирання комплексу на ґрунт. Такими точками є ділянки гусениць під крайніми опорними катками  $P_1, P_2, Q_1, Q_2$  (рис. 9.17).

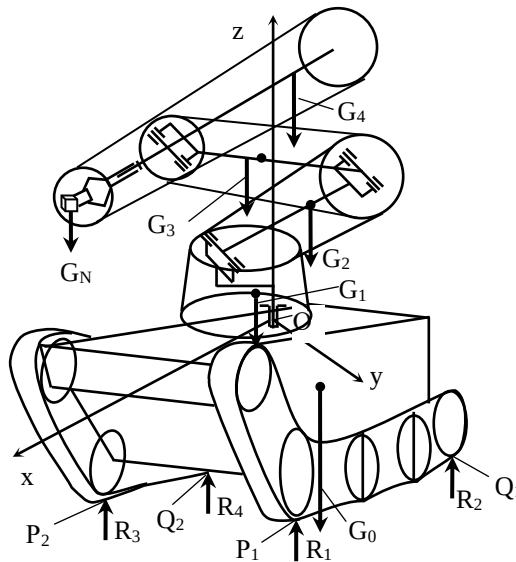


Рис. 9.17. Конфігурація маніпулятора відповідна положенню статичної рівноваги мобільного наземного роботизованого комплексу

Роботизований комплекс знаходиться в статичній рівновазі, якщо проекція центра мас на горизонтальну площину знаходиться в межах чотирикутника  $P_1P_2Q_1Q_2$ .

Зміна конфігурації маніпулятора приводить до зміни положення центра мас комплексу. При видовженні консольної частини маніпулятора в горизонтальній

площині проекція центра мас та відповідна гравітаційна сила  $G_0$  виходить за межі прямокутника  $P_1, P_2, Q_1, Q_2$  (рис. 9.18).

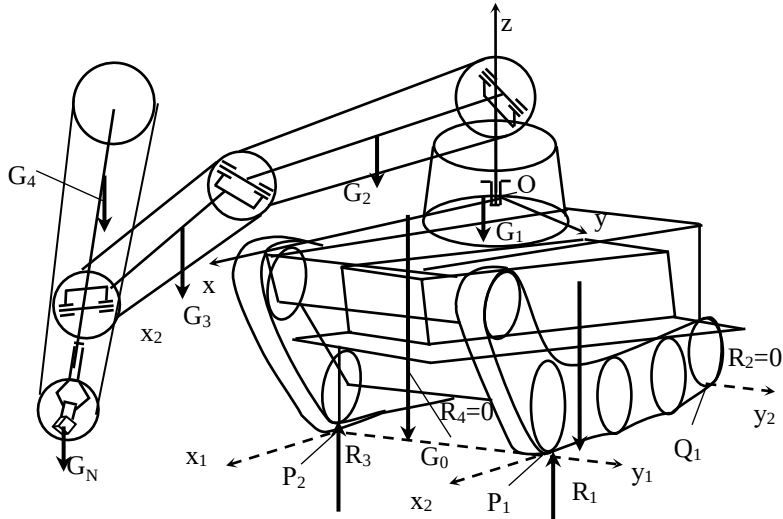


Рис. 9.18. Положення маніпулятора відповідне межі втрати статичної стійкості

Роботизований комплекс втрачає стійкість, коли проекція центра мас комплексу на горизонтальну площину проходить через одну із вісей  $y_1$  чи  $y_2$  або  $x_1$  чи  $x_2$ .

Для аналітичного визначення умови статичної стійкості наземного роботизованого комплексу розглянута задача статички комплексу при дії гравітаційних навантажень.

Для розв'язку задачі статички приймемо, що місця прикладення гравітаційних навантажень, знаходяться в центрах мас вузлів маніпулятора та шасі. При цьому сума моментів гравітаційних сил та сили корисного навантаження, що відповідає гравітаційній силі об'єкта маніпулювання  $G_N$  створюють моменти сил  $M_x, M_y$ , що діють відносно поздовжньої  $x$  та поперечної  $y$  вісей:

$$M_x = \sum_{i=0}^N G_i \cdot y_i + G_N \cdot L_x, \quad M_y = \sum_{i=0}^N G_i \cdot x_i + G_N \cdot L_y. \quad (9.20)$$

де  $y_i$  та  $x_i$  - плечі дії гравітаційних сил  $G_i$  відносно вісей  $x$  і  $y$ ,  $L_x, L_y$  - плечі дії корисного навантаження відносно вісей  $x$  і  $y$ ;  $N$  – загальне число виділених вузлів роботизованого комплексу, на які діють гравітаційні сили,  $G_N$  – гравітаційна сила, яка діє на об'єкт маніпулювання.

Плечі дії гравітаційних сил  $x_i$  та  $y_i$  змінюються внаслідок зміни конфігурації маніпулятора. При цьому будуть змінюватись моменти сил відносно введених вісей. Втрата статичної стійкості комплексу має місце при виконанні однієї з умов:

$$M_{x1} = 0, \quad M_{x2} = 0, \quad M_{y1} = 0, \quad M_{y2} = 0, \quad (9.21)$$

де моменти визначені відносно вісей  $x_1, x_2, y_1, y_2$ ,

Зміни положення центра мас роботизованого комплексу приводять до зміни еквівалентних опорних реакцій шасі, які визначені у вигляді чотирьох сил, що діють на крайні катки гусениці  $R_1, R_2, R_3, R_4$ .

Для знаходження еквівалентних опорних реакцій шасі маємо рівняння статки:

$$\sum_{j=1}^4 R_j \cdot y_j = M_x, \quad \sum_{j=1}^4 R_j \cdot x_j = M_y, \quad \sum_{j=1}^4 R_j = \sum_{i=0}^N G_i + G_N. \quad (9.22)$$

Одержана система рівнянь статки (9.20), (9.22) є незамкненою. В три рівняння рівноваги входить чотири невідомих  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Для замикання системи рівнянь необхідно ввести додаткову умову. Практично важливою є умова симетрії комплексу відносно поздовжньої або поперечної площини.

Дана умова виконується для маніпулятора роботизованого комплексу важелі якого переміщуються в близьких паралельних площинах. Розглянемо кінематичну схему маніпулятора, встановленого на шасі (рис. 9.19).

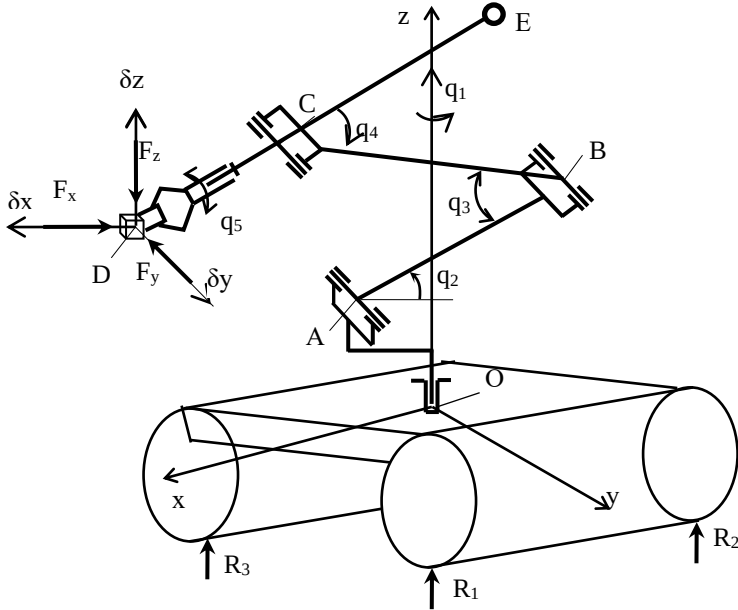


Рис. 9.19. Кінематична схема маніпулятора встановленого на шасі

Кінематична схема відповідає наземному роботизованому комплексу. Шарніри A, B і C даного маніпулятора мають паралельні осі, а важелі AB, BC і штанга CDE рухаються в близьких паралельних площинах (див. рис. 9.19). Маніпулятори встановлені на поворотному кронштейні АО з можливістю повороту відносно осі z на кут  $q_1$ . При цьому важелі переміщуються в площинах, які близькі до радіальної

відносно вісі  $z$  площини, а їх положення задається керованими кутовими координатами  $q_2, q_3, q_4$ . Поворот схвата визначається кутом  $q_5$ .

При зміні конфігурації маніпулятора з вантажем, змінюється розподіл мас, а відповідно змінюється лінія дії гравітаційного навантаження. Для встановлення кількісних характеристик змін дії гравітаційних сил застосована планарна схема маніпулятора, в якому всі важелі переміщуються в одній площині, яка прийнята співпадаючою із віссю симетрії шасі.

Гусеничне шасі має незначну масу, яка порівнянна із масою маніпулятора та масою вантажу. Маса шасі зосередимо в двох точках, які відповідають центрам приводних барабанів гусениці. Розподіл мас по довжині платформи близький до рівномірного. Тому маси  $M_1$  і  $M_2$  є близькими. В масу  $M_1$  включена маса привода маніпулятора.

Введемо систему координат, вісь  $x$  якої проходить через дві зосереджені маси платформи  $M_1M_2$ , а вісь  $z$  через центр мас платформи, що розташований посередині між масами  $M_1$  та  $M_2$ . Для розрахунку положення центра мас прийнято, що маса маніпулятора зосереджена в 5-ти точках. Маса привода розташованого в точці  $A$  з першою частиною маси важеля  $AB=L_2$  віднесена до маси платформи. Маса привода розташованого в точці  $B$ , друга частина важеля  $L_2$  та частина важеля  $BC=L_3$  зосереджена в точці  $B$  і складає  $m_B$ . Маса вантажу, що утримується схватом до якої додана маса схвата, маса привода схвата і привода затиску та частина маси штанги  $DC=L_4$  являє собою зосереджену масу розміщену в точці  $D$  з величиною  $m_D$ . Маса частини важеля  $BC$ , частини штанги  $DC$  та частини штанги  $CE$  з приводами повороту штанги зосереджена в точці  $C$  і складає  $m_C$ . Маса, що розміщена в точці  $E$  включає масу телекамери, приводів переміщення телекамери та частину маси штанги  $CE=L_5$ . Величина маси, зосереджена в даній точці складає  $m_E$ .

Визначимо координати точкових мас  $m_B, m_C, m_D, m_E$  в системі координат  $xz$ .

Координати точки  $B$ :

$$x_B = x_A - L_2 \cos q_2, \quad z_B = z_A + L_2 \sin q_2.$$

Координати точки  $C$ :

$$x_C = x_B + L_3 \cos(q_3 - q_2), \quad z_C = z_B + L_3 \sin(q_3 - q_2),$$

Координати точки  $D$ :

$$x_D = x_C + L_4 \cos(q_4 - q_3 + q_2), \quad z_D = z_C - L_4 \sin(q_4 - q_3 + q_2),$$

Координати точки  $E$ :

$$x_E = x_C - L_5 \cos(q_4 - q_3 + q_2), \quad z_E = z_C + L_5 \sin(q_4 - q_3 + q_2).$$

Визначимо координати центра мас системи «шасі-маніпулятор»:

$$x_{CM} = \frac{m_B x_B + m_C x_C + m_D x_D + m_E x_E}{M_1 + M_2 + m_B + m_C + m_D + m_E}, \quad (9.23)$$

$$z_{CM} = \frac{m_B z_B + m_C z_C + m_D z_D + m_E z_E}{M_1 + M_2 + m_B + m_C + m_D + m_E}, \quad (9.24)$$

Координати центра мас комплексу залежать від керованих координат маніпулятора  $q_2, q_3, q_4$ . Дані координати можуть набувати довільних значень в діапазонах  $[0 \dots \pi]$ . При цьому центр мас рухомого комплексу змінюється і розташовується в певній області простору. Для знаходження області розташування центра мас проведені розрахунки на основі методів Монте-Карло. В формулах (9.23),

(9.24) задані випадкові значення керованих координат  $q_2, q_3, q_4$ . Вони визначені як випадкові числа з рівномірними законами розподілу в діапазонах своїх змін і обчислені відповідно процедури:  $q_{kj} = md(\pi)$ ,  $k=2, 3, 4$ ,  $j=0, \dots, 1000$ . Для кожного  $j$ -го набору керованих координат із (6.4) та (6.5) знайдені координати положення центра мас

Із результатів розрахунків випливає, що область розташування центра мас роботизованого комплексу суттєво збільшується при збільшенні маси об'єкта маніпулювання (рис. 9.20).

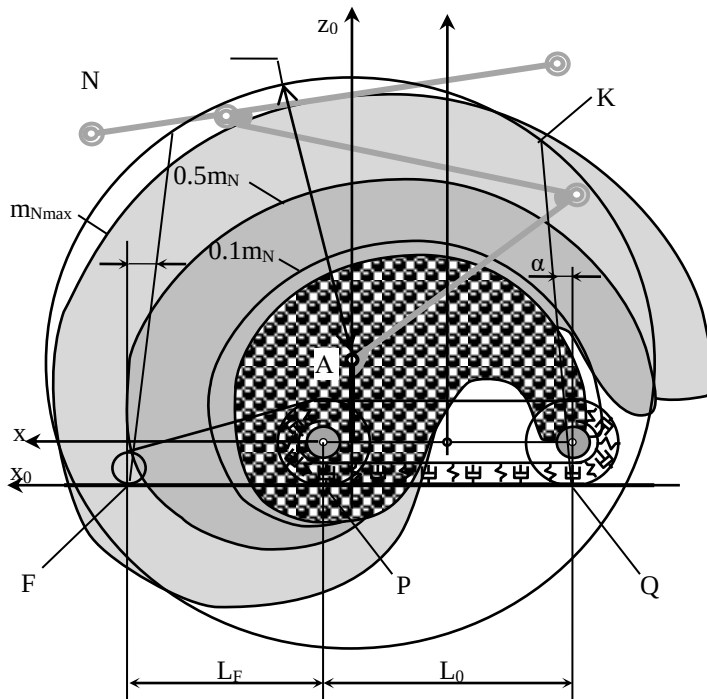


Рис. 9.20. Радіальні перетини областей розташування центрів мас наземного роботизованого комплексу при різних масі об'єкта маніпулювання

Для аналітичного опису області розташування центра мас комплексу області розташування центра мас апроксимовані аналітичними залежностями. Встановлено,



що область розташування центра мас комплексу із максимальною масою об'єкта маніпулювання наближено відповідає колу з радіусом  $r_m$ , центр якого знаходиться в точці А. Контур у вигляді кола є близьким до області розташування центра мас комплексу за виключенням характерної ділянки PQ, що відповідає ділянці між точками опирання гусениць на опорну поверхню.

Рівняння колового контура, що визначає область розташування центра мас в системі координат xz записано у вигляді:

$$(x - x_A)^2 + (z - z_A)^2 = r_m^2,$$

де  $x_A$ ,  $z_A$  - координати точки А, яка відповідає шарніру А маніпулятора;  $r_m$  - радіус кола, що наближено визначає область розташування центрів мас комплексу.

В системі координат, вісь  $x_0$  якої співпадає з опорною поверхнею, а вісь  $z_0$  проходить через точку А, рівняння колового контура набуде вигляду:

$$x_0^2 + (z_0 - z_A - z_c)^2 = r_m^2, \quad (9.25)$$

де  $z_c$  - відстань від опорної поверхні до середньої лінії шасі, що відповідає вісі х.

З використанням одержаної аналітичної залежності (9.25) визначено умови статичної стійкості комплексу, який знаходиться на горизонтальній опорній поверхні.

Умовою стійкості комплексу є знаходження проєкції його центра мас на горизонтальну площину між крайніми точками опирання комплексу на опорну поверхню.

Розглянемо плоску задачу визначення статичної стійкості комплексу з маніпулятором, площина якого співпадає із площиною симетрії шасі.

Для гусеничного рушія крайніми точками опирання є точки Р та Q з координатами:

$$x_P = -L_0 / 2, \quad x_Q = L_0 / 2.$$

Дана умова графічно інтерпретується розташуванням центра мас комплексу в межах полоси між вертикальними лініями, що проходять через точки Р і Q. Із аналізу розміру і розташування даної полоси відносно областей розташування центра мас комплексу впливає, що при маніпулюванні об'єктами в передній частині шасі втрата статичної стійкості може мати місце навіть при відсутності об'єкта маніпулювання. Тобто із значною ймовірністю комплекс буде непрацездатним при підйомі вантажу в передній частині шасі.

Для забезпечення працездатності комплексу застосовані додаткові гусеничні рушії (фліппери). Їх використання зміщує крайню передню точку опирання комплексу в область точки F із координатами:

$$x_F = L_F + L_0 / 2 - x_A,$$

де  $L_F$  - відстань між точкою опирання Р та точкою F взаємодії гусениці фліппера із опорною поверхнею.

При цьому область статичної стійкості розширюється і відповідає полосі між вертикальними лініями, що проходять через точки F і Q. Незначні ділянки статичної

нестійкості за межами полоси є несуттєвими і не впливають радикально на загальну працездатність комплексу.

Наведена вище умова статичної стійкості не враховує деформативність гусеничного шасі.

Розглянемо вплив деформації гусениць на статичну стійкість комплексу. Спочатку розглянемо шасі без фліпперів. При дії гравітаційних сил відбуваються деформації гусениць під опорними катками в точках Р та Q. Якщо центр мас комплексу знаходиться на вісі з платформа шасі без фліпперів під дією гравітаційних сил зміщується вниз не змінюючи свого поперечно-кутового положення (рис. 9.21 а).

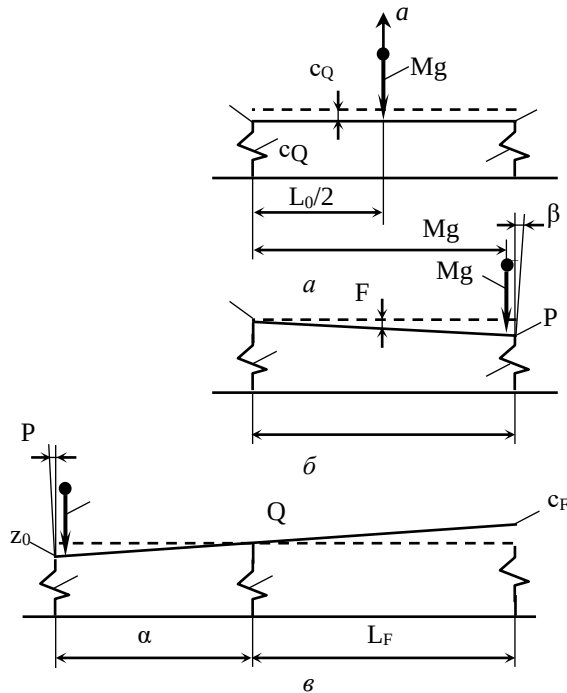


Рис. 9.21. Статичні деформації шасі комплексу під дією гравітаційних сил при різному розташуванні центра мас комплексу: а – плоско-паралельне зміщення шасі при розташуванні центра мас на вісі симетрії комплексу; б – поворот шасі при розташуванні центра мас в області опорної точки Q; в – поворот комплексу при розташуванні центра мас в області кінця фліппера

Переміщення шасі у вертикальному напрямку при симетричному навантаженні визначається залежністю:

$$\Delta z = Mg / (2c_Q),$$

де  $c_Q$  – еквівалентна жорсткість гусениці в точках Р і Q;  $g$  – пришвидження вільного падіння;  $M$  – загальна маса комплексу.

При плоско-паралельному зміщенні шасі область стійкості комплексу не змінюється, а її межі являють собою вертикальні лінії, що проходять через точки Р і Q (для шасі без фліпперів).

При зміщенні центра мас комплексу в напрямку вісі  $x$  зусилля, які сприймає гусениця в точках Р і Q змінюються і відбувається поворот шасі на деякий кут. Максимальний поворот шасі буде мати місце при розташуванні центра мас на вертикальній лінії, яка проходить через точку Р або Q. Кут повороту визначиться відповідно залежності:

$$\alpha = \frac{Mg}{CL_0} . \quad (9.26)$$

Тому вертикальні лінії, що проходять через точки Р і Q і обмежують допустиму область розташування центра мас внаслідок деформативності шасі, будуть повернуті на кут  $\alpha$  в сторону центральної частини комплексу. Повернута лінія буде визначати відрізок QK, який визначає межу допустимих з точки зору стійкості областей розташування центра мас.

Наявність фліпперів змінює характер деформації гусениць. Приймемо, що фліппер жорстко з'єднаний із шасі комплексу і переміщується разом із шасі, як одне ціле.

Зміщення центра мас комплексу в бік фліппера приводить до повороту шасі на деякий кут. Максимальний кут повороту має місце при розташуванні центра мас над крайньою опорною точкою фліпперів (див. рис. 9.21 в). При цьому кут повороту шасі складає:

$$\beta = \frac{Mg}{c_F L_F} , \quad (9.27)$$

де  $L_F$  - відстань між опорними точками фліппера і гусениці;  $c_F$  - жорсткість фліппера.

При цьому вертикальна лінія, яка проходить через точку F і обмежує допустиму область розташування центра мас, повертається на кут  $\beta$  (див. рис. 9.21). Таким чином наявність поперечно-кутових переміщень шасі внаслідок деформації гусениць звужує допустиму область розташування центра мас комплексу. Вона обмежується контуром QKNF.

На ділянці KN контур відповідає дузі кола рівняння якого наведено вище. На ділянках FN та QK контур описується прямими лініями з рівняннями:

$$z_{FN} = \left( x_0 + \frac{L_0}{2} - x_A + L_F \right) \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) ,$$

$$z_{QK} = - \left( x_0 - \frac{L_0}{2} - x_A \right) \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) .$$

Після перетворення тригонометричних функцій і підстановки кутів із (9.26) та (9.27), одержимо:

$$z_{FN} = \left( x_0 + \frac{L_0}{2} - x_A + L_F \right) \cdot \frac{c_F L_F}{M \cdot g} , \quad (9.28)$$

$$z_{QK} = -\left(x_0 - \frac{L_0}{2} - x_A\right) \cdot \frac{CL_0}{M \cdot g}, \quad (9.29)$$

В даних формулах прийнято, що кути  $\alpha$  і  $\beta$  є малими, а відповідно  $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$ ,  $\operatorname{tg} \beta \approx \beta$ .

Розглянуті раніше умови статичної рівноваги були введені для комплексу, який розташовувався на горизонтальній поверхні. Наявність схилу або підйому опорної поверхні шасі змінює умови рівноваги комплексу.

При наявності схилу з кутом  $\theta$  точки F опори фліппера та гусениці Q із положення FQ (при  $\theta=0$ ) зміщуються і опорна поверхня шасі переходить в положення F'Q' (рис. 9.22).

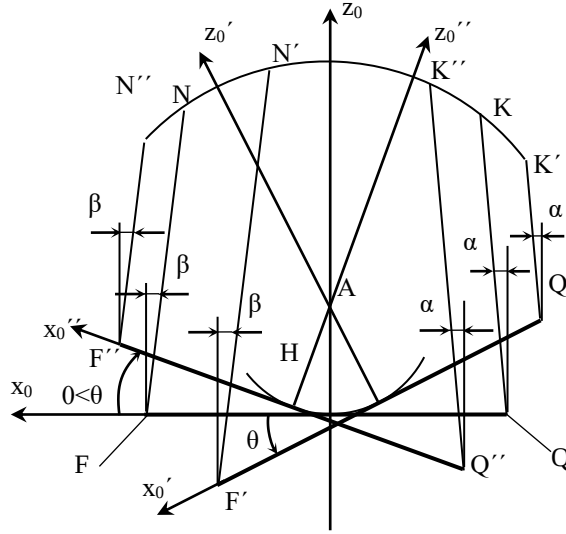


Рис. 9.22. Зміни допустимої області розташування центра мас комплексу обумовлені наявністю схилу ( $\theta > 0$ ) або підйому ( $\theta < 0$ ) опорної поверхні

При цьому горизонтальна вісь  $x_0$  локальної системи координат комплексу переходить у вісь  $x'_0$ , а вісь  $z_0$  у вісь  $z'_0$ . Допустима область розташування центра мас комплексу при цьому зміщується вправо і обмежується контуром Q'K'N'F'. В локальній системі координат комплексу  $x'_0z'_0$  даний контур описується залежностями подібними до (9.28) та (9.29), які використані для визначення області комплексу, що знаходиться на горизонтальній площині. При цьому на ділянці K'N' контур відповідає дузі кола, відповідному рівнянню (6.5). Рівняння прямих K'N' та Q'K' відповідні (9.27) і (9.28) будуть змінені внаслідок зміни кутових коефіцієнтів даних прямих.

При цьому в рівняннях кут  $\beta$  змінюється на кут  $\theta + \beta$ , а кут  $\alpha$  на  $\alpha - \theta$ . Відповідно рівняння прямих F'N' та Q'K' в локальній системі координат визначаються залежностями:

$$z'_{FN} = \left( x'_0 + \frac{L_0}{2} - x_A + L_F \right) \cdot \operatorname{ctg} \left( \theta + \frac{M \cdot g}{C_F L_F} \right), \quad (9.30)$$

$$z'_{QK} = \left( x'_0 - \frac{L_0}{2} - x_A \right) \cdot \operatorname{ctg} \left( \theta - \frac{M \cdot g}{C L_0} \right), \quad (9.31)$$

В останній залежності врахована непарність тригонометричної функції котангенс.

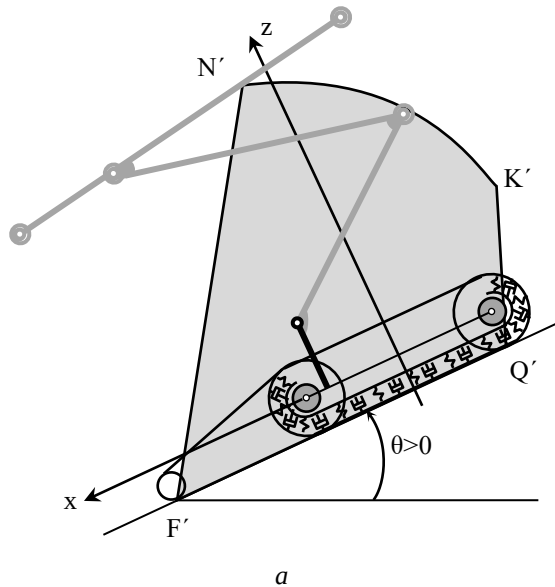
При переміщенні комплексу вгору (підйоми  $\theta < 0$ ) положення локальної системи координат змінюється на  $x''_0 z''_0$ . Область допустимих з умови статичної стійкості положень центра мас комплексу обмежується контуром  $Q''K''N''F''$ . Для ділянки  $K''N''$  контур відповідає дузі кола, а на ділянках  $F''N''$  та  $Q''K''$  буде описаний залежностями (9.30) та (9.31), в яких  $\theta < 0$ .

Переміщення комплексу по схилу вниз або навпаки підйому суттєво змінює допустиму область розташування центра мас.

При переміщенні по схилу вниз допустима область зміщується в напрямку задньої частини комплексу, а при підйомі в передню частину комплексу (рис. 9.23).

Із аналізу допустимих областей розташування центрів мас комплексу випливає, що виконання робіт з об'єктами підвищеної маси доцільно проводити в передній частині шасі між фліпперами при розташуванні комплексу на схилі при його орієнтації в напрямку вершини.

Для підвищення запасу стійкості при роботі із важкими об'єктами рекомендується підйом шасі на фліпперах із забезпеченням від'ємного кута нахилу шасі (показано пунктиром на рис. 9.23 б).



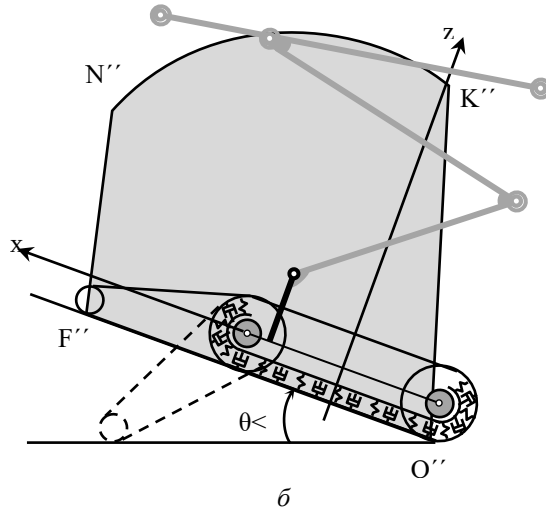


Рис. 9.23. Поздовжні перетини допустимої області розташування центра мас комплексу при розміщенні його по схилу вниз (а) та на підйомі вгору (б)

Наявність фліпперів комплексу підвищує статичну стійкість у випадку, коли площина розташування важелів маніпулятора близька до поздовжньої осі комплексу. Тому оптимальною областю роботи з небезпечними об'єктами в плані є ділянка  $S_0$  між фліпперами, яка охоплює крайні точки опирання фліпперів  $F_1$  та  $F_2$  (рис. 9.24).

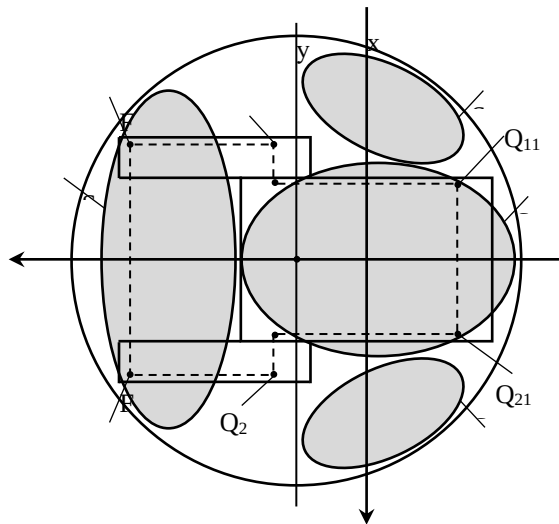


Рис. 9.24. Ділянки робочої зони роботизованого комплексу в плані, які рекомендуються для забезпечення статичної стійкості

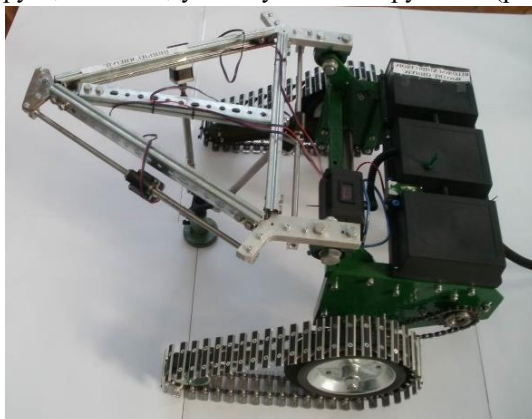
Стійкість комплексу також забезпечується при знаходженні центра мас комплексу на ділянці  $S_p$  між крайніми опорними точками шасі  $P_1Q_1Q_2P_2$ . Області робочої зони  $S_{n1}$  та  $S_{n2}$  є небезпечними і можуть привести до втрати статичної стійкості.

На основі проведених досліджень розроблено експериментальний зразок мобільного наземного роботизованого комплексу. Він побудований по модульній схемі і включає автономні модулі з колісним або гусеничним рушієм. Кожен модуль має автономну систему живлення та систему керування. При необхідності модуль використовується самостійно. При цьому він оснащується додатковою опорою (рис. 9.25).



*Рис. 9.25. Колісний модуль розробленого експериментального зразка наземного роботизованого комплексу*

Аналогічну конструкцію має модуль із гусеничним рушієм\* (рис. 9.26).



*Рис. 9.26. Модуль наземного роботизованого комплексу із гусеничним рушієм*

---

\*-розроблено і виготовлено в лабораторії кафедри конструювання верстатів та машин «КПІ імені Ігоря Сікорського» під керівництвом завідувача лабораторії Костриці Сергія Миколайовича.

Кожен модуль оснащено необхідним обладнанням, зокрема маніпуляторами різного виду. Модулі мають стиковочні вузли для з'єднання один із одним.

Раціональним варіантом є роботизований комплекс, який є результатом об'єднання колісного і гусеничного модулів [80].

Дослідна перевірка розробленого експериментального зразка наземного роботизованого комплексу підтвердила достовірність визначення статичної стійкості при різних умовах розташування шасі на опорній поверхні.

### 9.3. Матричні характеристики жорсткості маніпуляторів наземних роботизованих комплексів

На просторову деформовану систему мобільного робота діють різноманітні сили статичного і динамічного характеру. Основними статичними силами є гравітаційні сили  $G_i$  ( $i=0,1,2,3,\dots$ ) та силові фактори корисного навантаження. Даними факторами є головний вектор  $\vec{F}_0$  та головний момент  $\vec{M}_0$ , що діють на об'єкт маніпулювання (рис. 9.27).

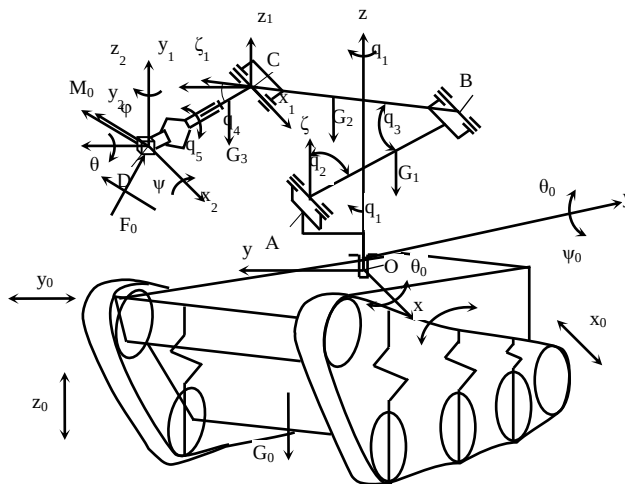


Рис. 9.27. Статичні силові фактори, що діють на мобільний промисловий робот та відповідні переміщення в пружній системі робота

Мобільний робот включає маніпулятор і шасі яке розміщено на деформованому ґрунті.

Навантаження  $\vec{F}_0$  і  $\vec{M}_0$  яке діє на об'єкт маніпулювання обумовлює переміщення всіх вузлів промислового робота. Переміщення шасі робота має просторовий характер і характеризується проекціями поступальних переміщень



характерної точки шасі (точка O) та поперечно-кутовими переміщеннями шасі відносно ґрунту. Дані переміщення описуються вектором

$$(x_{oi}) = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \psi_0 \\ \theta_0 \\ \phi_0 \end{bmatrix}.$$

Даний вектор характеризує незначні деформації ходової частини шасі та невизначені, змінні і залежні від багатьох факторів деформаційні процеси взаємодії опор шасі з ґрунтом. Тому характеристики жорсткості робота розглядають окремо для шасі і окремо для маніпулятора. Деформації пружної системи маніпулятора розглядаються в системі координат  $x, y, z$  яка жорстко пов'язана із платформою шасі. Для опису деформаційних властивостей маніпулятора використовують матриці жорсткості та деформативності.

Під дією статичних навантажень  $\vec{F}_0$ ,  $\vec{M}_0$  пружна система маніпулятора деформується. Має місце переміщення робочого органу маніпулятора (точка D).

Переміщення точки D визначено у відхиленнях від деякого усталеного статичного положення в якому складові корисного навантаження  $\vec{F}_0 = 0$ ,  $\vec{M}_0 = 0$ . Відносно усталеного положення розглядаються переміщення виконавчого органу (рис. 9.28).

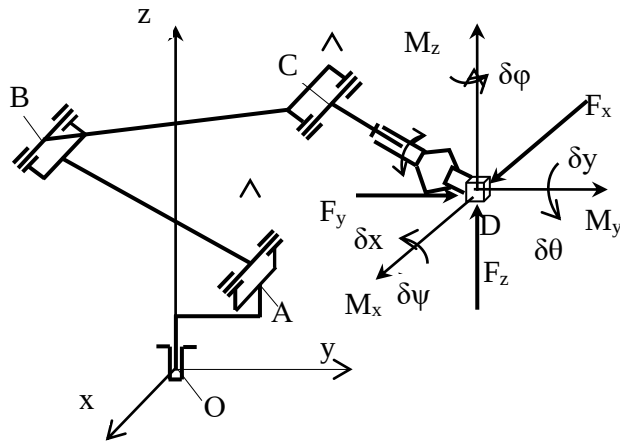


Рис. 9.28. Схема переміщення виконавчого органу маніпулятора при дії силових навантажень

На виконавчий орган діють силові фактори у вигляді головного вектора  $\vec{F}_0$  і головного моменту  $\vec{M}$ . Сили визначені своїми проєкціями на вісі  $x, y, z$  –  $F_x, F_y, F_z$ . Моменти визначені проєкціями  $M_x, M_y, M_z$ .

Силові фактори, що діють на виконавчий орган сформовані у вигляді одного вектора:

$$(F_i) = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}.$$

Сили і моменти визивають поступальні переміщення виконавчого органу в напрямку вісей  $x, y, z$ , які складають  $\delta x, \delta y, \delta z$ . Також відбуваються повороти виконавчого органу навколо вісей  $x, y$  і  $z$  на кути  $\delta\psi, \delta\theta, \delta\phi$ . Просторові переміщення виконавчого органу подано у вигляді вектора

$$(\delta x_j) = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta\psi \\ \delta\theta \\ \delta\phi \end{bmatrix}.$$

В лінійній постановці сили і переміщення згідно закону Гука зв'язані лінійною залежністю:

$$(F_i) = (c_{ij}) \cdot (\delta x_j), \text{ де } (c_{ij}) \text{ матриця жорсткості розмірністю } 6 \times 6.$$

$$(c_{ij}) = \begin{bmatrix} c_{fx\delta x} & c_{fx\delta y} & c_{fx\delta z} & c_{fx\delta\psi} & c_{fx\delta\theta} & c_{fx\delta\phi} \\ c_{fy\delta x} & c_{fy\delta y} & c_{fy\delta z} & c_{fy\delta\psi} & c_{fy\delta\theta} & c_{fy\delta\phi} \\ c_{fz\delta x} & c_{fz\delta y} & c_{fz\delta z} & c_{fz\delta\psi} & c_{fz\delta\theta} & c_{fz\delta\phi} \\ c_{mx\delta x} & c_{mx\delta y} & c_{mx\delta z} & c_{mx\delta\psi} & c_{mx\delta\theta} & c_{mx\delta\phi} \\ c_{my\delta x} & c_{my\delta y} & c_{my\delta z} & c_{my\delta\psi} & c_{my\delta\theta} & c_{my\delta\phi} \\ c_{mz\delta x} & c_{mz\delta y} & c_{mz\delta z} & c_{mz\delta\psi} & c_{mz\delta\theta} & c_{mz\delta\phi} \end{bmatrix}.$$

Якщо матриця жорсткості не вироджена то матричну рівність між діючими навантаженнями і переміщеннями подають у вигляді залежності переміщень від діючих силових факторів  $(\delta x_j) = (D_{ji}) \cdot (F_i)$ , де введена матриця деформативності (податливості)  $(D_{ji})$ . Вона має розмірність  $6 \times 6$ :

$$(D_{ij}) = \begin{bmatrix} D_{\delta x f x} & D_{\delta x f y} & D_{\delta x f z} & D_{\delta x m x} & D_{\delta x m y} & D_{\delta x m z} \\ D_{\delta y f x} & D_{\delta y f y} & D_{\delta y f z} & D_{\delta y m x} & D_{\delta y m y} & D_{\delta y m z} \\ D_{\delta z f x} & D_{\delta z f y} & D_{\delta z f z} & D_{\delta z m x} & D_{\delta z m y} & D_{\delta z m z} \\ D_{\delta \psi f x} & D_{\delta \psi f y} & D_{\delta \psi f z} & D_{\delta \psi m x} & D_{\delta \psi m y} & D_{\delta \psi m z} \\ D_{\delta \theta f x} & D_{\delta \theta f y} & D_{\delta \theta f z} & D_{\delta \theta m x} & D_{\delta \theta m y} & D_{\delta \theta m z} \\ D_{\delta \varphi f x} & D_{\delta \varphi f y} & D_{\delta \varphi f z} & D_{\delta \varphi m x} & D_{\delta \varphi m y} & D_{\delta \varphi m z} \end{bmatrix}.$$

Фізичний зміст компонент матриці податливості є зміщення робочого органу в напрямку вісі  $x_j$  д дії одиничного узагальненого силового фактора в напрямку вісі  $x_i$ .

Матриці жорсткості і деформативності доцільно зобразити у вигляді графів. При цьому гілки графів відповідають позадіагональним компонентам матриць, а діагональні компоненти показують у вигляді петель на вершинах графа (рис. 9.29).

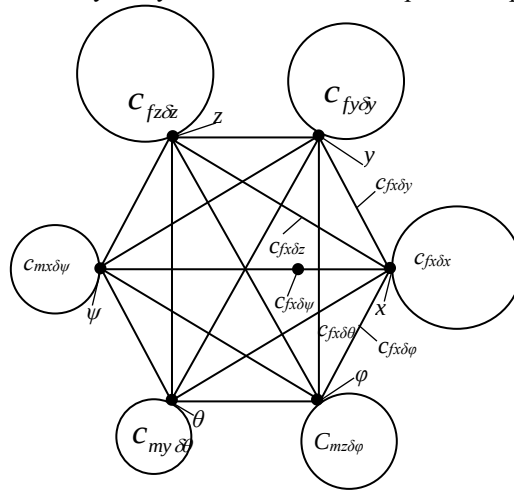


Рис. 9.29. Графічне зображення матриці жорсткості у вигляді графа

Розміри кілець як правило пропорційні діагональним компонентам матриці.

Матриця жорсткості і деформативності мають особливі властивості [12]. Матриця подається у блочному вигляді:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{\Pi} & C_c \\ C_c^T & C_K \end{bmatrix},$$

$C_{\Pi}$  – матриця поступальної жорсткості;  $C_K$  – матриця крутильної жорсткості;  $C_c$  – матриця сполученої жорсткості.

Матриця  $C_{\Pi}$  є симетричною, нормальною і являє собою матрицю поступальної жорсткості, яка встановлює відношення між лінійним переміщенням та відповідними силами. Матрицю поступальної жорсткості  $C_{\Pi}$  можна представити у вигляді:

$$C_{\Pi} = R_{\Pi} \Gamma_{\Pi} R_{\Pi}^T,$$

де  $R_{\Pi}$  – ортогональна матриця, стовпчики якої відповідають осям поступальної жорсткості,  $\Gamma_{\Pi} = \text{diag}(\gamma_{\Pi}^1, \gamma_{\Pi}^2, \gamma_{\Pi}^3)$  – діагональна матриця відповідних поступальних жорсткостей. Навантаження силою вздовж одної з осей викликає поступальне переміщення лише у напрямку цієї осі.

Матриця  $C_{\kappa}$ , також є симетричною і нормальною. Вона є матрицею крутильної жорсткості, яка встановлює відношення між поворотом та відповідним моментом. Матрицю  $C_{\kappa}$  можна представити у вигляді

$$C_{\kappa} = R_{\kappa} \Gamma_{\kappa} R_{\kappa}^T,$$

де  $R_{\kappa}$  – ортогональна матриця, стовпчики якої відповідають осям крутильної жорсткості,  $\Gamma_{\kappa} = \text{diag}(\gamma_{\kappa}^1, \gamma_{\kappa}^2, \gamma_{\kappa}^3)$  – діагональна матриця відповідних крутильних жорсткостей. Навантаження моментом навколо одної з осей викликає поворот лише навколо цієї осі.

Матриця  $C_c$  – несиметрична в загальному випадку матриця сполучної жорсткості, яка встановлює співвідношення між силою та поворотом, між моментом та поступальним переміщенням. Матрицю  $C_c$  можна представити у вигляді:

$$C_c = R_c \Gamma_c R_c^T,$$

де  $R_c$  – ортогональна матриця, стовпчики якої відповідають сполучним осям жорсткості,  $\Gamma_c = \text{diag}(\gamma_c^1, \gamma_c^2, \gamma_c^3)$  – діагональна матриця відповідних сполучних жорсткостей. Навантаження моментом навколо однієї з осей викликає поворотне переміщення у напрямку цієї осі, а навантаження силою уздовж одної з осей викликає поворот навколо цієї осі.

Оскільки розмірності елементів матриць  $C_{\Pi}$ ,  $C_c$  та  $C_{\kappa}$  визначаються відповідно до їх фізичного змісту, матриця жорсткості має неоднорідну розмірність. Якщо виразити силу в [Н] та переміщення в [м], то блоки матриці жорсткості мають наступні розмірності:

$$(C_{ij}) = \begin{bmatrix} \text{Н} \cdot \text{м}^{-1} & \text{Н} \\ \text{Н} & \text{Н} \cdot \text{м} \end{bmatrix}.$$

Матриця жорсткості  $C$  – симетрична, нормальна (виконується співвідношення  $CC^T = C^T C$ ). Комплекс знаходиться в стійкій рівновазі, матриця просторової жорсткості не вироджена (яка має обернену) і позитивно визначена (така, що  $\mathbf{z}^T C \mathbf{z} > 0$  для всіх ненульових векторів  $\mathbf{z} \in R^6$ ). Усі власні значення невиродженої матриці  $C$  додатні  $\lambda_i > 0$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ).

Якщо матриця жорсткості  $C$  вироджена, вона має одне або більше нульових власних значень. Нульові власні значення відповідають нульовій поступальній

жорсткості у певному напрямку або нульовій обертальній жорсткості відносно певної осі. В особливих положеннях обернена матриця жорсткості не може бути обчислена, а отже не можна визначити переміщення робочого органа робота при заданому навантаженні. Вироджена матриця жорсткості є симетричною позитивно напіввизначеною, тобто її власні значення нульові або додатні  $\lambda_i \geq 0$ .

Визначник (детермінант) матриці жорсткості  $C$  обчислюється як:

$$|C| = (-1)^6 + S_1(-1)^5 + S_2(-1)^4 + S_3(-1)^3 + S_4(-1)^2 + S_5(-1) + S_6,$$

де  $S_i$  ( $i=1,2,K,6$ ) – сума головних мінорів порядку  $i$  матриці  $C$ .

Визначник матриці жорсткості  $C$  являє собою об'єм гіпереліпсоїда, інваріантний в перетвореннях подібності, а отже не залежить від вибору системи координат.

Слід  $Tr(C)$  матриці жорсткості обчислюється як сума елементів головної діагоналі:

$$Tr(C) = \sum_{i=1}^n C_{ii}.$$

Слід представляє собою суму елементів матриці жорсткості вздовж напрямків осей координат. Оскільки не всі елементи головної діагоналі мають однакову розмірність, слід матриці жорсткості не несе певного фізичного змісту.

Власні значення матриці  $C$  можна обчислити як корені характеристичного поліному:

$$(-\lambda)^6 + S_1(-\lambda)^5 + S_2(-\lambda)^4 + S_3(-\lambda)^3 + S_4(-\lambda)^2 + S_5(-\lambda) + S_6 = 0.$$

Якщо  $(C_{ij})$  – симетрична матриця з власними значеннями  $\lambda_1 \leq \lambda_K \leq \lambda_n$ , справедливі наступні співвідношення:

- Всі діагональні елементи матриці більші від мінімального власного значення та менші від максимального  $\lambda_1 \leq C_{ii} \leq \lambda_n$ ,  $i=1,K,n$ .

- Сума діагональних елементів дорівнює сумі власних значень:

$$\sum_{i=1}^n C_{ii} = \sum_{j=1}^n \lambda_j.$$

- Сума квадратів діагональних елементів не перевищує суми квадратів власних значень:  $\sum_{i=1}^n C_{ii}^2 \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j^2$ .

- Дисперсія діагональних елементів не перевищує дисперсії власних значень

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_{ii} - \bar{C})^2 \leq \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2,$$

$$\text{де } \bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{ii} \text{ та } \bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{ дорівнюють } \frac{\text{Tr}(C)}{n}.$$

• Сума попарних добутків усіх власних значень не перевищує суми попарних добутків діагональних елементів  $\sum_{i < j} \lambda_i \lambda_j \leq \sum_{i < j} C_{ii} C_{jj}$ .

• Сума квадратів попарних різниць усіх діагональних елементів не перевищує суми квадратів попарних різниць власних значень:  $\sum_{i < j} (C_{ii} - C_{jj})^2 \leq \sum_{i < j} (\lambda_i - \lambda_j)^2$ .

• Якщо матриця позитивно визначена, її визначник не перевищує добутку діагональних елементів:

$$|C| \leq \prod_{i=1}^n C_{ii}.$$

Кожному власному значенню  $\lambda$  відповідає ненульовий власний вектор  $\mathbf{v}$ , що задовольняє співвідношенню:

$$C\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}.$$

Оскільки матриця жорсткості нормальна, її власні вектори ортонормальні і утворюють базис 6-вимірного простору, а складена з них матриця є ортогональною.

Фізичний зміст власних значень полягає у визначенні величин головних поступальних та крутильних жорсткостей, а власні вектори, пов'язані з максимальними та мінімальними власними значеннями матриці жорсткості, визначають напрямки максимальної та мінімальної жорсткості. Різниця між власними значеннями характеризує анізотропію жорсткості кінематичного ланцюга робота у певному фіксованому положенні.

Матриця податливості також подається у блочному вигляді. При цьому матриця деформативності (податливості) має вигляд, подібний до матриці жорсткості:

$$D = \begin{bmatrix} D_{\Pi} & D_c^T \\ D_c & D_k \end{bmatrix},$$

де  $D_{\Pi}$ ,  $D_c$  та  $D_k$  – відповідно матриці поступальної, сполучної та крутильної податливості, кожна з яких характеризується набором власних значень податливостей та відповідних ортонормальних векторів, що визначають осі податливості.

Для обернення блочної матриці, матрицю податливості можна виразити через підматриці матриці жорсткості:

$$D = \begin{bmatrix} C_{\Pi} & C_c \\ C_c^T & C_k \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} E_k^{-1} & -C_{\Pi}^{-1} C_c E_{\Pi}^{-1} \\ -C_k^{-1} C_c^T E_k^{-1} & E_{\Pi}^{-1} \end{bmatrix},$$

де введені позначення:

$$E_k = C_{\Pi} - C_c C_k^{-1} C_c^T,$$

$$E_{\Pi} = C_k - C_c^T C_{\Pi}^{-1} C_c.$$

Розмірність матриці податливості також неоднорідна:

$$D = \begin{bmatrix} H^{-1} \cdot m & H^{-1} \\ H^{-1} & H^{-1} \cdot m^{-1} \end{bmatrix}.$$

У іншій системі координат  $x'_0 y'_0 z'_0$ , одержимо:

$$W' = C' \Delta X',$$

де  $W'$  та  $\Delta X'$  – вектори узагальненого навантаження та пружних переміщень, записані у новій системі координат.

Враховуючи:

$$\Delta X = T^T \Delta X',$$

одержуємо:

$$W = T C T^T \Delta X'.$$

Маємо залежність матриці жорсткості від перетворення координат:

$$C' = T C T^T.$$

Таким чином, у загальному випадку  $C' \neq C$ , тобто матриця просторової жорсткості залежить від вибору системи координат.

Користуючись властивостями блочних матриць, можна визначити вигляд матриці жорсткості після перетворення координат:

$$C' = T C T^* = \begin{bmatrix} R C_n R^T & R (C_c - C_n \langle p \rangle^T) R^T \\ R (C_c^T - \langle p \rangle C_n) R^T & R (C_k - \langle p \rangle C_c - C_c^T \langle p \rangle^T + \langle p \rangle C_n \langle p \rangle^T) R^T \end{bmatrix}.$$

Чистий поворот системи координат трансформує усі підматриці однаковою чином, а ступінь впливу на них паралельного переносу значно різниться.

Матриця поступальної жорсткості при переході від одної системи координат до іншої не залежить від вектора відносного зміщення  $p$  їх центрів, а визначається лише відносним поворотом  $R$ . Оскільки власні значення матриці при повороті зберігаються, то поступальні жорсткості не залежать від вибору системи координат.

Матриця сполучної жорсткості при чистому повороті трансформується як окрема матриця, а лінійне переміщення пов'язує її з матрицею поступальної жорсткості. При цьому значення сполучних жорсткостей не зберігаються.

Матриця крутильної жорсткості трансформується найбільш складним чином, у її перетворенні задіяні як матриця поступальної, так і матриця сполучної жорсткості. Крутильні жорсткості в загальному випадку перетворення координат не зберігаються.

Враховуючи, що матриця податливості є оберненою до матриці жорсткості, встановлено, що при зміні координат вона перетворюється як:

$$D = T^{-1} D T^{-T}.$$

Глобальні показники жорсткості можуть бути визначені у математичній формі використання мінімуму, максимуму, середнього значення та локального показника жорсткості. Наприклад, можна обчислити глобальний показник як:

$$j_d = \min |C|.$$

Якщо  $j_d$  дорівнює нулю, в робочому просторі робота існує хоча б одне особливе положення.

Якщо конструктивна вимога полягає у забезпеченні ізотропної жорсткості, глобальний показник жорсткості можна одержати як інтеграл умовного числа матриці жорсткості в усьому робочому просторі:

$$j_C = \frac{\int \kappa(C) dV}{L^3},$$

де  $V$  – об'єм робочого простору,  $L$  – характеристична довжина.

Інший глобальний показник жорсткості одержуємо у вигляді:

$$j_{MN} = \frac{\int \max_i \sqrt{\lambda_i} dV}{L^3}.$$

Цей глобальний показник можна використовувати для одержання максимальної жорсткості у одному або кількох напрямках. Подібний показник можна визначити мінімумом власних значень:

$$j_{mN} = \frac{\int \min_i \sqrt{\lambda_i} dV}{L^3}.$$

Він дозволяє виявити та усунути слабкі місця по жорсткості у певних напрямках. Глобальний показник можна визначити також як різницю між  $j_{MN}$  та  $j_{mN}$ :

$$j_{RN} = \frac{\int \max_i \sqrt{\lambda_i} dV - \int \min_i \sqrt{\lambda_i} dV}{L^3}.$$

Такий показник несе інформацію про діапазон зміни жорсткості у робочому просторі робота.

Для оцінки рівня жорсткості можна визначити її середні й мінімальні значення по координатних напрямках і в цілому. Середні рівні жорсткості по координатних напрямках і в цілому можна обчислити як:

$$\bar{j}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n j_{xi}, \quad \bar{j}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n j_{yi}, \quad \bar{j}_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n j_{zi}, \quad \bar{j} = \frac{1}{3} (\bar{j}_x + \bar{j}_y + \bar{j}_z),$$

де  $n$  – кількість контрольних точок, які вибираються таким чином, щоб одержати повну інформацію про жорсткість, наприклад розміщуються у вигляді сітки з певним кроком. При наявності багатьох ступенів вільності робочого органа (більше 3) слід врахувати цей факт, визначаючи жорсткість у кожному положенні для кількох різних орієнтацій робочого органа (набору кутів Ейлера-Крилова).

Розкид жорсткості по осям координат визначається середньоквадратичними відхиленнями:



$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (j_{xi} - \bar{j}_x)^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (j_{yi} - \bar{j}_y)^2}, \quad \sigma_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (j_{zi} - \bar{j}_z)^2},$$

і коефіцієнтами варіації:

$$\upsilon_x = \sigma_x / \bar{j}_x, \quad \upsilon_y = \sigma_y / \bar{j}_y, \quad \upsilon_z = \sigma_z / \bar{j}_z.$$

Глобальні показники жорсткості можна визначати як у повному робочому просторі робота так і на окремих ділянках робочого простору.

Матриці жорсткості та деформативності визначаються теоретичними або експериментальними методами.

В процесі експериментальних вимірів здійснюється навантаження комплексу силовими факторами у вигляді сил і крутих моментів. При цьому вимірюються переміщення окремої точки комплексу. Для вимірів просторової жорсткості систему навантажують силовим фактором у вигляді головного вектора і головного момента. При цьому вимірюються переміщення відносно нерухомої точки О в характерній точці комплексу (паралелепіпед D на рис. 9.30).

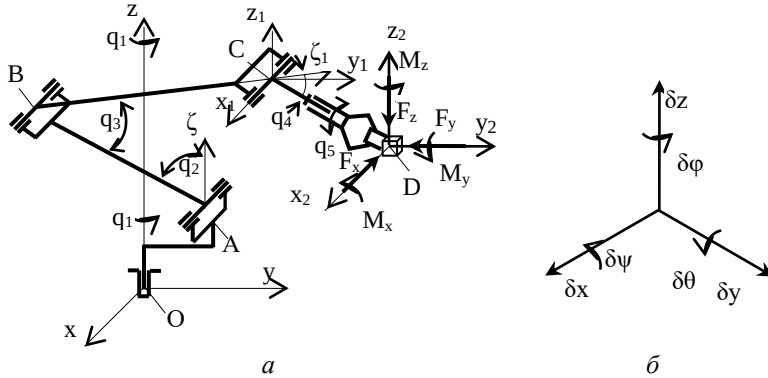


Рис. 9.30. Практичне визначення матриці деформативності (податливості) при навантаженні маніпулятора: а – схема навантаження; б – переміщення робочого органу

Головний вектор навантаження задано своїми проекціями  $F_x, F_y, F_z$  на осі координат  $x, y, z$ . Головний момент задано проекціями моментів сил  $M_x, M_y, M_z$  відносно вісей  $x, y$  і  $z$ .

Для експериментального визначення матриці деформативності задається одна із проєкцій вектора навантаження наприклад  $F_x=1$ . При цьому вимірюються поступальні та поперечно-кутові зміщення об'єкта маніпулювання – паралелепіпеда D, які являють собою перший стовпчик матриці деформативності:

$$\begin{bmatrix} D_{\delta x f_x} & D_{\delta y f_x} & D_{\delta z f_x} & D_{\delta \varphi f_x} & D_{\delta \psi f_x} & D_{\delta \theta f_x} \end{bmatrix}^T.$$

Аналогічно проводиться почергове навантаження іншими силовими факторами:

$$F_y=1, F_z=1, M_x=1, M_y=1, M_z=1.$$

При цьому визначаються останні стовпці матриці деформативності і формується матриця ( $D_{ji}$ ).

Матриця жорсткості знаходиться як обернена матриця деформативності.

Мобільні роботизовані комплекси мають особливу конфігурацію. Тому для визначення їх деформативних параметрів вводиться система координат орієнтована по положенню робочого органу. Доцільно розташувати вісь  $x$  по вісі робочого органу, а осі  $y, z$  перпендикулярно вісі  $x$  у горизонтальній та вертикальній площинах. Для вимірів переміщень робочого органу застосовується спеціальний пристрій у вигляді трьох сфер жорстко закріплених на робочому органі [158].

Три інші сфери встановлюються на нерухомій основі або на шасі комплексу. По вимірам відстаней між сферами (показаними пунктирними лініями) шляхом розрахунків визначаються просторові переміщення робочого органу в точці. Таким чином визначаються абсолютні переміщення точки робочого органу. відносно нерухомої основи. Для визначення відносних переміщень робочого органу знаходження всіх компонент матриці жорсткості є недоцільним. В цьому випадку обмежуються визначенням лише частини матриці жорсткості у вигляді матриці розмірності 3. Дана матриця характеризує поперечно кутове положення робочого органу роботизованого комплексу або маніпулятора у вигляді однієї штанги.

Здійснено практичне визначення матриці жорсткості та деформативності (податливості) консольно розміщеного об'єкта (штанги) із двома ступенями вільності (рис. 9.31).

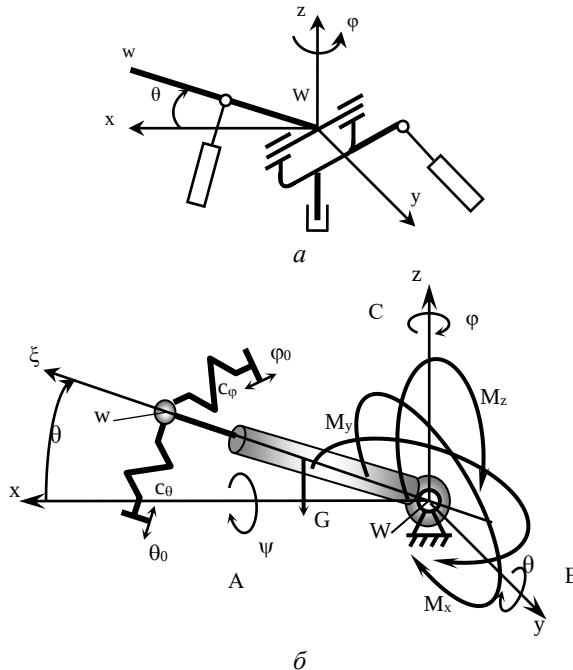


Рис. 9.31.. Об'єкт із двома ступенями вільності та двома приводами:

$a$  – схема;  $b$  – пружна модель

Поперечно-кутові переміщення штанги здійснюються в межах пружних переміщень верхнього кінця штанги  $w$ . Для просторових поперечно-кутових мікропереміщень опори штанги параметри жорсткості та деформативності можна вважати лінійними а довжину штанги – постійною. Відповідно для розрахунку просторових мікропереміщень штанги можна використати лінійну пружну модель у вигляді твердого тіла із нерухомою точкою  $W$ , яке здійснює сферичний рух.

В загальному випадку вісь штанги (вісь  $\xi$ ) розташована довільним чином відносно декартової прямокутної системи координат  $x, y, z$ . Положення осі штанги в просторі характеризується кутами  $\psi, \theta, \varphi$ . Це положення є номінальним положенням штанги для деякого фіксованого стану механізму. Відхилення штанги від номінального положення характеризується трьома кутами  $A, B, C$ .

Ці кути є малими ( $A \ll \psi, B \ll \theta, C \ll \varphi$ ) і характеризують просторові мікропереміщення штанги в межах деформацій пружної системи.

На штангу діють зовнішні моментні навантаження, що описуються проекціями моменту на осі координат  $M_x, M_y, M_z$ . При поперечно-кутових переміщеннях штанги виникають реакції в'язей, пропорційні складовим жорсткості  $C_x, C_y, C_z$ .

Матриця жорсткості пружної просторової системи штанги вводиться за аналогією з характеристикою жорсткості лінійного пружного елемента у вигляді:

$$F = [C_{ij}]x,$$

де  $F$  – вектор силових факторів (сил або моментів);  $[C_{ij}]$  – матриця жорсткості;  $x$  – вектор кутових переміщень.

Для пружної системи штанги силовими факторами є проекції моменту  $M_x, M_y, M_z$ , а переміщенням є кути повороту штанги  $\psi, \theta, \varphi$ . Матрично-векторна характеристика жорсткості пружної системи штанги запишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{x\varphi} & C_{x\theta} & C_{x\psi} \\ C_{y\varphi} & C_{y\theta} & C_{y\psi} \\ C_{z\varphi} & C_{z\theta} & C_{z\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix}.$$

Вибором спеціальної системи координат  $x_c, y_c, z_c$  можна привести матрицю жорсткості до діагонального виду:

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_x & 0 & 0 \\ 0 & C_y & 0 \\ 0 & 0 & C_z \end{bmatrix}.$$

Прийmemo, що момент сил відносно осі штанги  $\xi$  дорівнює нулю. Відповідно коефіцієнт жорсткості при повороті навколо осі  $\xi$  є несуттєвим. Вибравши спеціальну систему координат вісь  $\xi$ , якої збігається з віссю штанги, одержимо спрощену (планарну) матрицю жорсткості штанги у вигляді:

$$\begin{bmatrix} M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \end{bmatrix}.$$

В формулі  $\theta$  визначає кут повороту штанги в меридіональному напрямку, а  $\varphi$  – кут повороту в екваторіальному напрямку.

В головній системі координат штанги одержана матриця жорсткості має діагональний вид, а характеристика жорсткості пружної системи набуває вигляду:

$$\begin{bmatrix} M_{\zeta} \\ M_{\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\zeta} & 0 \\ 0 & C_{\eta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \zeta \\ \eta \end{bmatrix}.$$

Для даної системи, яка підлягає закону Гука матриця жорсткості зображується у вигляді еліпса. Проведено виміри еліпса жорсткості для реального об'єкта у вигляді консолі (рис.9.32).

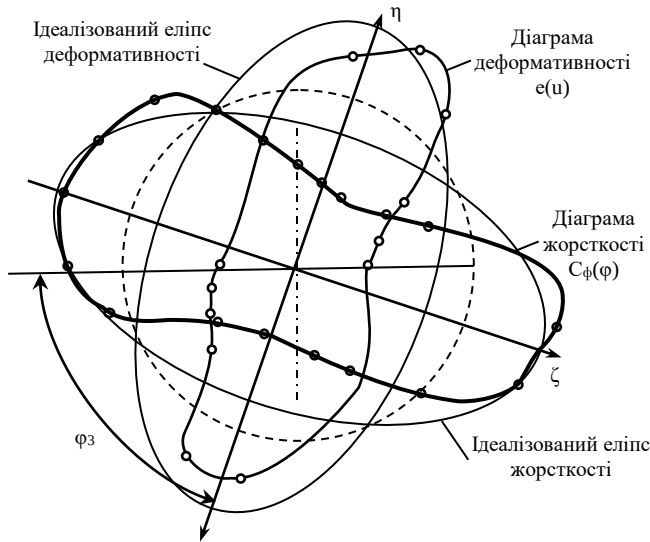


Рис. 9.32. Еліпси жорсткості та деформативності штанги при дії моментних навантажень

Радіальне зміщення штанги в напрямку дії сили, яка створює крутний момент показано коловими точками і відповідає діаграмі деформативності, форма якої близька до еліптичної. Напрямок вісей діаграми  $\zeta$ ,  $\eta$  визначає напрямки максимальних і мінімальних жорсткостей і деформацій. Деформації  $e(\varphi)$  пов'язані із поточною жорсткістю:

$$C_{\phi}(\alpha) = \frac{1}{e(\alpha)}.$$

Відповідно визначена діаграма жорсткості. Більша вісь еліпса жорсткості орієнтована по напрямку  $\zeta$  мінімальних деформацій під дією радіальної сили. Розташування і конфігурація діаграми жорсткості відповідає головним напрямкам жорсткості.

## 9.4. Визначення статичних деформацій в маніпуляторах мобільних роботів

Маніпулятори мобільних роботів навантажені різноманітними силовими факторами. При цьому мають місце деформації елементів маніпулятора та ходової частини мобільного робота. Розглянемо пружну систему мобільного робота із маніпулятором важільного типу (рис. 9.33).

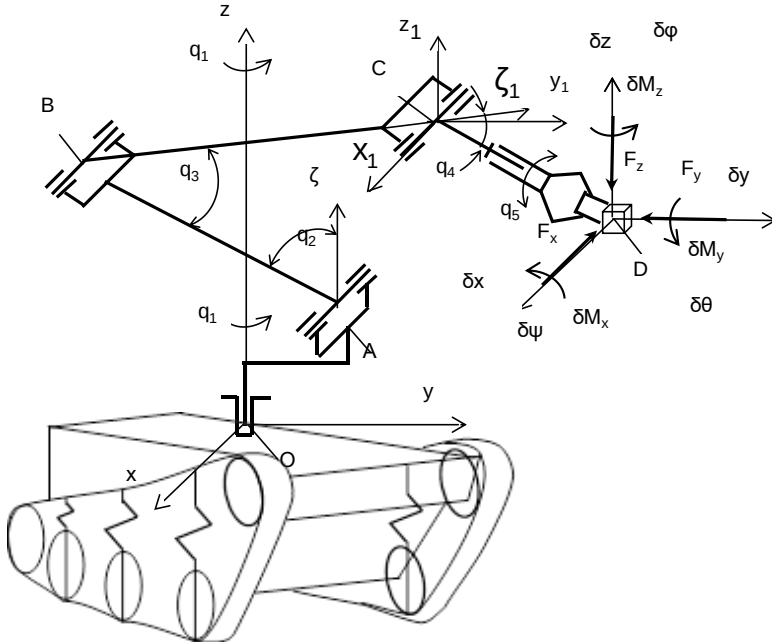


Рис. 9.33. Схема пружної системи мобільного робота із маніпулятором важільного типу

В якості навантаження, що діє на маніпулятор, приймемо узагальнений силовий фактор у вигляді головного вектора та головного моменту. Узагальнений силовий фактор подано у вигляді шестивимірного вектора проєкцій сили та моменту:

$$\delta F_i = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}.$$

Даний вектор не є однорідним. Його компоненти мають різну розмірність і змінюються в широких межах.

Дія силового фактора приводить до переміщень (просторових деформацій) пружної системи мобільного робота.

Пружна система має суттєво різні по величині параметри жорсткості окремих елементів. Шасі мобільного робота має жорстку конструкцію, тому параметри жорсткості шасі є набагато більшими параметрів жорсткості маніпулятора. Відповідно при дії узагальненого силового фактора, деформації елементів шасі є незначними і їх можна не враховувати в загальному балансі жорсткості мобільного робота. Відповідно шасі можна вважати твердим тілом, а маніпулятор пружною деформованою системою. Деформації маніпулятора є незначними у порівнянні із деформаціями ґрунту. Тому деформації маніпулятора віднесені до мікропереміщень, а переміщення шасі відносно ґрунту віднесені до макропереміщень. Це відповідає запропонованій ідеї про розділення процесів в мобільних роботах на дві різні групи – макропроцеси та мікропроцеси. Це дає можливість розділити явища, що супроводжують роботу маніпуляторів мобільних роботів по їх ступеням значимості.

Мікропереміщення вузлів і деталей маніпуляторів розглянуті в лінійній постановці, як малі переміщення. Характерним є визначення маніпулювання вектором просторових мікропереміщень:

$$(\delta x_j) = \begin{bmatrix} \delta x_c \\ \delta y_c \\ \delta z_c \\ \delta \psi_c \\ \delta \theta_c \\ \delta \varphi_c \end{bmatrix}.$$

Даний вектор визначає переміщення маніпулятора відносно шасі. Встановлено зв'язок вектора переміщень із вектором зміни силових факторів у вигляді закону Гука у матричній формі:

$$(\delta F_i) = (c_{ij}) \cdot (\delta x_j).$$

В дану формулу входить матриця жорсткості комплексу:

$$(c_{ij}) = \begin{bmatrix} c_{x\delta x} & c_{x\delta y} & c_{x\delta z} & c_{x\delta \psi} & c_{x\delta \theta} & c_{x\delta \varphi} \\ c_y & c_{y\delta y} & c_{y\delta z} & c_y & c_y & c_y \\ c_z & c_z & c_{z\delta z} & c_z & c_z & c_z \\ c_\psi & c_\psi & c_\psi & c_{\psi M_y} & c_\psi & c_\psi \\ c_\theta & c_\theta & c_\theta & c_\theta & c_{\theta M_y} & c_\theta \\ c_\varphi & c_\varphi & c_\varphi & c_\varphi & c_{\varphi M_y} & c_{\varphi M_z} \end{bmatrix}.$$

Аналогічно визначено зв'язок деформацій та діючих навантажень:

$$(\delta x_i) = (D_{ij})(\delta F_j),$$

де введено матрицю деформативності комплексу:

$$(D_{ij}) = \begin{bmatrix} D_{xFX} & D_{xFY} & D_{xFZ} & D_{xMX} & D_{xMY} & D_{xMZ} \\ D_{yFX} & D_{yFY} & D_{yFZ} & D_{yMX} & D_{yMY} & D_{yMZ} \\ D_{zMZ} & D_{zFY} & D_{zFZ} & D_{zMZ} & D_{zMY} & D_{zMZ} \\ D_{\psi MZ} & D_{\psi FY} & D_{\psi FZ} & D_{\psi MX} & D_{\psi MY} & D_{\psi MZ} \\ D_{\Omega MZ} & D_{\Omega FY} & D_{\Omega FZ} & D_{\Omega MX} & D_{\Omega MY} & D_{\Omega MZ} \\ D_{\Gamma MZ} & D_{\Gamma FY} & D_{\Gamma FZ} & D_{\Gamma MX} & D_{\Gamma MY} & D_{\Gamma MZ} \end{bmatrix}.$$

Для визначення макропереміщень мобільного робота здійснено аналіз силових факторів по спеціальній методиці. Для цього використані фундаментальні положення теоретичної механіки [24,25].

Обґрунтовано в процесі досліджень, що силові фактори, які діють на мобільний робот доцільно визначити з використанням динамічних гвинтів. Динамічний гвинт (динама) являє собою сукупність сили та пари сил, вектор якої колінеарний силі. Розглянемо особливості приведення системи сил, що діють на маніпулятор до динамічного гвинта

На мобільний робот, що переміщується по нерівній дорозі діють різноманітні сили. В основному це розподілені реакції по площі дороги R, а також сили, що діють на маніпулятор, наприклад, стрілецьке озброєння (рис. 9.34).

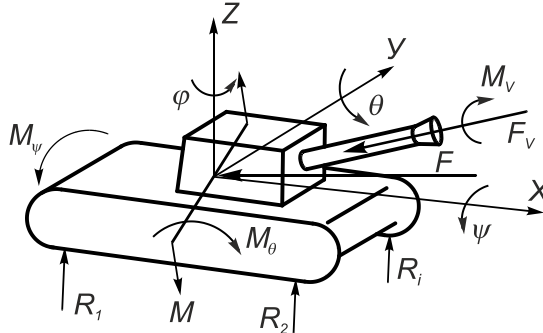


Рис. 9.34. Схема дії зусиль на мобільний робот та приведення їх до динамічного гвинта

Навантаження з боку стрілецького озброєння доцільно подати у вигляді окремого динамічного гвинта із силою  $F_v$  та моментом гвинта  $M_v$ . Всі силові фактори, що діють на робот, як показано вище, приводяться до динамічного гвинта із силою  $F$  і моментом  $M$ . Центр приведення сил виберемо в центрі системи координат. Центральна вісь буде співпадати із напрямком сили  $F$ .

Елементи результуючого динамічного гвинта можуть бути знайдені по заданим аналітично силам і координатах точок їх прикладення, тобто за величинами:

$$F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}; \quad x_i, y_i, z_i \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Головний вектор за величиною і напрямком визначається формулами:

$$V_x = \sum_{i=1}^n F_{ix}, \quad V_y = \sum_{i=1}^n F_{iy}, \quad V_z = \sum_{i=1}^n F_{iz}. \quad (9.31)$$

Аналітичний вираз модуля головного вектора  $V$  (другий статичний інваріант) буде:

$$V = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n F_{ix}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n F_{iy}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n F_{iz}\right)^2} \quad (9.32)$$

Головний момент відносно початку координат  $O$  визначається формулами:

$$\begin{aligned} m_x(O) &= \sum_{i=1}^n (y_i F_{iz} - z_i F_{iy}), \\ m_y(O) &= \sum_{i=1}^n (z_i F_{ix} - x_i F_{iz}), \\ m_z(O) &= \sum_{i=1}^n (x_i F_{iy} - y_i F_{ix}) \end{aligned} \quad (9.33)$$

По відомим проекціям сил і моментів знаходяться перший статичний інваріант – проекція головного моменту на напрямок головного вектора:

$$m^{(O)} \cdot \frac{V}{V} = \frac{1}{V} (m_x^{(O)} \cdot V_x + m_y^{(O)} \cdot V_y + m_z^{(O)} \cdot V_z) \quad (9.34)$$

Вираз, що має розмірність довжини є параметром динамічного гвинта:

$$\rho = \frac{1}{V^2} m^{(O)} \cdot V = \frac{m_x^{(O)} \cdot V_x + m_y^{(O)} \cdot V_y + m_z^{(O)} \cdot V_z}{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (9.35)$$

Знання головного вектора і параметра динамічного гвинта дає, як це видно з (9.35), можливість визначити силу і пару динамічного гвинта. Визначимо рівняння центральної вісі в просторі.

Центральна вісь являє собою геометричне місце точок  $O^*$ , для яких головний момент  $m^{(O^*)}$  паралельний головному векторові  $V$ . Умова паралельності цих векторів:

$$\frac{m_x^{(O^*)}}{V_x} = \frac{m_y^{(O^*)}}{V_y} = \frac{m_z^{(O^*)}}{V_z} \quad (9.36)$$

Враховуючи, що за (9.36):

$$m^{O^*} = m^{(O)} - m_O(V^*), \quad (9.37)$$

де  $m_O(V^*)$  - момент відносно точки  $O$  сили  $V^* = V$ , що діє вздовж центральної вісі. Використаємо формули:

$$\begin{aligned} m_{Ox}(V^*) &= yV_z - zV_y, \\ m_{Oy}(V^*) &= zV_x - xV_z, \\ m_{Oz}(V^*) &= xV_y - yV_x. \end{aligned}$$

де  $x, y, z$  – координати поточної точки  $O^*$  на центральній вісі, коли за початок координат прийнято центр зведення  $O$ . Відповідно (9.37) отримаємо рівняння центральної вісі:

$$\frac{m_x^{(O)} - yV_z + zV_y}{V_x} = \frac{m_y^{(O)} - zV_x + xV_z}{V_y} = \frac{m_z^{(O)} - xV_y + yV_x}{V_z} \quad (9.38)$$



Положення центральної вісі в просторі не залежить від вибору центра приведення сил. Прийmemo за центр приведення замість початку координат  $O$  точку  $A$  з координатами  $a, b, c$ . Тоді рівняння центральної вісі за (9.38) набудуть вигляду:

$$\frac{m_x^{(A)} - (y-b)V_z + (z-c)V_y}{V_x} = \frac{m_y^{(A)} - (z-c)V_x + (x-a)V_z}{V_y} = \frac{m_z^{(A)} - (x-a)V_y + (y-b)V_x}{V_z} \quad (9.39)$$

Але за (9.27) маємо:

$$m^{(A)} = m^{(O)} + m_A(V'),$$

де  $V'$  – головний вектор, перенесений в точку  $O$ , координати якої по відношенню до точки  $A$  дорівнюють  $-a, -b, -c$ . Проектуючи останню рівність на вісі координат, отримаємо:

$$m_x^{(A)} = m_x^{(O)} - bV_z + cV_y, m_y^{(A)} = m_y^{(O)} - cV_x + aV_z, m_z^{(A)} = m_z^{(O)} - aV_y + bV_x.$$

Підставляючи ці вирази в (9.38), отримаємо рівняння (9.39). Це підтверджує незалежність положення центральної вісі від вибору центра приведення. Таким чином сукупність сил, що діють на мобільний робот в статичному або квазістатичному режимах зводиться до одного силового фактора у вигляді динамічного гвинта. Він діє в напрямку центральної вісі, положення якої залежить від параметрів сукупності сил.

Для моделювання статичних або квазістатичних навантажень на мобільний робот необхідно встановити пристрій, який створює силу і пару. При цьому сила повинна діяти по центральній вісі. Даний метод моделювання (імітації) сил також дає можливість виконати компенсацію статичних навантажень. Недоліком даного методу є складність визначення центральної вісі, а відповідно складність орієнтації пристрою. В процесі досліджень запропоновано виконати моделювання, а в необхідних випадках і компенсацію статичних або квазістатичних навантажень на мобільний робот трьома динамічними гвинтами, які розміщені по вісям локальної системи координат мобільного робота  $x, y, z$ . Формуються три узагальнені силові фактори у вигляді динамічних гвинтів орієнтованих по вісям  $x, y, z$  (рис. 9.35).

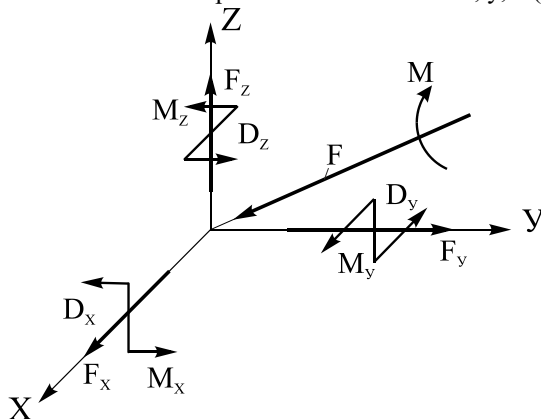


Рис. 9.35. Введення системи трьох динамічних гвинтів для моделювання статичних чи квазістатичних навантажень, що діють на мобільний робот

### 9.5. Визначення деформативності мобільного робота з маніпулятором на основі механізма-гексапода

Викладена в попередньому підрозділі методика визначення деформативних характеристик мобільних роботів застосована для маніпуляторів мобільних роботів з механізмами паралельної структури. Маніпулятор мобільного робота на основі механізма-гексапода має просторову стрижневу систему, що включає шість штанг змінної довжини. Штанги мають пневматичні дискретні приводи, які забезпечують, при необхідності, суттєву зміну робочого простору маніпулятора шляхом зміни геометрії стрижневої системи робота (рис. 9.36).

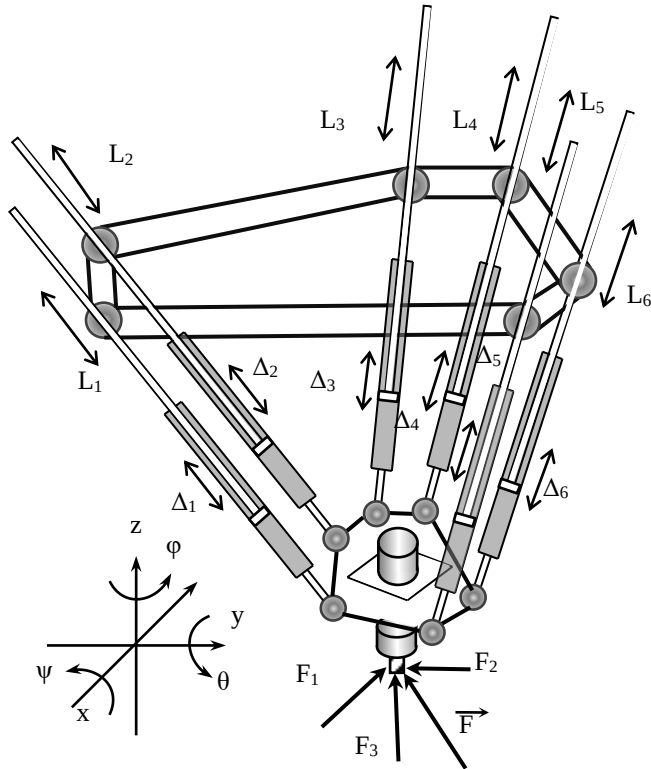


Рис. 9.36. Маніпулятор мобільного робота на основі механізма-гексапода із додатковими дискретними пневмоприводами зміни довжин штанг

Наявність додаткових приводів суттєво знижує жорсткість пружної системи маніпулятора. Тому при дії на нього силових факторів у вигляді головного вектора  $\vec{F}$  і головного моменту  $\vec{M}$  мають місце суттєві переміщення виконавчого органу в просторі які характеризуються поперечними  $x$ ,  $y$ ,  $z$  рухами та поперечно-кутовими переміщеннями  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ .

В процесі теоретичних досліджень виконано розрахунок напружено деформованого стану пружної системи робота-гексапода на ЕОМ.

Рама мобільного робота має складну конструкцію. Точне визначення напружено деформованого стану рами являє собою складну задачу і потребує значних обчислювальних ресурсів. Тому застосовані спрощені підходи до визначення напружено-деформованого стану рами і несучої системи верстата-роботи. Одним із таких підходів є застосування стрижневої апроксимації рами. Для обґрунтування даного підходу здійснена апроксимація пружної системи робота еквівалентною стрижневою системою.

Розглянуті вертикальні та горизонтальні навантаження на раму.

Зовнішні сили на раму діють з боку пневматичного привода та гвинтового фіксатора. Враховуються також гравітаційні сили. В результаті розрахунків одержані значення зусиль в стрижнях рами (рис. 9.37).

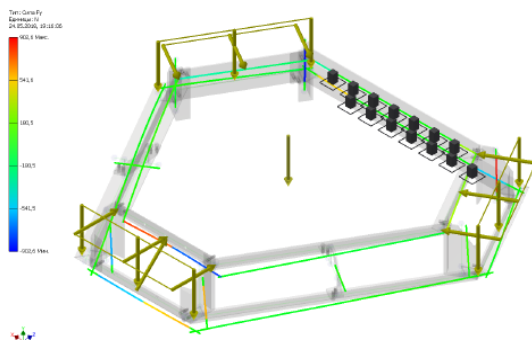


Рис. 9.37. Результати розрахунку навантажень в стрижнях рами мобільного робота

Навантаження в стійках є найбільшими і складають близько 900Н. Стійки розташовані в області кронштейна та в нижньому поясі рами навантажені зусиллями близько 550Н.

Встановлено, що значні навантаження (близько 815 Н) мають місце в стрижнях верхнього пояса рами. Стрижні нижнього пояса навантажені зусиллями 450...500Н. Інші стрижні рами навантаженні зусиллями 150 Н і нижче.

Згідно другого підходу до аналізу напружено-деформованого стану несучої системи мобільного робота є застосування методу кінцевих елементів [80].

При цьому несуча система робота навантажувалась діючими силами відповідними дії приводів зміни довжини штанг, а корисне навантаження задавалось у вигляді головного вектора та головного моменту.

Розглянута схема навантаження при якій головний вектор сил, що діють на виконавчий орган розміщено вертикально, а вектор головного моменту орієнтовано на вісі z (рис. 9.38).

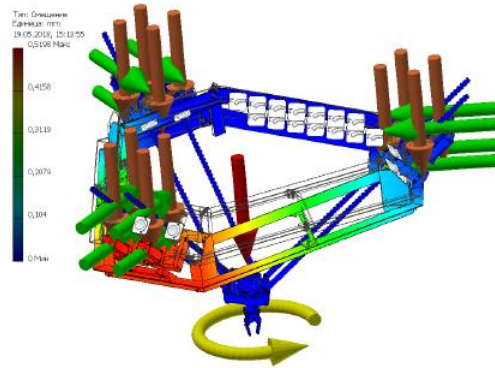


Рис. 9.38. Результати розрахунку напружено-деформованого стану несучої системи мобільного робота при дії вертикального навантаження та крутного моменту відносно вертикальної вісі

Максимальні деформації несучої системи робота складають близько 0,52 мм.

Проведено розрахунки напружено-деформованого стану робота при дії навантажень у трьох взаємно-перпендикулярних напрямках. Визначено деформації несучої системи робота при дії навантажень в площині рами (рис. 9.39).

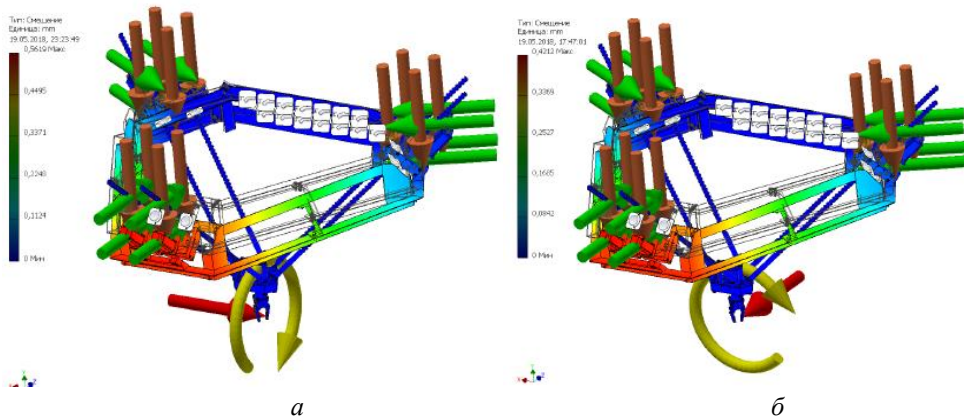


Рис. 9.39. Схеми навантаження мобільного робота в горизонтальній площині та результати розрахунків напружено деформованого стану несучої системи робота: а – навантаження в напрямку вісі  $x$ ; б – навантаження в напрямку вісі  $y$

В результаті розрахунків встановлено, що горизонтальні навантаження в різних напрямках викликають деформації несучої системи які складають 0,42...0,56 мм. Загалом характер деформації рами є однотипним. Мають місце зміщення верхнього і нижнього поясів та деформації штанг.

Проведено розрахунок напружено-деформованого стану несучої системи роботи при дії просторового навантаження (рис. 9.40).

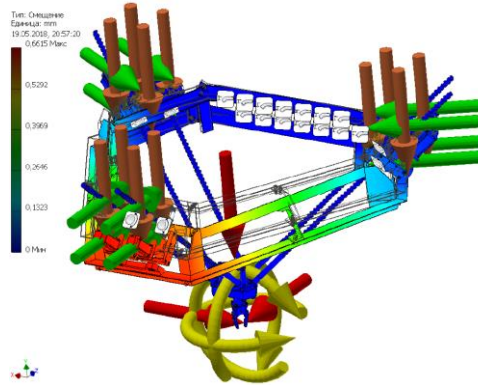


Рис. 9.40. Схеми просторового навантаження несучої системи мобільного робота та результати розрахунку його напружено-деформованого стану

Деформації рами при просторовому навантаженні складають близько 0,7 мм. Має місце депланація рами та вертикальне зміщення схвата робота. Пружна система комплексу є суттєво нелінійною. В ній наявні деформовані вузли і люфтові з'єднання, значна кількість елементів із підвищеними дисипативними властивостями. Для їх дослідження застосовані спеціальні методи які викладені у наступному підрозділі.

Для забезпечення необхідної жорсткості системи використовується додатковий маніпулятор який встановлюється на виконавчому органі робота і жорстко закріплений на об'єкті (рис. 9.41).

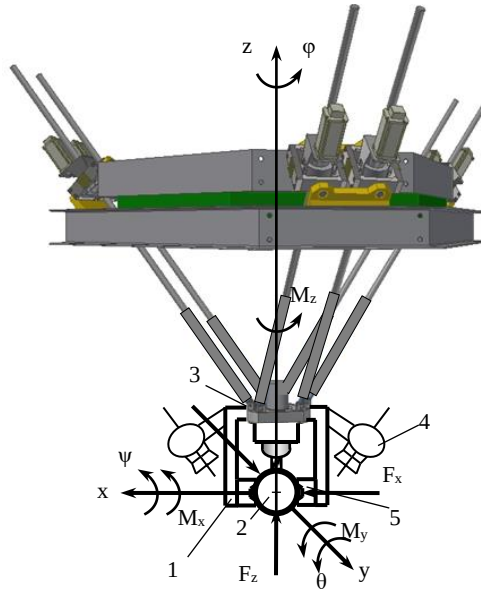


Рис. 9.41. Мобільний роботизований комплекс на основі механізма-гексапода із додатковим маніпулятором закріпленим на об'єкті

Маніпулятор має ланки змінної довжини 1 які зв'язують об'єкт 2 із платформою робота 3.

Робот має систему сканерів 4 які забезпечують виміри форми і розмірів об'єкта та його взаємодію із схватом робота 5 встановленим на платформі 3.

При використанні додаткового маніпулятора пружна система робота ускладнюється. Платформа робота 3 зв'язана із його рамою підтримується додатковим маніпулятором, що закріплено на нерухомому об'єкті (рис. 9.42).

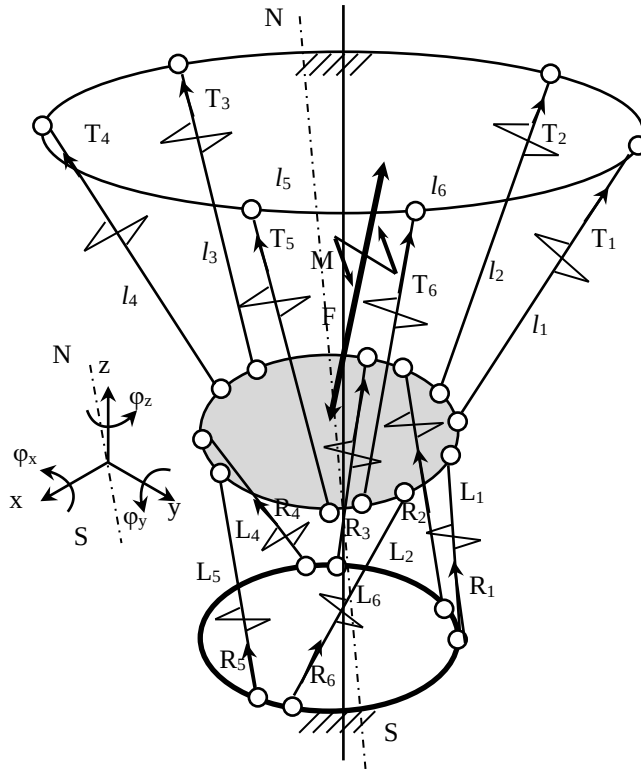


Рис. 9.42. Схема дії силових факторів в мобільному роботизованому комплексі на основі механізму-гексапода із додатковими маніпулятором закріпленим на об'єкті

Навантаження на робочий орган робота приводить до деформації несучої системи, яка характеризується вектором  $x$ -координат платформи:

$$[x_i] = [x \quad y \quad z \quad \mu\varphi_x \quad \mu\varphi_y \quad \mu\varphi_z]^T,$$

де  $x, y, z$  – переміщення центра  $P$  платформи в напрямках вісей  $x, y, z$  базової системи координат пов'язаної із оброблюваним об'єктом;  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  – кути повороту платформи відносно вісей базової системи координат;  $\mu$  – масштабний множник який дорівнює середній довжині штанг робота і має розмірність довжини.

Введення масштабного множника приводить вектор  $x$  – координат до однорідного виду.

Вектор зусилля  $(f_i)$  на виконавчий орган пов'язані з його переміщеннями через матрицю жорсткості  $[C_{ij}]$  відносно залежності:

$$[f] = [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T = [C_{ij}] \cdot [x_i],$$

де  $F_x, F_y, F_z$  – проекції головного вектора сил, що діють на платформу на осі базової системи координат;  $M_x, M_y, M_z$  – проекції головного моменту.

Загальна матриця жорсткості мобільного комплексу є сумою матриць жорсткості маніпулятора  $[C_{ij}^M]$  та робота  $[C_{ij}^B]$ . Відповідно:

$$[C_{ij}] = [C_{ij}^M] + [C_{ij}^B].$$

Матриця жорсткості робота-гексапода визначена згідно методики яка наведена вище. При цьому задавались проекції вектора силових факторів та вимірювались переміщення платформи по 6-ти координатам. Знайдена матриця деформативності використовувалась для визначення матриці жорсткості робота та маніпулятора.

Числові значення матриці жорсткості стрижневої системи робота одержані у наступному виді:

$$[C_{ij}^B] = \begin{pmatrix} 839 & 0 & 0 & 0 & -7525 & -2.78 \\ 0 & 7229 & 3.08 & 6828 & 0 & 0 \\ 0 & 3.08 & 44381 & 3.17 & 0 & 0 \\ 0 & 6828 & 3.17 & 7081 & 0 & 0 \\ -7525 & 0 & 0 & 0 & 7621 & 2 \\ -2.78 & 0 & 0 & 0 & 2 & 5.29 \end{pmatrix} \cdot 10^6 \frac{H}{мкм}.$$

Складові матриці жорсткості маніпулятора на один-два порядки вище. Визначена шляхом розрахунків жорсткості маніпулятора має вигляд:

$$[C_{ij}^M] = \begin{pmatrix} 17.2 & 0 & 0 & 0 & -0.74 & -0.11 \\ 0 & 146 & 0.15 & 0.62 & 0 & 0 \\ 0 & 0.15 & 184 & 0.18 & 0 & 0 \\ 0 & 0.62 & 0.18 & 115 & 0 & 0 \\ -0.74 & 0 & 0 & 0 & 9.3 & 0.2 \\ -0.11 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 125 \end{pmatrix} \cdot 10^8 \frac{H}{мкм}$$

В матрицях жорсткості виділено характерні блоки у вигляді квадратних матриць розмірністю 3. Блоки матриці являють собою поступальну  $(C_{ij}^П)$ , крутильну  $(C_{ij}^G)$  та сполучну  $(C_{ij}^S)$  жорсткість відповідно структурі матриці:

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} (C_{ij}^{\Pi}) & (C_{ij}^S) \\ (C_{ij}^S) & (C_{ij}^G) \end{bmatrix}.$$

Для матриці жорсткості робота блок поступальної жорсткості:

$$[C_{ij}^{\Pi}] = \begin{bmatrix} 839 & 0 & 0 \\ 0 & 7229 & 3.08 \\ 0 & 3.08 & 44381 \end{bmatrix} \cdot 10^6 \frac{H}{\text{мм}}.$$

Блок сполучної жорсткості:

$$[C_{ij}^S] = \begin{bmatrix} 0 & -7525 & -2.78 \\ 6828 & 0 & 0 \\ 3.17 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^6 \frac{H}{\text{мм}}.$$

Блок крутильної жорсткості:

$$[C_{ij}^G] = \begin{bmatrix} 7081 & 0 & 0 \\ 0 & 7621 & 2 \\ 0 & 2 & 5.29 \end{bmatrix} \cdot 10^6 \frac{H}{\text{мм}}.$$

Для матриці жорсткості маніпулятора відповідні блоки мають вигляд:

$$[C_{ij}^{\Pi}] = \begin{bmatrix} 17.2 & 0 & 0 \\ 0 & 146 & 0.15 \\ 0 & 0.15 & 184 \end{bmatrix} \cdot 10^8 \frac{H}{\text{мм}},$$

$$[C_{ij}^S] = \begin{bmatrix} 0 & -0.74 & -0.11 \\ 0.62 & 0 & 0 \\ 0.18 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^8 \frac{H}{\text{мм}},$$

$$[C_{ij}^G] = \begin{bmatrix} 11.5 & 0 & 0 \\ 0 & 9.3 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 12.5 \end{bmatrix} \cdot 10^8 \frac{H}{\text{мм}}.$$

Максимальна крутильна жорсткість відносно осі  $x$  спостерігається при розміщенні полюсу рухомої платформи над центром шарніру основи, розміщеного у площині  $uOz$ , а максимальна крутильна жорсткість відносно осі  $y$  – при розміщенні центру рухомої платформи між двома протилежними шарнірами основи.



Власні значення матриць поступальної  $[C_{ij}^P]$  та крутильної  $[C_{ij}^G]$  жорсткості являють собою напівосі відповідних еліпсоїдів жорсткості, а власні вектори задають їх напрямки у просторі (рис. 9.43).

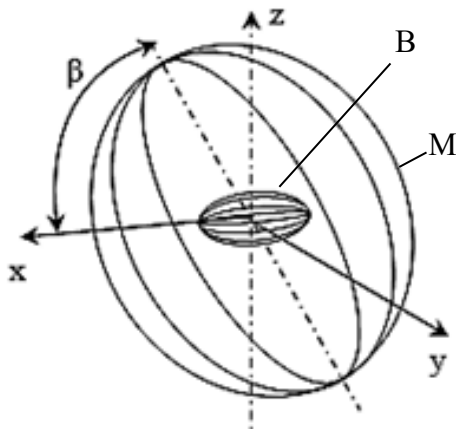


Рис.9.43. Еліпсоїди жорсткості робота В і маніпулятора М

Мобільний комплекс являє собою складний механізм, який об'єднує два механізма-гексапода із спільною рухомою платформою побудований по дуальній схемі. Жорсткості окремих механізмів є суттєво різними. Це простежується на розмірах і орієнтації еліпсоїдів жорсткості.

Для аналізу жорсткості складових загального механізму матриці жорсткості подані у вигляді графів (рис. 9.44).

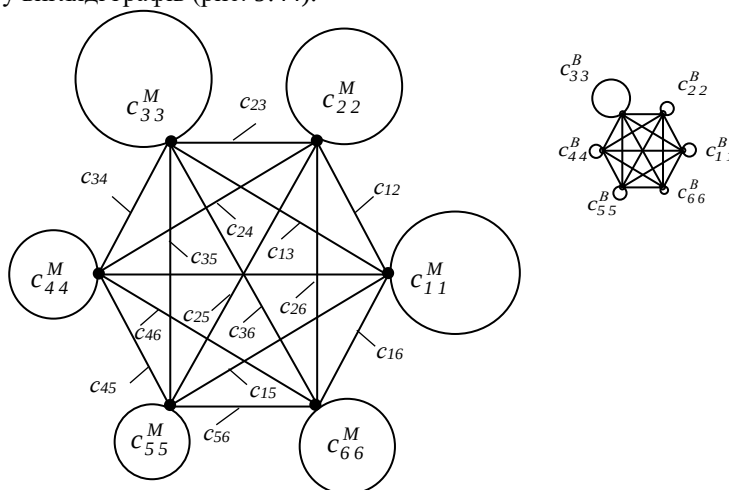


Рис. 9.44. Подання матриць складових механізмів мобільного комплексу у вигляді графів: а – матриця жорсткості маніпулятора; б – матриця жорсткості робота

Вершини графів визначають індекси компонент матриць жорсткості, а ребра - значення компоненти.

Із порівняння графів випливає, що компоненти матриць жорсткості маніпулятора значно перевищують компоненти матриці жорсткості робота (крім компонента  $c_{33}$ ). Тому з достатньою для практики точністю можна прийняти:

$$[c_{ij}] = [c_{ij}^M] + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33}^B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Відповідно опір пружної системи робота при переміщенні платформи маніпулятором буде незначним у всіх напрямках, крім напрямку який відповідає напрямку рівномірного розтягу-стиску штанг робота. Відповідно деформативність системи в напрямку N-P-S (див. рис.9.42) є мінімальною.

На основі проведених досліджень встановлено, що поліпшення статичних характеристик мобільних роботів найбільш ефективно провести на основі методів Монте-Карло застосованих для визначення точної позиції маніпулятора. При цьому статичні характеристики встановлюються на основі розвинених в процесі досліджень методів гвинтового числення застосовуваних для визначення силових гвинтів, що описують статика мобільного робота.

Обмеження на алгоритми керування маніпуляторів мобільних роботів при їх русі на особливих ділянках траєкторій визначаються умовами статичної рівноваги робота цілому. Дані умови залежать від конфігурації маніпулятора, положення шасі на дорозі та пружності дорожнього полотна. Обмеження встановлюють ділянки робочої зони маніпулятора, які рекомендуються для забезпечення статичної стійкості наземного роботизованого комплексу.

Матричні характеристики просторової жорсткості маніпуляторів мобільних роботів доцільно визначати на основі методів гвинтового числення, подаючи динамічні навантаження у вигляді системи трьох взаємно перпендикулярних силових гвинтів. При цьому мікропереміщення маніпуляторів визначаються геометричним гвинтом орієнтованим в просторі, а макропереміщення визначаються геометричними гвинтами складові яких мають нелінійні та гістерезисні складові, що визначають особливості пружно-дисипативних систем мобільних роботів які включають маніпулятор і шасі.

Маніпулятори мобільних робототехнічних комплексів побудовані на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами, забезпечують найбільш раціональне сприйняття сил і моментів і мають оптимальні статичні характеристики

## РОЗДІЛ 10

### Енергетичні та динамічні процеси в наземних роботизованих комплексах

#### 10.1. Нелінійні гістерезисні характеристики жорсткості елементів наземних роботизованих комплексів

Мобільні роботи мають велику кількість рухомих вузлів і деталей. В них мають місце складні пружно-дисипативні процеси. Тому характеристики жорсткості наземних роботизованих комплексів є нелінійними, а при деформації мають місце гістерезисні явища. При статичному деформуванні комплексу в цілому та його елементів має місце відхилення від лінійної деформативної характеристики. Тому визначені раніше матричні характеристики жорсткості ускладнюються. Для встановлення особливостей характеристик жорсткості при наявності дисипативних процесів розглянемо окрему частину наземного роботизованого комплексу у вигляді стрижня, який має суттєві дисипативні властивості [79].

Для стрижня виготовлено із квазіоднорідного матеріалу із значним внутрішнім тертям деформативна характеристика є неоднозначною і в ідеальному випадку має вигляд еліпса (рис. 10.1).

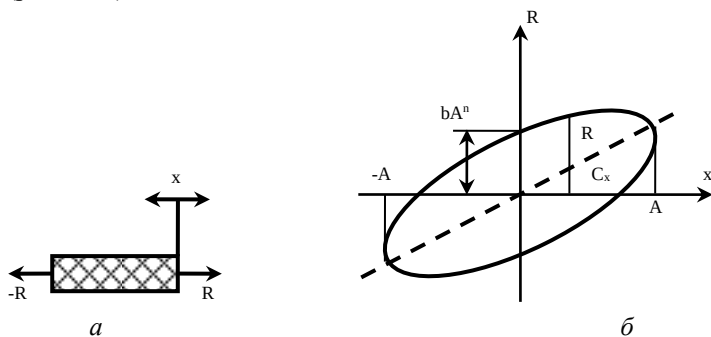


Рис. 10.1. Схема деформування стрижня в матеріалі якого має місце значне внутрішнє тертя (а) та взаємозв'язок деформацій із діючою силою який є гістерезисною характеристикою стрижня (б)

Внутрішнє тертя в матеріалі стрижня при циклічному деформуванні супроводжується явищем гістерезису, яке описується нелінійною залежністю приведеної сили непружного опору  $R$  від переміщенням  $x$ :

$$R = \pm bA^n \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}}.$$

де  $b$  та  $n$  – константи, що зумовлюють рух системи;  $A$  – амплітуда циклічних деформацій.

Розв'язуючи рівняння відносно  $x$  визначимо:

$$x = A \sqrt{1 - \frac{R^2}{b^2 A^{2n}}}.$$

В окремих випадках приймається значення константи  $n=1$ . При цьому:

$$R = \pm b A^n \sqrt{1 - (x/A)^2}, \quad x = A \sqrt{1 - (R/bA)}.$$

Константи  $n$  і  $A$ , як правило, знаходяться із результатів вимірів параметрів власних затухаючих коливань. При цьому зразок виводиться із стану статичної рівноваги ударним навантаженням і фіксується затухаючий коливальний процес та вимірюється його огиначна. При незначних внутрішніх втратах енергії частота коливань змінюється мало і коливальний процес описується залежністю:

$$x(t) = A(t) \cdot \sin(\omega_0 t),$$

де  $A(t)$  - змінна в часі амплітуда коливань (огиначна) процесу;  $\omega_0$  - власна частота коливань.

Для гістерезисної характеристики при  $n=1$  залежність огиначної від часу має вигляд:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{b\omega_0 t}{2\pi}},$$

Для гістерезисної характеристики загального виду ( $n \neq 1$ ) огиначна визначена формулою:

$$A(t) = \frac{A_0}{\sqrt[n-1]{1 + (n-1)bA_0^{n-1} \cdot \omega_0 t / 2\pi}},$$

В формули входять параметри  $b$  і  $n$ , які визначаються по результатам експериментальних вимірів. Методика вимірів включає імпульсне (ударне) навантаження комплексу в необхідному місці та у відповідному напрямку (рис. 10.2).

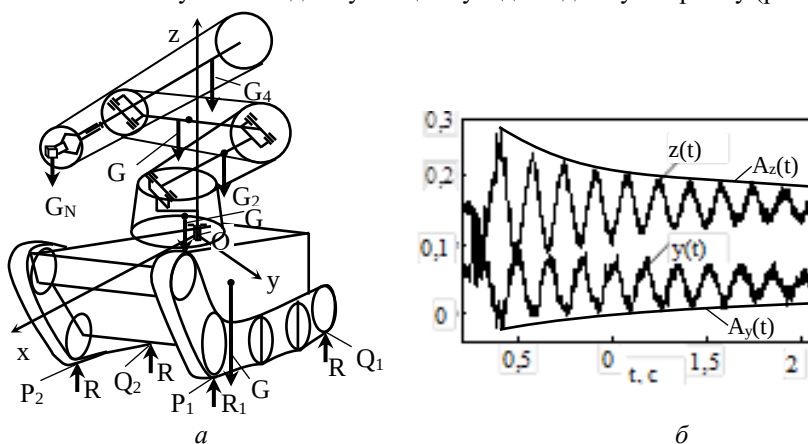


Рис. 10.2. Навантаження комплексу імпульсними силами (а) та реєстрація власних коливань виконавчого пристрою в напрямку  $z$  та в напрямку  $y$  (б)

Апроксимуючи оригінальні  $A_z(t)$  та  $A_y(t)$  визначають параметри  $n$  і  $b$ , які є інтегральними характеристиками дисипації енергії в системі «комплекс-грунт». Дана методика є корисною і перспективною, але потребує подальшої розробки і уточнення.

Більш надійною і точною є методика статичного виміру гістерезисних характеристик. Вона апробована при вимірах гістерезисних властивостей механічних систем маніпуляторів.

Гістерезисні характеристики визначаються по кожній із шести просторових координат окремої частини комплексу, наприклад маніпулятора. Для вимірів гістерезисних властивостей при поступальних переміщеннях застосовується динамометр для виміру сили, крутильні переміщення визначаються при дії на комплекс моменту. Із застосуванням навантажувального пристрою, що реалізує динамічний гвинт, одночасно забезпечується силове і моментне навантаження на комплекс [148].

Розглянемо методику і обладнання для визначення гістерезисних характеристик комплексу при поступальних переміщеннях. Проводиться навантаження комплексу у необхідній точці із одночасним виміром переміщення даної точки. Для навантаження використовується механічний гвинтовий пристрій, об'єднаний із двостороннім кільцевим динамометром (рис. 10.3).

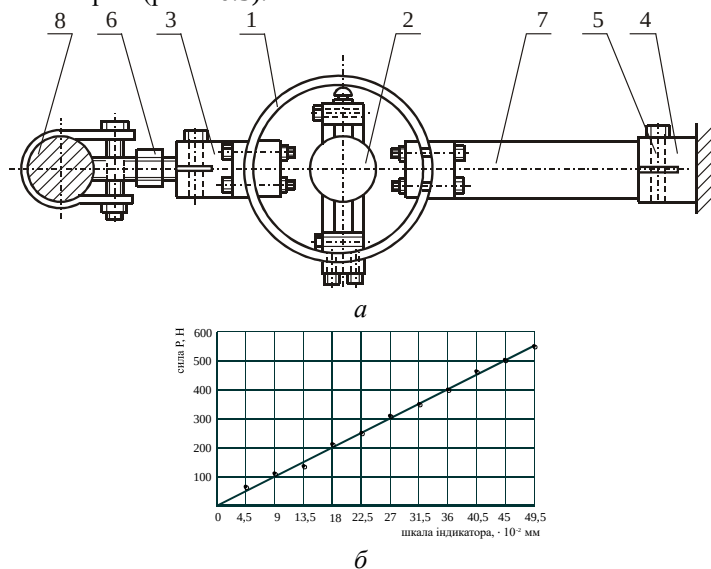


Рис. 10.3. Схема пристрою для створення і виміру циклічних знакозмінних навантажень на пружну систему комплексу (а) і тарувальний графік динамометра (б): 1- кільцева пружина; 2- індикатор; 3- безлюфтова гайка; 4-кронштейн; 5- гвинт; 6-різьбова тяга; 7-стрижень; 8-деталь комплексу

Пристрій має різбову тягу 6 з правою і лівою різью для навантаження системи. Розрізні гайки гвинта 3 компенсують люфти в різьбових з'єднаннях.

Зусилля, яке створюється гвинтом ресструється кільцевим динамометром, який має кільцеву пружину 1 та індикатор 2 з ціною поділки 0,01 мм для вимірів деформацій кільцевої пружини. Виміри переміщення об'єкту дослідження здійснюються індикаторами з ціною поділки 0,001 мм.

Навантажувальний пристрій забезпечує змінне навантаження комплексу в межах циклів з діапазоном навантаження  $-1 \text{ кН} \dots 1 \text{ кН}$  ( $\pm 100 \text{ кгс}$ ). Вигляд пристрою наведено на рис. 10.4.

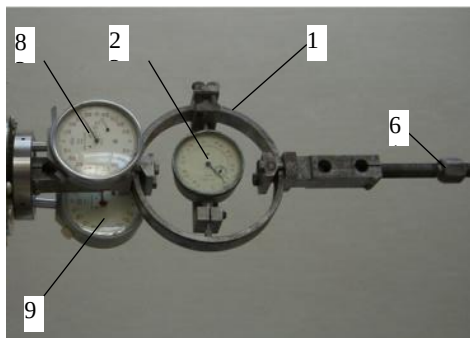


Рис. 10.4. Загальний вигляд пристрою для вимірів гістерезисних характеристик пружної системи роботизованого комплексу

Для виміру гістерезисних характеристик проводиться циклічне покрокове навантаження комплексу з вимірами переміщень комплексу у відповідному напрямку.

Навантаження є знакозмінними і циклічно змінюється кілька разів забезпечуючи переміщення окремих точок комплексу із виявленням гістерезисних явищ пружно-деформативної системи комплексу. Для частини пружно-деформативної системи комплексу із нелінійними властивостями характеристика є близькою до еліптичної (рис. 10.5).

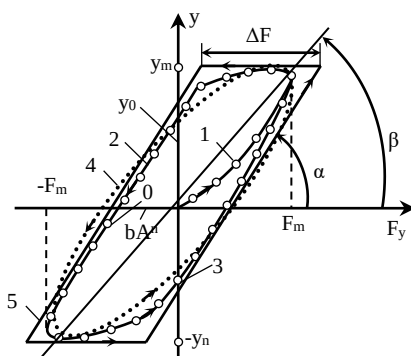


Рис. 10.5. Приклад вимірів гістерезисної характеристики нелінійної пружно-дисипативної механічної системи у вигляді стрижня із пружно-дисипативними властивостями

Під дією сили  $F_y$  в додатньому напрямку від  $F_y = 0$  до  $F_y = F_m$  має місце нелінійний закон деформації стрижня (крива 1). При зниженні навантаження від значення  $F_m$  до нуля, зміна довжини стрижня відбувається за нелінійним законом. При цьому нульовому навантаженню  $F_y = 0$  відповідає деформація стрижня  $y_0$ .

При дії сили  $F_y$  у від'ємному напрямку відбувається зменшення довжин стрижня згідно нелінійного закону (крива 2). Від'ємна сила  $F_0 = -bA^n$  відповідає нульовому видовженню стрижня ( $y=0$ ). Подальше збільшення сили у від'ємному напрямку до величини  $-F_m$  приводить до стиску стрижня на величину  $y_n$ . Гілка характеристики відповідна кривій 3 має місце при змінах навантаження від  $F_y = -F_m$  до  $F_y = +F_m$ .

Подальша циклічна зміна навантаження в межах  $F_m$ ;  $-F_m$  забезпечує зміну довжини стрижня по закону близькому до еліптичної кривої, який визначено нелінійними законами відповідними кривим 2 і 3. Дані криві близькі до еліпса 4 та знаходяться в межах паралелограма 5.

Для опису гістерезисної характеристики стрижня використовується еліпс 4 або паралелограм 5. При цьому в якості характерних параметрів використовується кут нахилу однієї із вісей еліпса  $\beta$  та відношення напіввісей еліпса. Для практичного застосування більш зручним є опис гістерезисної характеристики паралелограмом 5. Характеристичними параметрами при цьому є кут нахилу сторони паралелограма  $\alpha$  та ширина петлі гістерезису  $\Delta F$ .

Розглянута характеристика відповідає спрощеній пружно-дисипативній системі роботизованого комплексу у вигляді стрижня із близькими параметрами деформативності при розтягу-стиску. Для реальних складних пружно-деформованих механічних систем роботизованих комплексів гістерезисні характеристики є нелінійними і відрізняються від еліпса чи паралелограма. Гілки гістерезисної характеристики, як правило, являють собою криві двоякої кривизни (рис. 10.6).

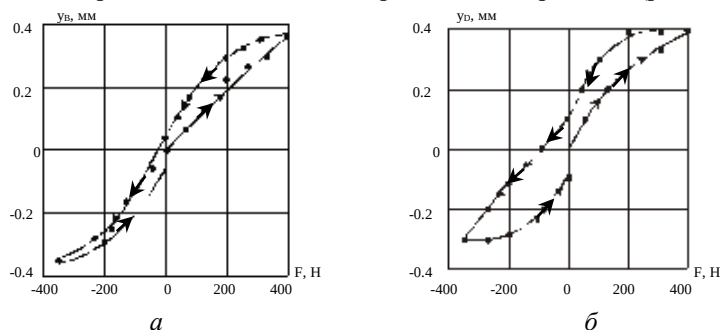


Рис. 10.6. Експериментально визначені нелінійні залежності переміщення точок маніпулятора мобільного робота від діючого навантаження визначені на різних ділянках маніпулятора: а – в кінці першого важеля; б – в області схвата

Характеристика навантаження-переміщення має петлеподібну форму. Ширина петлі сягає 0,1...0,2 мм по переміщенню та 30...100 Н по силі. Специфічна форма залежності пояснюється контактними деформаціями, що мають місце в з'єднаннях деталей маніпулятора. Показники жорсткості при переміщенні є змінними і мають складний характер залежності переміщення від діючого навантаження. В кінці циклу навантаження спостерігаються ділянки постійних значень переміщення.

При зменшенні амплітуд навантаження петлеподібні ділянки зосереджуються в межах огиального контуру, що в цілому відповідає гістерезисній характеристиці системи (рис. 10.7 а).

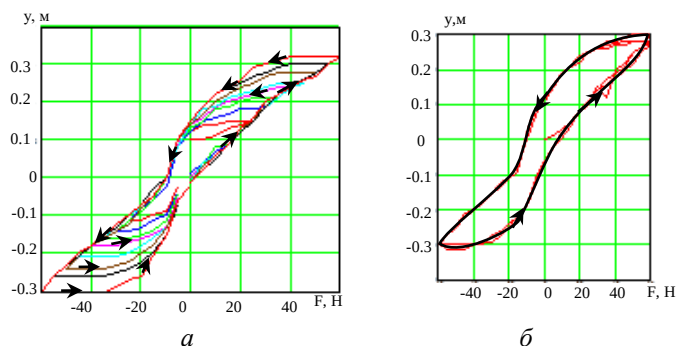


Рис. 10.7. Характеристика деформативності нелінійних пружних систем маніпуляторів: а – петлеподібні характеристики при різних амплітудах циклового навантаження; б – випадкові зміни характеристики при повторних циклах навантаження

Ширина характеристики по навантаженню змінюється незначним чином, а висота характеристики по переміщенню зменшується пропорційно амплітуді навантаження. Повтор циклів навантаження приводить до незначних змін характеристики (рис. 10.7 б). Зміни обумовлені випадковими похибками вимірів, що мають місце при експериментальному вимірі характеристик.

Випадкові похибки є незначними для систем із стабільними характеристиками. В окремих випадках мають місце суттєві зміни пружно-дисипативних параметрів системи. При цьому гістерезисні характеристики набувають складної форми із ділянками суттєвих нелінійностей (рис. 10.8).

Нелінійності характеристик відображають сприйняття розтягуючих і стискаючих навантажень пружно-дисипативною системою. При стиску навантажених з'єднань мають місце нестационарні зміни процесів сухого тертя, відбувається хаотичні мікропереміщення контактуючих деталей із періодичним проковзуванням.

Внаслідок різниці сили тертя спокою та сили тертя руху, реакція контакту періодично змінюється. Це приводить до хвилеподібних змін гістерезисної характеристики на ділянці стискаючих навантажень (рис. 10.8 а). Зміни характеристик мають невизначений характер і змінюються по окремим циклам навантаження.



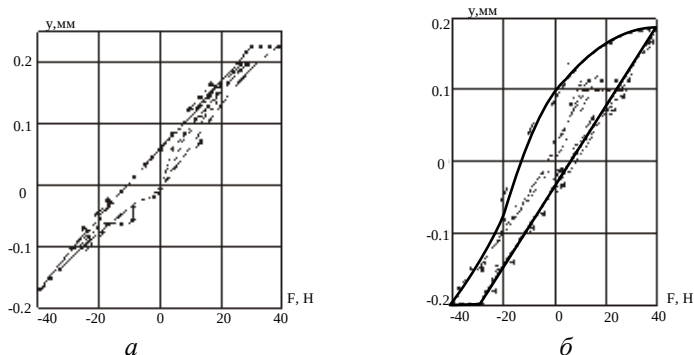


Рис. 10.8. Характеристики деформативності пружних систем із нелінійними характеристиками жорсткості: а – характеристика із суттєвими змінами в області стискаючих навантажень; б – характеристика із суттєвими нелінійностями в області розтягуючих навантажень

Для розтягуючих навантажень нелінійності спричинені в основному люфтовими з'єднаннями. Дія розтягуючих навантажень інтенсифікує розкриття зазорів у люфтових з'єднаннях, що приводить до розширення петлі гістерезису в області максимальних розтягуючих навантажень (див. рис. 10.8 б).

Гістерезис зумовлений необоротними змінами в контактах і деталях маніпулятора, які виникають від дії зовнішніх навантажень. Внаслідок цього після припинення дії навантаження має місце зміна положення виконавчого органу маніпулятора.

Врахування гістерезисних явищ необхідно для визначення чутливості роботів по окремим координатам та для встановлення точності позиціонування роботів.

Вид і параметри характеристики змінюється при багатокоординатних циклових навантаженнях силою з різним діапазоном зміни. Для визначення характеру зміни гістерезисних характеристик при багатоциклових навантаженнях. Проведено виміри переміщень при кількох циклах навантаження маніпулятора. Навантаження здійснювалось в різних точках маніпулятора, зокрема в області схвата та в кінці першого важеля (рис. 10.9).

При першому циклі навантаження має місце петлеподібна характеристика у вигляді кривої 0, 1, 2, 3. Зниження навантаження від нуля до  $F=-400\text{H}$  відповідає ділянці кривої 3-4. Спостерігається деяке залишкове зміщення схвата маніпулятора у вигляді різниці ординат точок 2 і 4. Подальше збільшення навантаження від  $F=-400\text{H}$  до  $+400\text{H}$  формує гілку характеристики у вигляді кривої 4-5. Таким чином деформації маніпулятора в області схвата обумовлюють зміни характеристики при різних циклах навантаження.

Характеристика виміряна в кінці першого важеля (рис. 10.9 б) має аналогічний вигляд, але петля гістерезису є достатньо вузькою. Ширша петлі гістерезису знаходиться в межах  $0,01\dots 0,05$  мм. Спостерігаються невизначені зміни

характеристики в межах петлеподібної ділянки. Залежність переміщення від навантаження має характер близький до лінійного. Відхилення не перевищують 50 Н.

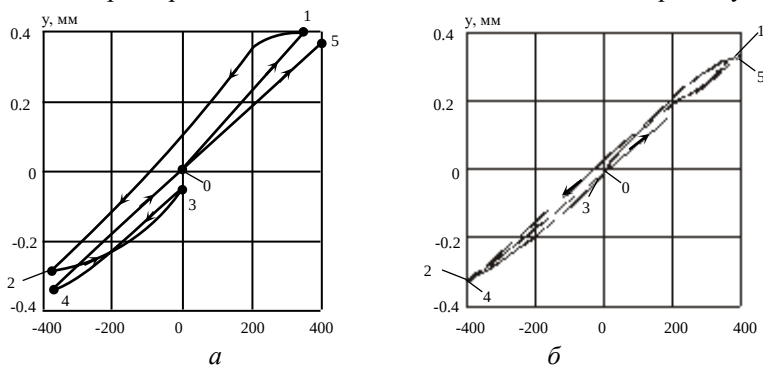


Рис. 10.9. Гістерезисні характеристики маніпулятора мобільного робота при кількох циклах навантаження: а – характеристика, виміряна в області схвата маніпулятора; б – характеристика, виміряна в кінці першого важеля

Встановлені закономірності зміни параметрів не є строго детермінованими. Повторення експериментальних вимірів приводить до результатів які дещо відрізняються від визначених раніше. Це особливо проявляється при змінах знаку навантаження.

Для встановлення впливу випадкових факторів на вид і характер гістерезисної характеристики проведені багато циклові навантаження маніпулятора. Здійснювалось значне число вимірів 500 і більше. Одержані результати вимірів узагальнювались у вигляді набору характеристик (рис. 10.10).

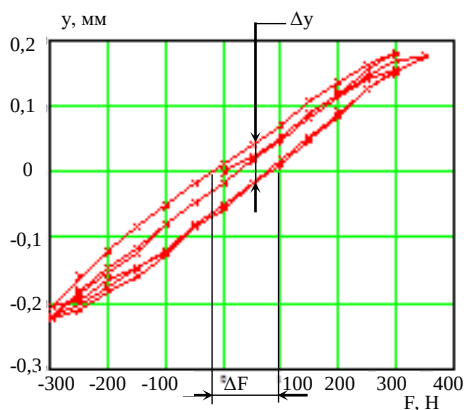


Рис. 10.10. Гістерезисна характеристика маніпулятора при багато циклових навантаженнях

По результатам вимірів знайдені середні параметри ширини петлі гістерезису по силі  $\Delta F$  та по переміщенню  $\Delta y$ .

На відміну від наведених раніше графіків залежність має характер близький до лінійного. На ділянці малих навантажень наявні нелінійності характеристики. Ширина петлі гістерезису по переміщенню складає близько 0,1 мм. Загалом при знакопостійному навантаженні залежність переміщення від навантаження є близькою до лінійної. Лінійна залежність не проходить через початок координат. Це пояснюється тим що середнє положення об'єкта є невизначеним і змінюється під дією різноманітних факторів. Для встановлення зміни положень об'єкта проведені виміри його переміщень при чотирьох знакозмінних циклах навантаження.

При вимірах систем різної жорсткості петле подібні характеристики є зміщеними на різні кути відносно осі абсцис (рис. 10.11).

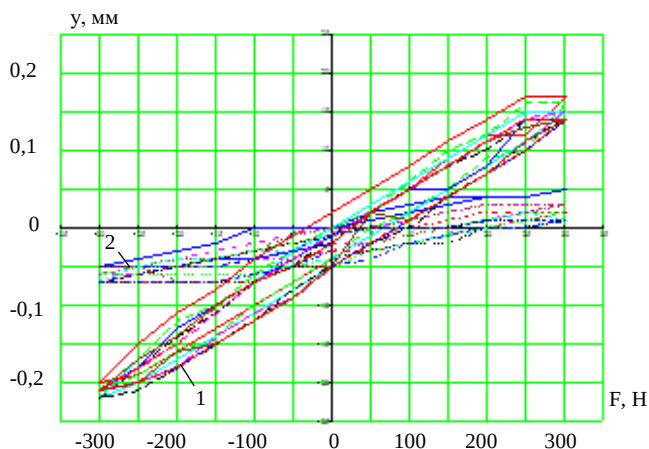


Рис. 10.11. Нелінійні деформаційні характеристики пружних механічних систем маніпуляторів різної жорсткості

При незначних навантаженнях ширина петлі гістерезису мало змінюється в залежності від діючого навантаження. Тому характеристика 1 системи з більшою жорсткістю та характеристика 2 системи з меншою жорсткістю мають близькі значення ширини петель.

Графіки переміщення системи під дією сили мають вигляд петлеподібних кривих. Для першої системи ширина петлі гістерезису складає 0,06...0,1 мкм, а для другої 0,05...0,08 мкм.

При деформації пружної системи мають місце нелінійні, пружно-дисипативні процеси в контактах між деталями. Враховуючи велику кількість пар контакту (20 і більше), наявність даних процесів приводить до невизначеності (випадковості) загальних характеристик жорсткості. Розроблена методика враховує наявність випадкових змін параметрів жорсткості маніпулятора.

Для встановлення впливу випадкових факторів на гістерезисну характеристику маніпулятора проведено виміри значного числа циклів навантажень (порядка 20). Число точок вимірів склало близько 500.

В результаті експериментів визначено точкові значення переміщення об'єкта при циклічній зміні сили (рис. 10.12).

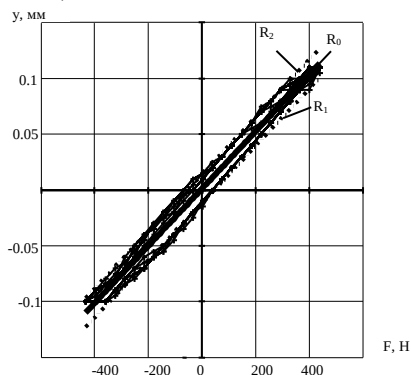


Рис. 10.12. Експериментально визначені переміщення схвата робота під дією знакозмінного циклічного навантаження

Одержані значення характеристики по циклах охоплюють полосу, яка має дві граничні області  $R_1$  і  $R_2$  та середню лінію  $R_0$ . Розташування граничних областей і середньої лінії знайдено в результаті статистичної обробки одержаних значень.

Одержані результати оброблені по спеціально розробленій програмі на ЕОМ.

Комп'ютерна обробка результатів вимірів дала можливість встановити параметри петлі гістерезису при переміщенні схвата під дією сили. Основні параметри деформаційної характеристики знаходяться в межах полоси шириною до 0,1 мм. Загальна характеристика жорсткості близька до лінійної. Тренди додатної  $R_1$  і від'ємної  $R_2$  гілок петлі гістерезису близькі між собою і відповідають лінійним регресійним моделям (рис. 10.13).

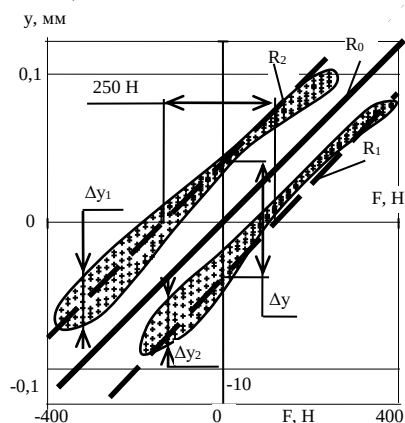


Рис. 10.13. Лінійні регресії і довірчі інтервали експериментально визначених точкових значень гістерезисної характеристики жорсткості маніпулятора при циклічному знакозмінному навантаженні

## 10.2 Динамічні характеристики наземних роботизованих комплексів

Переміщення кожної точки роботизованого комплексу,  $y_i$  є результатом реакції динамічної системи комплексу на всі вхідні дії  $x_j$ . Основними з них є навантаження в колісних парах або гусеничному русії, динамічні збурення обумовлені приводами або дією пострілів, ударів осколками і т.п. Вхідні дії локалізуються в певних точках і мають певний напрямок. Зокрема, це плавні вертикальні переміщення коліс чи катків гусениці  $x_1(t), \dots, x_j(t)$  (рис. 10.14 а).

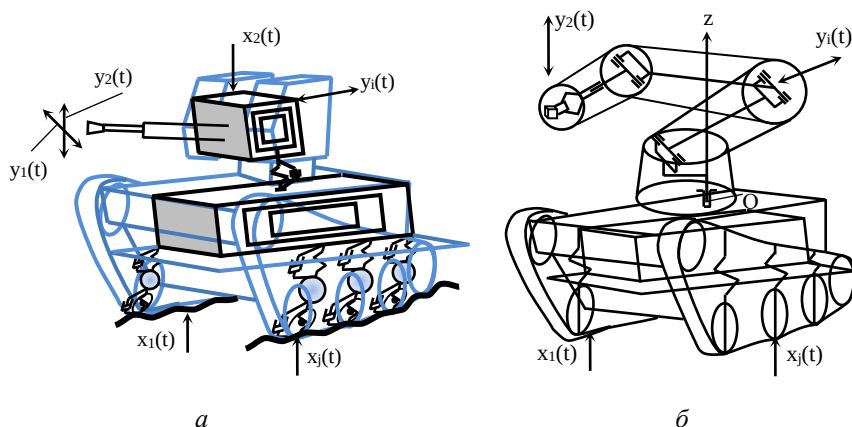


Рис. 10.14. Схеми робототехнічних комплексів різного виду та основні вхідні  $x_j(t)$  та вихідні  $y_i(t)$  параметри динамічних систем комплексів: а – комплекс із компактно розміщеними масами розподіленими по окремим вузлам; б – комплекс, маса якого зосереджена в різних точках

Вихідними параметрами динамічної системи комплексу є переміщення окремої точки у певному напрямку. Зокрема, вихідним параметром є горизонтальні  $y_1(t)$  та вертикальні  $y_2(t)$  переміщення ствола, або переміщення  $y_i(t)$  бойового модуля у певному напрямку.

Наземні роботизовані комплекси призначені для роботи з небезпечними об'єктами і працюють в автономному режимі. Роботизовані комплекси мають незначну масу і габарити. При цьому статична і динамічна жорсткість несучої системи роботизованого комплексу є недостатньою. Тому важливою проблемою є забезпечення необхідних динамічних характеристик роботизованих комплексів. Особливою частиною даної проблеми є забезпечення необхідних динамічних характеристик маніпуляторів мобільних роботів. Динамічні характеристики маніпуляторів мають суттєві особливості. Вони пов'язані із складних тью динамічних систем маніпуляторів, широким спектром динамічних навантажень. На динамічні процеси суттєво впливають нелінійності характеристик окремих вузлів та агрегатів маніпуляторів. Є значні особливості процесів демпфування в пружній системі маніпулятора. Існує значна відмінність динамічних характеристик маніпуляторів

розімкненого типу та маніпуляторів із паралельними кліматичними ланцюгами. Тому для забезпечення необхідних динамічних характеристик маніпуляторів мобільних роботів використані нові підходи. Вони побудовані на послідовному алгоритмі визначення динамічних характеристик на базі визначення інерційних властивостей маніпуляторів мобільних роботів та встановлення особливостей динамічних навантажень на маніпулятор із формуванням матричних динамічних характеристик маніпуляторів мікропереміщеннях та загальної характеристики сферичних рухів вузлів маніпуляторів при макропереміщеннях (рис. 10.15).



Рис. 10.15. Алгоритм формування підходів до забезпечення необхідних динамічних характеристик маніпуляторів мобільних роботів

Визначення інерційних властивостей маніпуляторів здійснено із врахуванням конструктивних особливостей мобільного робота.

Визначення інерційних властивостей маніпуляторів здійснено на основі аналізу конструктивної схеми маніпулятора. Для визначення приведених моментів інерції застосовані класичні методи теоретичної механіки [19]. Маніпулятор розглядається в нерухомій системі координат пов'язаній з шасі мобільного робота (рис. 10.16).

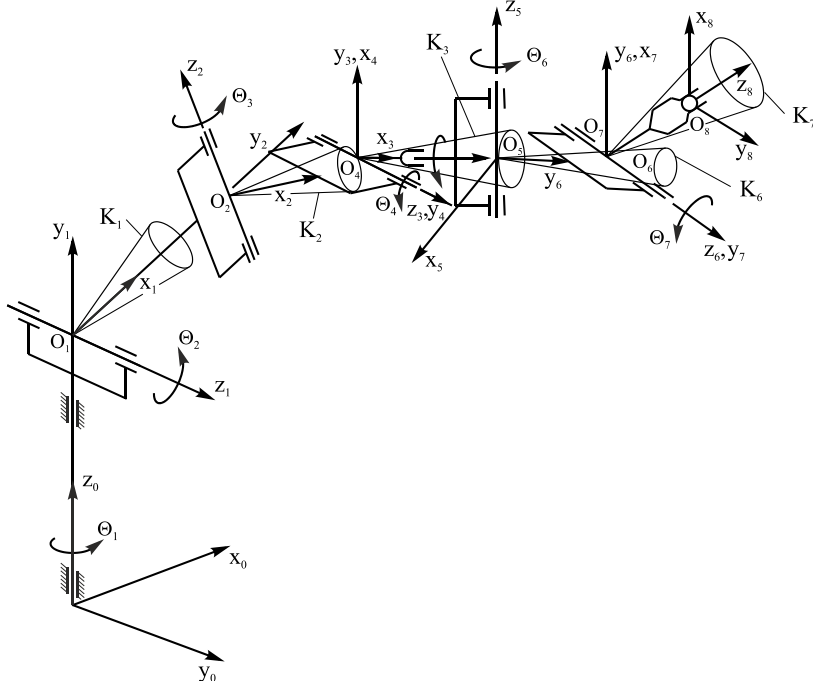


Рис. 10.16. Розрахункова схема маніпулятора мобільного робота

Розраховані моменти інерції ланки маніпулятора масою  $m_j$  відносно його головних (центральных) осей інерції  $x'_j, y'_j, z'_j$ . Вони складають  $J_{x'_j}^{(j)}, J_{y'_j}^{(j)}, J_{z'_j}^{(j)}$ . Тоді моменти інерції ланки відносно осей  $x_j, y_j, z_j$ , паралельних центральним, можна визначити за формулами:

$$J_{x_j}^{(j)} = m_j \left( {}^j y_{cj}^2 + {}^j z_{cj}^2 \right) + J_{x'_j}^{(j)};$$

$$J_{y_j}^{(j)} = m_j \left( {}^j x_{cj}^2 + {}^j z_{cj}^2 \right) + J_{y'_j}^{(j)};$$

$$J_{z_j}^{(j)} = m_j \left( {}^j x_{cj}^2 + {}^j y_{cj}^2 \right) + J_{z'_j}^{(j)},$$

де  ${}^j x_{cj}, {}^j y_{cj}, {}^j z_{cj}$  - координати центра мас  $C_j$  ланки в зв'язаній з ним системі координат  $x_j, y_j, z_j$ .

Моменти інерції  $j$ -ї ланки маніпулятора відносно довільних осей  $x, y, z$  обчислюються через головні моменти інерції за формулами:

$$J_x^{(j)} = m_j \left( z_{cj}^2 + y_{cj}^2 \right) + J_{x'_j}^{(j)} \alpha_{11}^2 + J_{y'_j}^{(j)} \alpha_{12}^2 + J_{z'_j}^{(j)} \alpha_{13}^2;$$

$$J_y^{(j)} = m_j \left( x_{cj}^2 + z_{cj}^2 \right) + J_{x'_j}^{(j)} \alpha_{21}^2 + J_{y'_j}^{(j)} \alpha_{22}^2 + J_{z'_j}^{(j)} \alpha_{23}^2;$$

$$J_z^{(j)} = m_j \left( x_{cj}^2 + y_{cj}^2 \right) + J_{x'_j}^{(j)} \alpha_{31}^2 + J_{y'_j}^{(j)} \alpha_{32}^2 + J_{z'_j}^{(j)} \alpha_{33}^2.$$

Тут  $\alpha_{11}$  - напрямні косинуси кутів між осями  $X_j', Y_j', Z_j'$  і  $x, y, z$  відповідно.

Момент інерції  $j$ -ї ланки маніпулятора відносно довільної осі  $z$  визначається виразом:

$$J_z^{(j)} = \left[ J_{x_j}^{(j)} - m_j \left( {}^j y_{cj}^2 + {}^j z_{cj}^2 \right) \right] \alpha_{31}^2 + \left[ J_{y_j}^{(j)} - m_j \left( {}^j x_{cj}^2 + {}^j z_{cj}^2 \right) \right] \alpha_{32}^2 + \\ + \left[ J_{z_j}^{(j)} - m_j \left( {}^j x_{cj}^2 + {}^j y_{cj}^2 \right) \right] \alpha_{33}^2 + m_j \left( x_{cj}^2 + y_{cj}^2 \right).$$

Якщо вісь  $z$  є віссю обертання  $i$ -ї ланки ( $z_i$ ) маніпулятора, то момент інерції  $j$ -ї його ланки відносно осі  $z_i$  (осі обертання  $i$ -ї ланки) з врахуванням прийнятих позначень можна визначити за формулою:

$$J_{z_i}^{(j)} = \left[ J_{x_j}^{(j)} - m_j \left( {}^j y_{cj}^2 + {}^j z_{cj}^2 \right) \right] m_{jz}^2 + \left[ J_{y_j}^{(j)} - m_j \left( {}^j x_{cj}^2 + {}^j z_{cj}^2 \right) \right] n_{jz}^2 + \\ + \left[ J_{z_j}^{(j)} - m_j \left( {}^j x_{cj}^2 + {}^j y_{cj}^2 \right) \right] p_{jz}^2 + m_j \left( {}^i x_{cj}^2 + {}^i y_{cj}^2 \right).$$

Тут  ${}^j x_{cj}, {}^j y_{cj}, {}^j z_{cj}$ , – координати центра мас  $C_j$  ланки  $j$  маніпулятора в системі координат  $X_i, Y_i, Z_i$ , зв'язаної з  $i$ -ю ланкою; величини  ${}^i m_{jz}^2, {}^i n_{jz}^2, {}^i p_{jz}^2$  є відповідними елементами матриці  ${}^i T_j = A_i \dots A_j$ , що має вигляд:

$${}^i T_j = A_i \dots A_j = \begin{matrix} & {}^i m_j & {}^i n_j & {}^i p_j \\ \begin{pmatrix} {}^i m_{jx} & {}^i n_{jx} & {}^i p_{jx} & {}^i a_j \\ {}^i m_{jy} & {}^i n_{jy} & {}^i p_{jy} & {}^i b_j \\ {}^i m_{jz} & {}^i n_{jz} & {}^i p_{jz} & {}^i c_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix},$$

де матриці  $A$  – це матриці елементарних переходів між сусідніми ланками маніпулятора.

Сумарний момент інерції  $J_{z_j} = D_{ij}$  всіх ланок маніпулятора, починаючи з  $(i+1)$ -ї й кінчаючи  $n$ -ю разом з виконавчим органом маніпулятора, визначиться виразом:

$$J_{z_i} = D_{ij} = \sum_{j=i+1}^n J_{z_i}^{(j)} = \sum_{j=i+1}^n m_j \left[ \left( k_{ix}^2 - {}^j z_{cj}^2 - {}^j y_{cj}^2 \right) {}^j m_{jz}^2 + \right. \\ \left. + \left( k_{iy}^2 - {}^j x_{cj}^2 - {}^j z_{cj}^2 \right) {}^j n_{jz}^2 + \left( k_{iz}^2 - {}^j x_{cj}^2 - {}^j y_{cj}^2 \right) {}^j p_{jz}^2 + {}^j x_{cj}^2 + {}^j y_{cj}^2 \right].$$

Тут, як уже зазначалось,  ${}^j x_{cj}^2, {}^j y_{cj}^2, {}^j z_{cj}^2$  – координати центра мас  $j$ -ї ланки маніпулятора, тобто точки  $C_j$ , в зв'язаній з цією ланкою системі координат  $X_j, Y_j, Z_j$ , а  ${}^i x_{cj}, {}^i y_{cj}, {}^i z_{cj}$  – координати того самого центра мас у системі координат  $X_i, Y_i, Z_i$ , зв'язаній з  $i$ -ю ланкою, в осях якої визначається сумарний момент інерції  $J_{z_j}$ ;  $k_{jx}, k_{jy}, k_{jz}$  – радіуси інерції  $j$ -ї ланки маніпулятора відносно відповідної осі, зв'язаної з цією ланкою, тобто  $X_j, Y_j, Z_j$ .



Координати  ${}^i x_{cj}, {}^i y_{cj}, {}^i z_{cj}$  центра мас  $C_j$  ланки  $j$  маніпулятора в системі координат  $x_i, y_i, z_i$ , зв'язаній з  $i$ -ю ланкою, можна знайти, скориставшись співвідношенням:

$$\begin{bmatrix} {}^i x_{ci} \\ {}^i y_{ci} \\ {}^i z_{ci} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^i T_j \begin{bmatrix} {}^j x_{cj} \\ {}^j y_{cj} \\ {}^j z_{cj} \\ 1 \end{bmatrix},$$

Звідси випливають наступні лінійні залежності між параметрами ланок маніпулятора:

$$\begin{aligned} {}^i x_{cj} &= {}^i m_{jx} {}^j x_{cj} + {}^i n_{jx} {}^j y_{cj} + {}^i p_{jx} {}^j j_{cj} + {}^i a_j; \\ {}^i y_{cj} &= {}^i m_{jy} {}^j x_{cj} + {}^i n_{jy} {}^j y_{cj} + {}^i p_{jy} {}^j j_{cj} + {}^i b_j. \end{aligned}$$

Ефективний момент інерції  $i$ -ї ланки маніпулятора визначається виразом:

$$J_z = D_{ij} + J_1 = J_{zj} + J_{\Delta i}.$$

В загальному випадку розглядається просторове переміщення шасі та маніпулятора інерційні властивості елементів динамічної системи визначаються масою шасі та маніпулятора та тендерами інерції маси ( $I_{ij}^n$ ) та маніпулятора  $I_{ij}^k$ . Тензори інерції застосовуються для розрахунку динамічних мікропереміщень та макропереміщень для аналізу інерційних властивостей маніпулятора при його випадкових переміщеннях тензори моментів інерції визначаються в термінах стохастичного тензорного поля. Тензори інерції визначають сферичний рух шасі відносно полюса та сферичні рухи маніпулятора відносно шарніра розміщеного на шасі. В загальному випадку кожен із тензорів інерції описується є квадратною матрицею:

$$(I_{ij}) = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}.$$

Компоненти тензора інерції знаходяться інтегруванням, наприклад:

$$I_{xx} = \int_W x^2 dm, \dots$$

Як правило маніпулятор має кілька важелів, а роботизований комплекс має додаткові інерційні елементи, наприклад штанги для встановлення оптичних пристроїв (рис. 10.17).

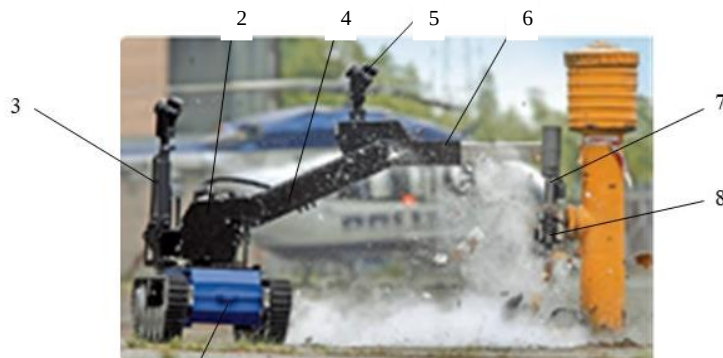


Рис. 10.17. Конструкція мобільного робота із багатоважільним маніпулятором та штангою із оптичними пристроями

Маса шасі 1 є порівняно із масою поворотної основи 2 та масою важелів 4, 5 маніпулятора.

Інерційні властивості мобільного робота сильно залежить від маси виконавчого органу 6 та штанги з оптичними пристроями 3. На важелі маніпулятора встановлена додаткова штанга 5 яка теж впливає на інерційні властивості маніпулятора.

Для наведеного конструктивного виконання мобільного робота розроблена динамічна модель (рис. 10.18).

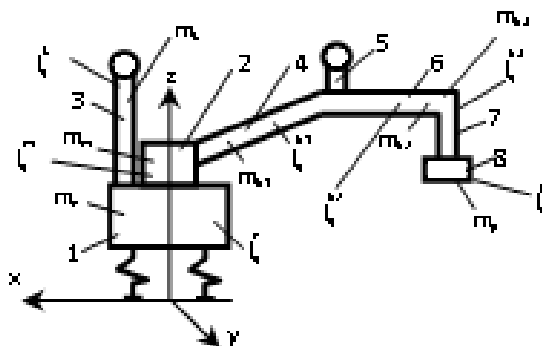


Рис. 10.18. Динамічна модель маніпулятора мобільного робота із додатковими інерційними елементами

Інерційні властивості маніпулятора визначено масовими коефіцієнтами  $m_{в1}$  та  $m_{в2}$ . Маса шасі  $m_{ш}$  та маса поворотного пристрою  $m_{п}$  є порівняльними із масою важелів. Суттєвим також є маса робочого пристрою  $m_{р}$ . Всі складові наземного роботизованого комплексу приймають участь в просторових динамічних переміщеннях. Просторові поперечні кутові переміщення залежать від моментів інерції вузлів ( $I_{ij}^{e1}$ ) та ( $I_{ij}^{e2}$ ) визначені в локальних системах координат введених для

даних важелів. При необхідності вони приводяться до головної системи координат пов'язаної із переміщенням шасі. В даній системі координат визначено компоненти тензора моментів інерції шасі ( $I_{ij}^n$ ) та тензора моментів інерції поворотного пристрою ( $I_{ij}^m$ ).

Додатковим інерційним елементом є штанга з оптичними пристроями з масою  $m_k$  та моментом інерції ( $I_{ij}^k$ ). В разі необхідності враховуються інерційні властивості третього (та інших) важелів маніпулятора  $I_{ij}^{k3}$  та інерційні властивості робочого пристрою ( $I_{ij}^p$ ).

Для спрощення визначення інерційних властивостей окремих складових мобільного робота проводиться їх порівняння. Скалярні величини (зокрема маси) порівнюються по величині, а для порівняння тензорів використовується їх норми. При цьому встановлюється співвідношення мас та норм тензорів інерції, наприклад

$$m_n \gg m_k, \left[ \left[ I_{ij}^n \right] \right] \gg \left[ \left[ I_{ij}^k \right] \right],$$

де  $\left[ \left[ I_{ij}^v \right] \right]$  - норма тензора інерції консольної частини.

Визначення моментів інерції окремих ланок проводиться традиційними методами [Костюк с.155-157].

Запропоновано спеціальний метод визначення інерційних властивостей мобільного робота який є особливо ефективним для роботизованих комплексів з консольними інерційними вузлами незначної маси. Згідно даного методу динамічна модель комплексу подається у вигляді одного твердого тіла із змінним тензором інерції (рис. 10.19).

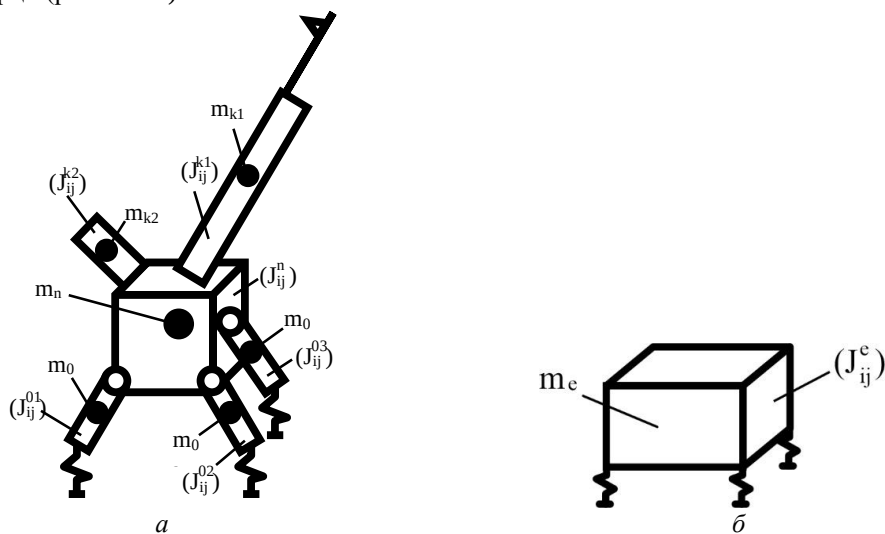


Рис. 10.19. Динамічна модель роботизованого комплексу (а) та подання її у вигляді еквівалентного твердого тіла

Еквівалентна маса та тензор інерції визначаються шляхом осереднення.

В результаті проведених робіт встановлено, що інерційні властивості динамічних систем мобільних роботів, які здійснюють просторовий рух, визначаються тензорними величинами, зокрема, тензором інерції. Зміни тензорів інерції описуються в термінах нестационарного стохастичного тензорного поля.

### 10.3. Математичне моделювання сферичних рухів у просторових динамічних системах маніпуляторів мобільних роботів

Проведено математично моделювання просторових динамічних систем маніпуляторів мобільних роботів по розробленим спеціальним моделям. Розроблені математичні моделі включають парціальні динамічні системи сферичних рухів. Вони враховують особливості змін тензорів інерції маніпуляторів мобільних роботів при різних умовах навантаження та зміні просторового положення важелів маніпуляторів. Для цього застосовані методи статистичної динаміки адаптовані до можливих випадкових змін інерційних параметрів маніпуляторів. Використані запропоновані раніше методи опису процесів у термінах стохастичного тензорного поля тензорів моментів інерції елементів динамічної системи маніпулятора.

В результаті математичного моделювання визначені параметри сферичних рухів характерних вузлів та виконавчого органу маніпулятора. Основну увагу приділено просторовим мікропереміщенням виконавчого органу маніпулятора. Виходом математичного моделювання є запропоновані рекомендації по поліпшенню динамічних характеристик маніпуляторів мобільних роботів.

Причиною виникнення сферичних рухів у маніпуляторі є просторовий характер моментних навантажень маніпулятора мобільного робота рис. 10.20).

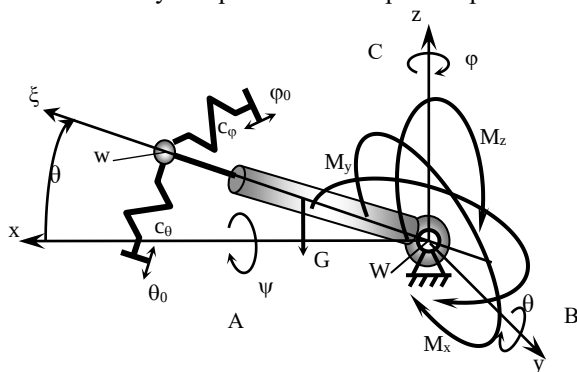


Рис. 10.20. Моментні навантаження, що є причиною поперечного кутових переміщень( сферичних рухів) ланок маніпулятора мобільного робота

Поперечно кутові переміщення являють собою сферичні рухи основи маніпулятора. Як правило, маніпулятор має ряд послідовно з'єднаних ланок. Відповідно в шарнірах між ланками мають місце поперечна кутові переміщення. Це

приводить до формування ланцюгової схеми виникнення сферичних рухів. Сферичний рух кожної ланки відбувається в межах конуса з певним тілесним кутом. Конуси окремих шарнірів формують результуючий сферичний рух. В результаті складення сферичних рухів виконавчий пристрій маніпулятора здійснює складні просторові переміщення.

Для математичного моделювання сферичних рухів застосована спрощена методика викладена в монографії [76]. При цьому використані інтегральні рівняння сферичного руху [25] записані для кожної окремої ланки маніпулятора:

$$\begin{aligned} L_x &= L_{x0} + \int_0^t (M_x - \omega_y L_z + \omega_z L_y) dt, \\ L_y &= L_{y0} + \int_0^t (M_y - \omega_z L_x + \omega_x L_z) dt, \\ L_z &= L_{z0} + \int_0^t (M_z - \omega_x L_y + \omega_y L_x) dt \end{aligned}$$

В інтегральні рівняння входять моменти сил, що діють на ланку, задані своїми проекціями  $M_x$ ,  $M_y$  та  $M_z$  і проекції кінематичного моменту  $\vec{L}$ . В рівняння також входять проекції вектора кутової швидкості ланки  $\vec{\omega}$ . Наявний зв'язок проекції кінетичного моменту та проекцій кутової швидкості:

$$\begin{aligned} L_x &= I_{xx} \omega_x - I_{xy} \omega_y - I_{zx} \omega_z; \\ L_y &= -I_{xy} \omega_x + I_{yy} \omega_y - I_{yz} \omega_z; \\ L_z &= -I_{zx} \omega_x - I_{zy} \omega_y + I_{zz} \omega_z. \end{aligned}$$

Дані залежності включають складові тензора інерції ланки:

$$(I_{ij}) = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Із наведених залежностей встановлені співвідношення між проекціями кутових швидкостей, що є основою рекурентної процедури обчислення параметрів сферичного руху. Співвідношення мають вигляд:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \frac{[L_x + I_{xy} \omega_y + I_{zx} \omega_z]}{I_{xx}} \\ \omega_y &= \frac{[L_y + I_{xy} \omega_x + I_{yz} \omega_z]}{I_{yy}} \\ \omega_z &= \frac{[L_z + I_{zx} \omega_x + I_{zy} \omega_y]}{I_{zz}} \end{aligned}$$

На основі наведених співвідношень сформована математична модель для обчислення вектора кутової швидкості ланки маніпулятора.

Дана модель доповнена математичною моделлю для обчислення динамічного моменту який діє на ланку .

Складові моделі об'єднані в одну загальну математичну модель сферичного руху ланки (рис. 10.21).

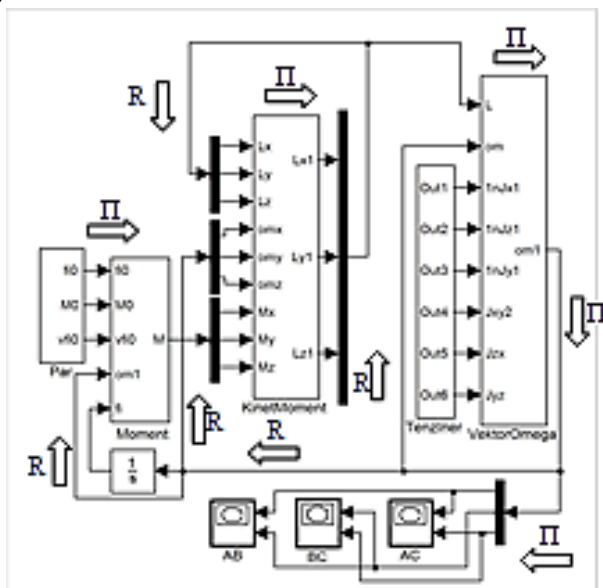
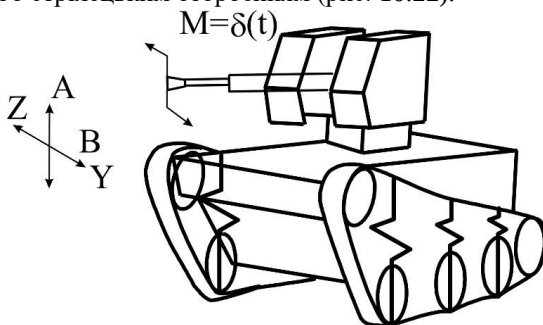


Рис. 10.21. Загальна модель сферичного руху ланки маніпулятора

Виходом моделі є проекції кутової швидкості ланки відповідні її сферичному руху відносно центра шарніра.

Дана модель безпосередньо використана для розрахунку сферичних рухів одноланкового маніпулятора який відповідає переміщенням ствола роботизованого комплексу оснащеного стрілецьким озброєнням (рис. 10.22).



*Рис. 10.22. Схема прикладення імпульсного моментного навантаження до ствола наземного роботизованого комплексу*

Результати моделювання для спрощеної схеми маніпулятора дають можливість визначити динамічну похибку позиціонування ствола по траєкторії поперечно-кутових переміщень (рис. 10.23).

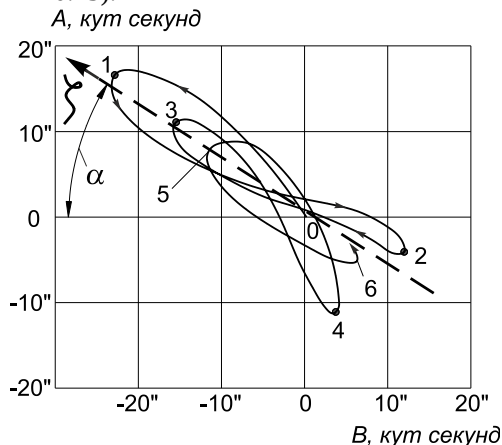


Рис. 10.23. Траєкторії поперечно-кутових переміщень ствола визначені в результаті математичного моделювання

Встановлено, що розмах поперечно-кутових переміщень ствола досягає максимуму при переміщенні ствола у певному напрямку  $\zeta$ . Даний напрямок визначає вісь мінімальної динамічної жорсткості маніпулятора. В результаті розрахунків визначається кут  $\alpha$  орієнтації вісі мінімальної динамічної жорсткості відносно горизонтальної площини. Даний кут визначається співвідношенням масо жорсткісних параметрів маніпулятора.

Сферичні переміщення в динамічній системі багатоважільного маніпулятора залежить від інерційних жорсткісних та дисипативних характеристик шарнірів та важелів. При динамічних навантаженнях маніпулятора виникають сферичні мікропереміщення важільної системи маніпулятора. Вони відповідають виділеним парціальним підсистемам сферичного руху та конфігурації маніпулятора.

В системі рівнянь сферичного руху важелів маніпулятора враховані моменти силового зв'язку парціальних підсистем сферичного руху.

В першому наближенні прийняті лінійні характеристики силового зв'язку у вигляді набору крутильних жорсткостей та коефіцієнтів опору.

При цьому моменти силового зв'язку визначено залежностями:

$$M_{R\psi} = C_{\psi}(\psi_1 - \psi) + h_{\psi}(\omega_{\psi} - \omega_x),$$

$$M_{R\theta} = C_{\theta}(\theta_1 - \theta) + h_{\theta}(\omega_{\theta} - \omega_y),$$

$$M_{R\varphi} = C_{\varphi}(\varphi_1 - \varphi) + h_{\varphi}(\omega_{\varphi} - \omega_z).$$

Із врахуванням дії моментів силового зв'язку проведено розрахунок переміщення схвата маніпулятора при імпульсному навантаженні (рис. 10.24).

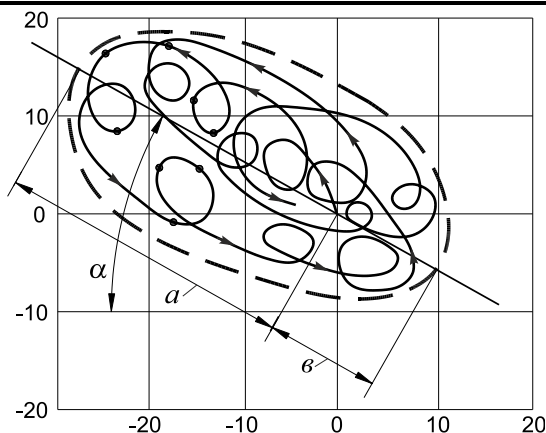


Рис. 10.24. Результати математичного моделювання переміщення захвата маніпулятора при перехідному процесі обумовленому імпульсним навантаженням

В результаті математичного моделювання встановлено, що траєкторія сферичного руху двохвального маніпулятора має складний спірально-петлеподібний вигляд із петлеподібними ділянками. Складні переміщення виконавчого пристрою при циклічному навантаженні є результатом прояву дії окремих парціальних підсистем на динамічні переміщення виконавчого пристрою робота.

В цілому переміщення проходять в межах еліптичної ділянки яка орієнтована під кутом  $\alpha$  до горизонтальної площини. Півосі еліптичної ділянки  $a$  і  $b$  зміщені відносно початкового положення маніпулятора.

Із результатів математичного моделювання випливає, що наявність парціальних систем сферичного руху приводить до виникнення складних параметричних слабо затухаючих коливань окремих ділянок маніпулятора.

В загальному випадку траєкторії переміщень виконавчого пристрою є спірально-петлеподібними, а частоти циклів відповідають власним частотам парціальних підсистем сферичного руху маніпулятора.

Наведені вище задачі геометрії (кінематики) та статички розглянуті на базі основних положень теорії гвинтів узагальнені на задачі динаміки маніпуляторів. Для цього використані операторні методи на основі перетворення Лапласа. Динамічні навантаження на маніпулятор визначені у вигляді силового гвинта складові якого є функціями часу  $t$ :

$$Gp_0(t) = \begin{bmatrix} \bar{F}(t) \\ \bar{M}(t) \end{bmatrix}.$$

Без порушення загальності постанові задачі прийняті нульові початкові умови для вектора сили та моменту при  $t=0$   $\bar{F}(0) = 0$ ,  $\bar{M}(0) = 0$ .

При цьому визначено зображення на Лапласу  $L$  математичного об'єкту у вигляді нестационарного силового гвинта:



$$Gp_0(S) = L \begin{bmatrix} \bar{F}(t) \\ \bar{M}(t) \end{bmatrix}.$$

Враховуючи властивість лінійності перетворення Лапласа маємо операторну форму запису силового гвинта:

$$Gp_0(S) = \begin{bmatrix} F_x(S) \\ F_y(S) \\ F_z(S) \\ M_x(S) \\ M_y(S) \\ M_z(S) \end{bmatrix}.$$

Сформований шестивимірний вектор зображень по Лапласу складових силового гвинта є вхідним параметром динамічної системи маніпулятора

Виходом системи є нестационарний геометричний гвинт, що визначає просторове положення виконавчого органу маніпулятора:

$$Gx_0(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \\ \psi(t) \\ \theta(t) \\ \varphi(t) \end{bmatrix}.$$

Для знаходження виходу системи у вигляді геометричного гвинта використано співвідношення між входом і виходом записане в операторній формі

$$Gx_0(S) = [W_{ji}(S)] \cdot Gp_0(S),$$

де  $[W_{ji}(S)]$  - матриця передавальних функцій, яка встановлює залежності між компонентами силового і геометричного гвинтів записаними у вигляді зображень по Лапласу.

Для знаходження геометричного гвинта застосоване зворотне перетворення Лапласа:

$$Gx_0(t) = L^{-1}[Gx_0(S)].$$

Матриця передавальних функцій, що описує динамічну систему маніпулятора має розмірність 6x6 і є аналогом матриці Якобі використаної для задачі кінематики. Компоненти матриці передавальних функцій як правило визначаються по результатам експериментальних вимірів. З достатньою для практики точністю для опису компонент матриці рекомендована залежність відповідна послідовному з'єднанню коливальних ланок із суттєво відмінними постійними часу і близькими параметрами затухання. Дана залежність має вигляд:

$$W_{ji}(S) = \frac{D_{ji}}{(T_{1ji}^2 S^2 + 2\zeta_{ji} T_{1ji} S + 1) \cdot (T_{2ji}^2 S^2 + 2\zeta_{ji} T_{2ji} S + 1)},$$

де  $D_{ji}$  - компонента матриці деформативності маніпулятора відповідна статичним значенням силового та геометричного гвинтів;  $T_{1ji}$  та  $T_{2ji}$  - постійні часу відповідні операторному зв'язку відповідних компонент вхідного силового та вихідного геометричного гвинтів;  $\zeta_{ji}$  - параметр затухання для даної компоненти.

Із результатів експериментальних досліджень випливає, що  $0,1 \leq \zeta_{ji} \leq 0,2$ , а  $T_{1ji} / T_{2ji} \approx 5..8$ .

При цьому резонансна частота в низькочастотній області для конкретної компоненти геометричного гвинта складає 5..15 Гц (30..100  $\text{C}^{-1}$ ),  $\omega_{pji}$  а відповідна постійна часу  $T_{1ji} = 0,01..0,03$  с.

#### 10.4. Математичного моделювання динаміки маніпуляторів з використанням кусково-постійних ортогональних функцій

Розроблена методологія математичного моделювання реалізована при дослідженні динаміки мобільного верстата-робота на основі механізму-гексапода [72]. Він має шість штанг змінної довжини  $L_1, \dots, L_6$ , які забезпечують просторове переміщення платформи  $\Pi$  (рис. 10.25).

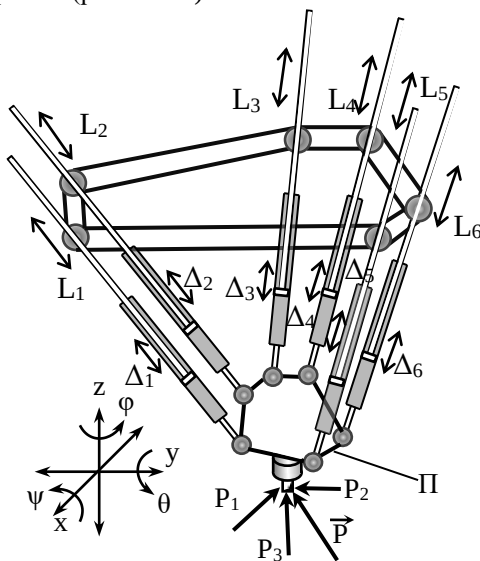


Рис. 10.25. Схема маніпулятора на основі механізму - гексапода

На платформі верстата-робота встановлено високообертовий шпиндель. В якості інструмента використана сферична бор-фреза [73].

Зміни довжини штанг  $L_1 \dots L_6$  забезпечують просторовий рух інструмента.

Переміщення інструмента визначається відносно нерухомої (абсолютної) системи координат. Положення інструмента характеризується поступальними переміщеннями  $x$ ,  $y$ ,  $z$  та поперечно-кутовими переміщеннями у вигляді поворотів навколо координатних вісей  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ . При обробці об'єкта виникають сили різання, що діють на інструмент. Сили різання мають просторовий характер дії. Для верстатів-роботів з паралельними кінематичними зв'язками характерним є відсутність основного (превалюючого) напрямку дії сил різання. Сили різання, які виникають при обробці об'єктів на мобільних-верстатах роботах, як правило, є незначними. Це обумовлено низькою жорсткістю стрижневої системи та можливістю виникнення автоколивань.

Для динамічної системи верстата знайдена матриця передавальних функцій  $[W(s)]$ , яка пов'язує переміщення інструмента із діючими на нього навантаженнями.

По матриці передавальних функцій визначено частотні характеристики системи.

Амплітудно-фазова частотна характеристика являє собою комплекснозначну матрицю  $[W(j\omega)]$ , одержану підстановкою в:

$$W(s), s \rightarrow j\omega, j = \sqrt{-1}.$$

Матриці амплітудно-частотних і фазово-частотних характеристик визначаються згідно матричних співвідношень:

$$[W(\omega)] = \text{mod}[W(j\omega)],$$

$$[\psi(\omega)] = \text{arg}[W(j\omega)].$$

Матриці дійсних та уявних амплітудно-частотні характеристик знаходяться згідно процедур:

$$[U(\omega)] = \text{Re}[W(j\omega)],$$

$$[V(\omega)] = \text{Im}[W(j\omega)].$$

Дані характеристики застосовуються для знаходження розрахункових реалізацій сил різання по заданим реалізаціям випадкового зміщення інструменту відносно оброблюваного об'єкта [73].

Прийmemo, що припуск на обробку змінюється мало, а товщина зрізуваного шару визначається в основному випадковими коливаннями, що виникають у динамічній системі верстата-робота. Приймемо, що кожна із штанг здійснює поперечні коливання випадкового характеру, а при цьому мають місце коливання в шарнірах та приводах. Подамо залежність зміни довжини кожної із шести штанг у вигляді випадкового процесу виду полігармонічної функції із випадковими амплітудами і фазами. При цьому зміни довжини  $j$ -ї штанги визначаються залежністю:

$$\Delta_j = \sum_{k=1}^N L_{jk}^* \sin(k\omega_{j0}t + \psi_{Ljk}^*), \quad j = 1, 2, \dots, 6.$$

де  $L_{jk}^*$ ,  $\psi_{Ljk}^*$  - випадкові амплітуди і фази окремих гармонік;  $N$  - загальне число гармонік;  $\omega_{j0}$  - базове значення частоти власних коливань штанги.

Вектор зміщення інструменту по причині коливання штанг визначиться залежністю:

$$[x_i]_3 = \left[ \sum_{j=1}^6 w_{ij} \cdot \Delta_j \right]_3,$$

де  $[x_i]_3 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$  – випадковий вектор зміщення інструменту;  $w_{ij}$  – прямокутна матриця

розмірністю  $3 \times 6$ , яка встановлює зв'язок зміни довжини штанг із переміщенням інструменту (матриця Якобі).

Подамо випадковий вектор змін положення інструменту у вигляді:

$$[x_i]_3 = \left[ \sum_{m=1}^{6 \times N} A_{im}^* \sin(n_{im} \omega_0 t + \psi_{im}^*) \right]_3,$$

де  $A_{im}^*$  – амплітуда гармонічної складової випадкового процесу, що визначає зміну положення інструменту;  $n_{im}$  – індекс, що визначає номер гармоніки;  $\omega_0$  – базове значення частоти;  $\psi_{im}^*$  – початкові фази окремих складових процесу.

Після перетворень тригонометричних функцій під знаком суми, отримаємо:

$$[x_i]_3 = \left[ \sum_{m=1}^{6 \times N} a_{im}^* \cos(n_{im} \omega_0 t) + b_{im}^* \sin(n_{im} \omega_0 t) \right]_3,$$

де  $a_{im}^*$ ,  $b_{im}^*$  – коефіцієнт розкладу процесу переміщення інструменту по системі функцій синус-косинус.

Коефіцієнти розкладу визначено експериментальними методами [78]. Для цього проведені виміри переміщень інструмента обумовлені власними коливаннями в динамічній системі верстата-робота при випадкових навантаженнях окремих штанг. При цьому знайдені часові реалізації проекцій вектора переміщень ( $x_i$ ). Типова проекція вектора переміщень інструменту мобільного верстата-робота являє собою коливальний процес, що має властивість биття (рис. 10.26).

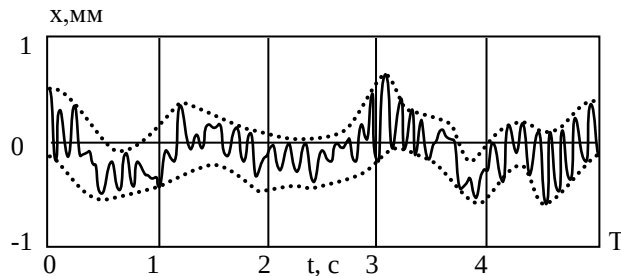


Рис. 10.26. Типова часова реалізація проекції на вісь  $x$  вектора переміщень інструменту мобільного верстата-робота

У випадковому процесі простежуються чітко виражені гармонічні складові з частотами близько 0,5; 1,0; 7,0 Гц. Це підтверджує обґрунтованість подання випадкового процесу у вигляді полігармонічної функції.

Для всіх проекцій вектора переміщень за формулами Коші знайдені коефіцієнти ряду:

$$a_{im}^* = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(\tau) \cdot \cos(k\omega_0\tau) d\tau,$$

$$b_{im}^* = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(\tau) \cdot \sin(k\omega_0\tau) d\tau,$$

де  $T$  - протяжність реалізації процесу;  $\omega_0$  - базове значення частоти;  $f$  - проекція вектора переміщень.

В залежність входять тригонометричні функції. Їх характерною властивістю є зміна знака при змінах аргументу (часу). Для врахування знакозмінних процесів переміщення інструменту верстата-робота запропоновано залежність подати у вигляді ряду, що враховує лише зміни знаків тригонометричних функцій. Для цього використані кусково-постійні ортогональні функції Уолша [72]. Функції Уолша, що визначають знак синусоїди та косинусоїди  $sal(n, \nu)$ ,  $cal(n, \nu)$ ,  $n=1,2,3,\dots$  залежать від нормованого аргумента  $\nu$  і визначаються співвідношеннями:

$$cal(n, \nu) = \text{sign}[\cos(2\pi n \nu)], \quad sal(n, \nu) = \text{sign}[\sin(2\pi n \nu)],$$

Графіки функцій Уолша з відповідними номерами є наближенням косинусоїд та синусоїд відповідних періодів (частот) (рис. 10.27).

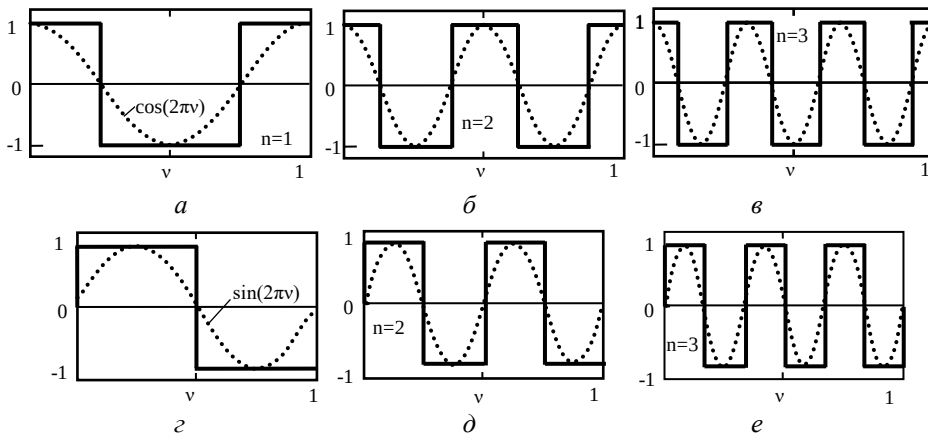


Рис. 10.27. Графіки функцій Уолша та відповідні їм графіки тригонометричних функцій: а, б, в – функції  $cal(n, \nu)$ ,  $n=1,2,3$ ; г, д, е – функції  $sal(n, \nu)$ ,  $n=1,2,3$

Із аналізу графіків випливає, що із підвищенням порядку функцій Уолша їх графіки наближаються до графіків синусоїдальної та косинусоїдальної функцій.

Зміщення інструмента у вигляді полігармонічної функції подамо у вигляді набору кусково-постійних функцій Уолша. Відповідно одержимо:

$$[x_i]_3 = \left[ \chi \sum_{m=1}^{6 \times N} a_{im}^* \text{cal} \left( n_{im} \frac{\omega_0 t}{2\pi} \right) + b_{im}^* \text{salsal} \left( n_{im} \frac{\omega_0 t}{2\pi} \right) \right]_3,$$

де  $\chi$  – поправочний коефіцієнт, значення якого складає 0,8...0,85.

Дана залежність є нелінійною і має вигляд кусково-постійної функції (див. рис. 10.28).

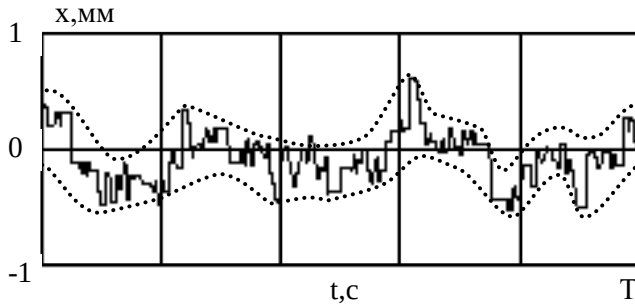


Рис. 10.28. Типова розрахункова залежність зміни положення інструменту обумовленої власними коливаннями штанг верстата-робота, яка подана у вигляді суми кусково-постійних залежностей

При цьому залежність враховує знак випадкових зміщень інструмента відносно оброблюваного об'єкта обумовлені власними коливаннями кожної із шести штанг.

Кусково-постійна залежність наближено відповідає полігармонічній функції. Це випливає із порівняння графіків даних залежностей наведених на рис. 10.24 та рис. 10.28. Графіки мають однакові огинальні (показані пунктирними лініями). Вид і характер плавно змінюваного випадкового процесу та кусково-постійного є подібними. Подібними є і частотні властивості процесів. На графіку переміщення (рис. 10.28) простежуються складові з частотами 0,5; 1,0; 7,0 Гц, що відповідає частотам плавно-змінного процесу (див. рис. 10.26).

Подання процесу зміщення інструменту у вигляді кусково-постійної залежності значно спрощує обчислення динамічних характеристик системи, зокрема сил різання.

Відповідно випадковому зміщенню інструмента значення вектора сили різання знайдено через компоненти матриць амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик у вигляді:

$$[P_i]_3 = \left[ \chi \sum_{m=1}^{6 \times N} U_{im}(n_{im}\omega_0) \cdot a_{im}^* \text{cal} \left( n_{im}, \frac{\omega_0 t}{2\pi} \right) + V_{im}(n_{im}, \omega_0 t) \cdot b_{im}^* \text{salsal} \left( n_{im}, \frac{\omega_0 t}{2\pi} \right) \right]_3,$$

Одержана залежність допускає обчислення в часі із знаходженням силових

характеристик процесу різання. Проведено обчислення проекцій сили різання для знайденого закону зміщення інструмента відносно оброблюваного об'єкта (рис. 10.29).

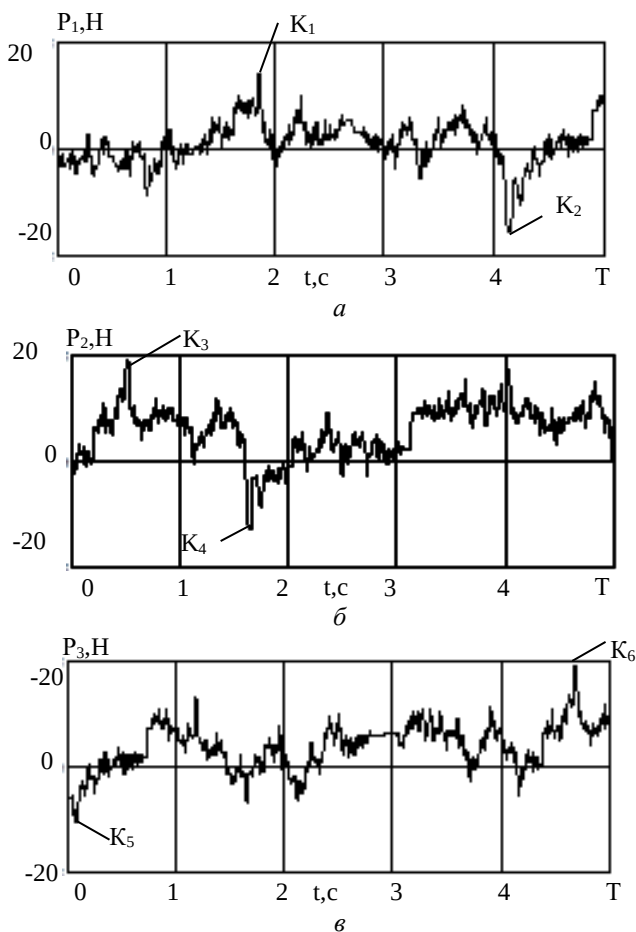


Рис. 10.29. Розрахункові значення випадкових складових проекцій сили різання:  
а – на вісь  $x$ ; б – на вісь  $y$ ; в – на вісь  $z$

Одержані випадкові складові проекцій сили різання в своїх реалізаціях відповідають полігармонічним процесам, які на відміну від зміщення інструменту мають високочастотні складові. В процесах зберігаються складові з частотами 0,5; 1,0; 7,0 Гц. Це підтверджує висунуте раніше припущення про переважну залежність сил різання від власних коливань в динамічній системі мобільного верстата-робота.

Із аналізу одержаних залежностей сил різання від часу випливає, що на реалізаціях проекцій сил різання мають місце викиди  $K_1$ - $K_6$ , обумовлені параметричними резонансами в паралельних кінематичних ланцюгах верстата. Наявність складних динамічних змін проекцій вектора сили різання обумовлює значні

динамічні навантаження на стрижневу систему робота. Це приводить до виникнення циклічних та імпульсних навантажень. Подібні навантаження простежуються по змінам модуля сили різання. Модуль випадкової складової сили різання визначено через проекції сил різання згідно залежності:

$$|P| = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2}.$$

Випадкові значення модуля мають екстремуми (рис. 10.30).

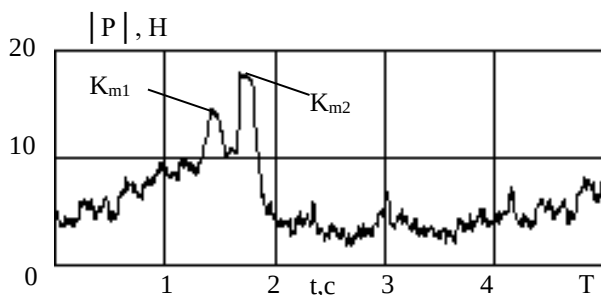


Рис. 10.30. Зміна в часі модуля випадкової складової сили різання

Із результатів розрахунків випливає, що значення екстремумів випадкових складових сили різання  $K_{m1}$ ,  $K_{m2}$  в 3..5 разів перевищують середні значення випадкових змін модуля. Пульсації модуля сили різання мають місце на частотах 0,7...1,0 Гц, що є близькими до власних частот динамічної системи верстата. Значні періодичні зміни модуля сили різання є негативним явищем, яке приводить до суттєвого зниження точності обробки на мобільних верстатах роботах. Для компенсації негативних резонансних процесів рекомендовано використати інерційні демпфери коливань [147]. Демпфери встановлюються на платформі верстата-робота.

Встановлено, що маніпулятори мобільних робототехнічних комплексів побудовані на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами, забезпечують найбільш раціональне сприйняття сил і моментів, які необхідні для роботи з небезпечними об'єктами. Тому маніпулятори даного типу рекомендуються до застосування в наземних роботизованих комплексах.

Запропоновані підходи до забезпечення раціональних динамічних характеристик маніпуляторів мобільних роботів базується на визначенні динамічних мікропереміщень в маніпуляторах, що описані з використанням кусково постійних ортогональних функцій. При цьому вхідними динамічними діями прийняті імпульсні навантаження на маніпулятор, а виходом системи є випадкові переміщення окремих ланок маніпулятора.



### 10.5. Дослідження динамічних характеристик маніпулятора з використанням теорії нечітких множин

Для моделювання задач динаміки багатокоординатних роботів проведено їх математичний опис в термінах теорії нечітких множин [78]. Розглянуто багатокоординатний верстат-робот побудований по схемі механізму-гексапода (рис. 10.31).

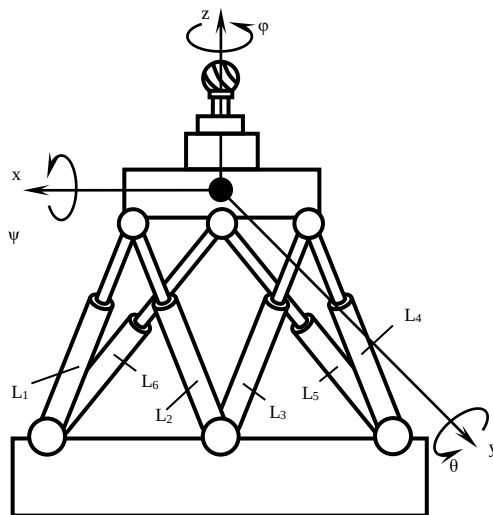


Рис. 10.31. Компонувальна схема багатокоординатного робота-гексапода, що має шість штанг змінної довжини

Введені параметри, які описують положення робочого органу робота у вигляді векторів  $x$ -координат та  $L$ -координат. Вектор  $x$ -координат має в якості складових величини, що описують положення виконавчого органу в просторі:

$$(x_i) = [x \ y \ z \ \psi \ \theta \ \varphi]^T.$$

Даний вектор пов'язано із вектором  $L$ -координат, що визначає довжину окремих штанг робота:

$$(L_j) = (L_1 L_2 L_3 \dots L_6)^T.$$

Встановлено взаємозв'язок між нескінченно малими змінами  $x$ -координат і  $L$ -координат. Кожна із компонент вектора  $L$ -координат являє собою функцію 6-ти змінних, що являють собою  $x$ -координати. Прийнято, що всі координати є нечітко визначеними і являють собою нечіткі (fuzzy) множини з відповідними функціями приналежності. Вид і характер функцій приналежності встановлено на основі аналізу конструктивних особливостей та дослідження динамічних робочих процесів

багатокоординатного робота.

Багатокоординатний робот являє собою складну просторову динамічну систему, в якій мають місце складні коливальні процеси. Особливістю робота є наявність мало жорстких стрижневих систем, які з'єднують платформу робота 1 із робочим органом 2 із нерухомою основою 3 (рис.10.32).

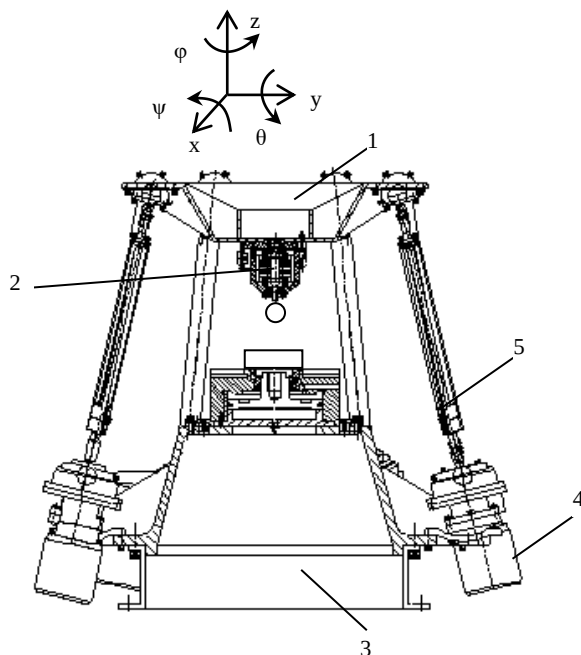


Рис. 10.32. Конструктивна схема багатокоординатного верстата-робота з механізмами паралельної кінематики

Робочий орган має шість керованих координат. Він здійснює поступальні переміщення в напрямках  $x, y, z$  та поперечно-кутові переміщення  $\psi, \theta, \phi$  навколо вісей координат.

Переміщення робочого органу забезпечують шість приводів 4, які змінюють довжину штанг 5.

Особливістю багатокоординатного робота є складний просторовий рух його окремих вузлів і деталей.

Для визначення основних властивостей динамічної системи робота та побудови математичних моделей окремих динамічних підсистем виконано аналіз системи з метою встановлення особливостей руху окремих вузлів.

Розроблена розрахункова схема динамічної системи робота, яка об'єднує платформу і робочий орган як одне тверде тіло, а штанги змінної довжини подає у вигляді еквівалентних деформованих стрижнів із розподіленою масою (рис.10.33).

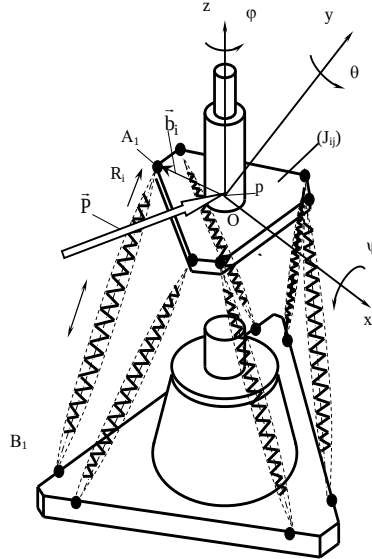


Рис. 10.33. Розрахункова схема робота паралельної кінематики, яка враховує розподіленість параметрів штанг

На робочий орган робота діють зовнішні силові фактори  $\vec{p}$ .

Платформа розміщена на сферичних опорах штанг. В сферичних опорах мають місце опорні реакції  $\vec{R}$ , що є внутрішніми силовими факторами динамічної системи. Штанги змінної довжини мають кінцеву жорсткість і суттєві дисипативні властивості, які потрібно врахувати при розробці математичної моделі динамічних процесів.

Роботи з паралельною кінематикою мають складну просторову структуру динамічної системи. Відповідно в динамічній системі робота наявні різноманітні парціальні динамічні системи.

Парціальні динамічні підсистеми відповідають просторовим рухам окремих вузлів робота. Основними динамічними вузлами є штанга і платформа. Платформа рухається в просторі під дією опорних реакцій в сферичних опорах штанг. Ці силові фактори зводяться до головного вектора і головного моменту:

$$\vec{R}_p = \sum_{i=1}^n \vec{R}_i,$$

$$\vec{M}_p = \sum_{i=1}^n \vec{R}_i \vec{b}_i,$$

де  $\vec{R}_i$  – вектор динамічної реакції  $i$ -ї штанги;  $\vec{b}_i$  – радіус-вектор дії сили  $\vec{R}_i$  відносно полюса  $O$ ;  $n=6$  – число штанг на яких встановлена платформа.

Платформа має шість ступенів вільності. Тому для опису її динаміки використано три парціальні підсистеми поступального переміщення полюса платформи та одну

парціальну систему сферичного руху платформи відносно полюса (рис. 10.34).

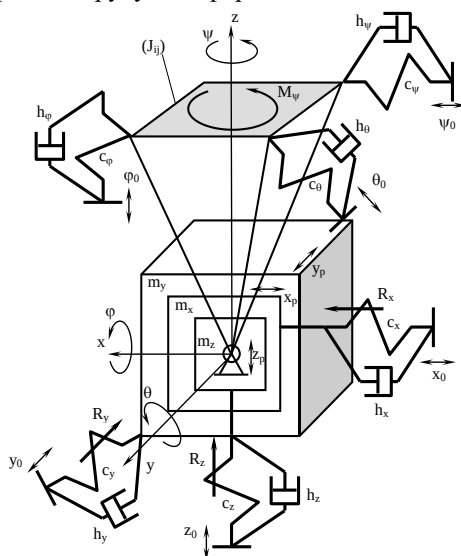


Рис. 10.34. Парціальні динамічні системи поступального та сферичного руху платформи багатокординатного верстата-робота

Згідно запропонованої динамічної моделі платформи розроблена структурна математична модель. Блок-схема математичної моделі динамічної системи платформи включає блок 1 для моделювання трьох складових парціальної підсистеми поступального переміщення платформи (рис. 10.35).

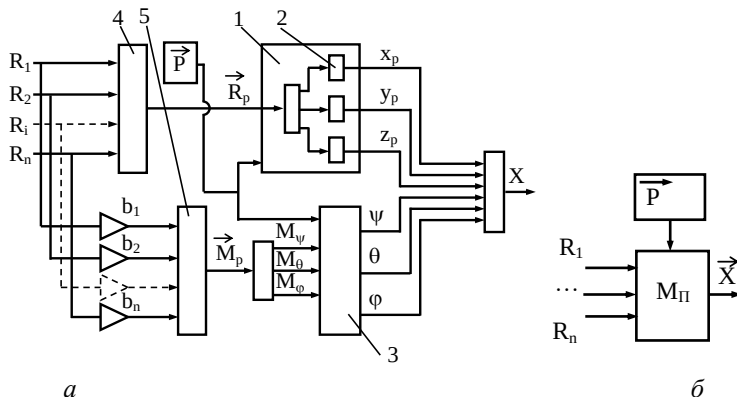


Рис. 10.35. Структурна блок-схема математичної моделі динамічної системи просторового переміщення платформи (а) та подання моделі у вигляді блока (б)

Складові  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $z_p$  поступального переміщення платформи моделюються окремими блоками 2 кожний із яких визначає переміщення центра мас платформ у відповідному напрямку. Блок 3 моделює парціальну систему сферичного руху

платформи відносно полюса. Блоки 4 і 5 формують відповідно головний вектор  $\vec{R}_p$  і головний момент  $\vec{M}_p$ , який діє з боку штанг на платформу. Виходом математичної моделі динамічної системи платформи є шестивимірний вектор положення платформи. Входами динамічної системи платформи є вектори опорних зусиль штанг  $R_1..R_n$  та вектор навантаження  $\vec{P}$ .

Загальні характеристики динамічної точності механізму визначають динамічні властивості штанг. Штанги відповідають окремим парціальним системам, що визначають специфічні, динамічні процеси, що супроводжують їх переміщення. Суттєвими вихідними параметрами для динамічних систем штанг є переміщення шарнірів. Тому для кожної штанги виділено парціальні динамічні системи, що описують поздовжні переміщення штанг із врахуванням розподіленості їх параметрів (рис.10.36).

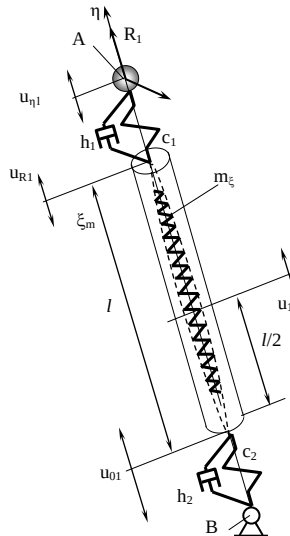


Рис. 10.36. Динамічна модель поздовжнього переміщення штанги із врахуванням розподіленості її параметрів

Для дослідження парціальної динамічної системи штанги застосовані адитивні моделі у вигляді розв'язку диференціальних рівнянь нескінченного порядку.

Приймемо, що штанга довжиною  $l$  являє собою квазіоднорідний стрижень з розподіленою по довжині масою.

Будемо вважати, що кінці стрижня здійснюють гармонічні рухи за законом:

$$u_{R1} = u_{aR} \sin(\omega_1 t), \quad u_{01} = u_{a0} \sin(\omega_2 t + \psi_0),$$

де  $u_{aR}$ ,  $u_{a0}$  - амплітуди гармонічних переміщень;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  - кругові частоти гармонічних переміщень крайових перетинів штанги;  $\psi_0$  - різниця фаз гармонічних

переміщень кінців штанги.

Приймемо, що кінці штанги жорстко закріплені в опорах. Відповідно власні частоти і форми коливань визначаються у виді:

$$p_i = \frac{i\pi a}{l}, \quad a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad X_i = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{p_i x}{a}\right), \quad i = 1, 2, \dots, \infty,$$

де  $l$  – довжина штанги;  $i$  – номер форми коливань;  $E$  – еквівалентний модуль пружності штанги;  $\rho$  – погонна маса штанги;  $a$  – еквівалентна швидкість звуку в штанзі.

Еквівалентний модуль пружності знайдено шляхом експериментальних вимірів жорсткості штанги. Здійснювалось навантаження штанги поздовжньою силою  $F_k$  і вимірювалось відносне переміщення кінців штанги. Жорсткість знаходилась як відношення приросту сили до приросту переміщення по формулі:

$$C_k = \frac{\Delta F_k}{\Delta l_k}.$$

Виміри здійснені при знакозмінних навантаженнях при різних значеннях сили і відповідно переміщень. Встановлено, що величина жорсткості суттєво залежить від амплітуди навантажень (деформацій). При малих амплітудах знакозмінних навантажень жорсткість штанги зменшується. Це пояснюється виборкою люфтів і зазорів у кінематичному ланцюзі. Збільшення амплітуди навантажень приводить до збільшення жорсткості. Результати вимірів жорсткості піддані статистичній обробці. Побудовані гістограми відносної частоти вимірів жорсткості даного значення. Для цього виміряні значення жорсткості розбиті на розряди і проведено підрахунок числа вимірів, які попадають в кожен розряд. Число значень вимірів, які попали в розряд із максимальним числом значень вимірів приймається в якості норми. Відносно неї встановлено відносне число вимірів у кожному розряді  $N$ .

Виміри жорсткості при різних амплітудах згруповані в окремі гістограми  $N_m$  і  $N_a$  (рис. 10.37).

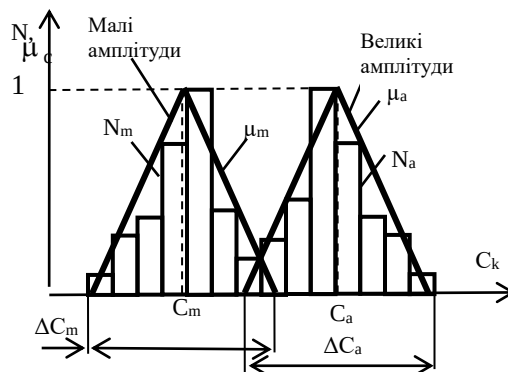


Рис. 10.37. Експериментально визначені значення еквівалентної жорсткості штанги, подані у вигляді гістограм та відповідних функцій приналежності нечітких множин, що описують еквівалентну жорсткість штанги

В результаті експериментальних вимірів встановлено, що гістограми близькі до трикутних графіків із максимумами, що відповідають середнім значенням жорсткості  $C_m$  і  $C_a$ , та шириною  $\Delta C_m$  і  $\Delta C_a$ .

Для опису гістограм введені трикутні функції  $\mu_m$  і  $\mu_a$ , які інтепретовані як характеристичні функції приналежності нечітких (розмитих, fuzzy) множин, що описують характеристики жорсткості штанги. При малих амплітудах коливань жорсткість визначається функцією  $\mu_m$ , а при великих амплітудах – функцією  $\mu_a$ .

На основі вимірних значень жорсткості визначені поточні значення еквівалентного модуля пружності. Для цього використана залежність:

$$E = C_k \frac{l}{S_e},$$

де  $l$  - довжина штанги;  $S_e$  - еквівалентна площа перетину штанги;  $C_k$  - значення поточної жорсткості штанги, яке визначається із врахуванням величини амплітуди коливань штанги у відповідності із значеннями характеристичних функцій  $\mu_m$  і  $\mu_a$ .

Прийmemo за характерне, переміщення штанги в її середній частині при  $x = \frac{l}{2}$ .

Характерне переміщення штанги як системи з розподіленими параметрами визначено рядом:

$$u_1 = \left[ \frac{1}{2} + \frac{2l^2}{\pi^3 a^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{i\pi}{2}\right)}{i^3} \cdot \frac{\omega_1^2}{\left(1 - \frac{\omega_1^2}{p_i^2}\right)} \right] u_{aR} \sin(\omega_1 t) +$$

$$+ \left[ \frac{1}{2} - \frac{2l^2}{\pi^3 a^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^i \sin\left(\frac{i\pi}{2}\right)}{i^3} \cdot \frac{\omega_2^2}{\left(1 - \frac{\omega_2^2}{p_i^2}\right)} \right] u_{a0} \sin(\omega_2 t + \psi_0),$$

Дана формула визначає полігармонічні переміщення характерного середнього перетину штанги при синусоїдальних переміщеннях її кінців. Вирази в квадратних дужках являють собою амплітудно-частотні характеристики динамічної системи штанги при двох синусоїдальних входах у вигляді переміщення її кінців. Дані частотні характеристики є функціями частоти у вигляді нескінченних рядів:

$$W_1(\omega) = \frac{1}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} K_{1i} \frac{\omega^2}{(-T_i^2 \omega^2 + 1)},$$

$$W_2(\omega) = \frac{1}{2} - \sum_{i=1}^{\infty} K_{2i} \frac{\omega^2}{(-T_i^2 \omega^2 + 1)},$$

$$\text{де: } K_{1i} = \frac{2l^2}{\pi^3 a^2} \frac{\sin\left(\frac{i\pi}{2}\right)}{i^3},$$

$$K_{2i} = \frac{2l^2(-1)}{\pi^3 a^2} \frac{\sin\left(\frac{i\pi}{2}\right)}{i^3},$$

$$T_i = \frac{1}{p_i}.$$

Коефіцієнти, які визначені останніми формулами, являють собою нечіткі множини.

Частотні характеристики включають лише квадрати частоти. Тому вони відповідають передавальним функціям виду:

$$W_1(s) = \frac{1}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_{1i}s^2}{T_i^2 s^2 + 1},$$

$$W_2(s) = \frac{1}{2} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_{2i}s^2}{T_i^2 s^2 + 1},$$

де  $s$  – оператор Лапласа.

Дані передавальні функції являють собою нескінченну кількість паралельних ланцюгів, кожен з яких має дві послідовно з'єднані диференціюючі ланки та одну консервативну ланку. Наявність консервативної ланки не відповідає фізичній суті задачі, а саме наявності процесу дисипації енергії в динамічній системі штанги. Тому в передавальних функціях консервативні ланки замінено на коливальні і відповідно одержано:

$$W_1(s) = \frac{1}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_{1i}s^2}{T_i^2 s^2 + 2\xi_i T_i s + 1},$$

$$W_2(s) = \frac{1}{2} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_{2i}s^2}{T_i^2 s^2 + 2\xi_i T_i s + 1},$$

де  $\xi_{ii}$  – відповідний набір параметрів затухання, які визначають дисипативні характеристики штанги.

В результаті експериментальних вимірів власних коливань штанги встановлено, що параметри затухання є незначними і складають  $\xi_i = 0.01.0.001$ .

Із врахуванням одержаних передавальних функцій встановлено зв'язок динамічних збурень штанги в середньому перетині та переміщення її кінців:



$$u_{R1}(s) = [u_1(s) - W_2(s)u_{01}(s)]/W_1(s).$$

Відповідно реакція першої штанги:

$$R_1(s) = [u_{R1}(s) - \eta_1(s)](C_1 + h_1s),$$

де  $\eta_1(s)$  - переміщення платформи в напрямку вісі штанги, яке визначається вектором х-координат;  $c_1$  та  $b_1$  – жорсткість та коефіцієнт опору шарнірного закріплення штанги на платформі.

Переміщення платформи в напрямку вісі штанги однозначно визначено вектором х-координат платформи у вигляді лінійної залежності:

$$\eta_1(s) = \sum_{j=1}^6 \alpha_{1j} \cdot x_j.$$

Об'єднання одержаних співвідношень здійснюється в спеціальному блоці математичної моделі (рис. 10.38).

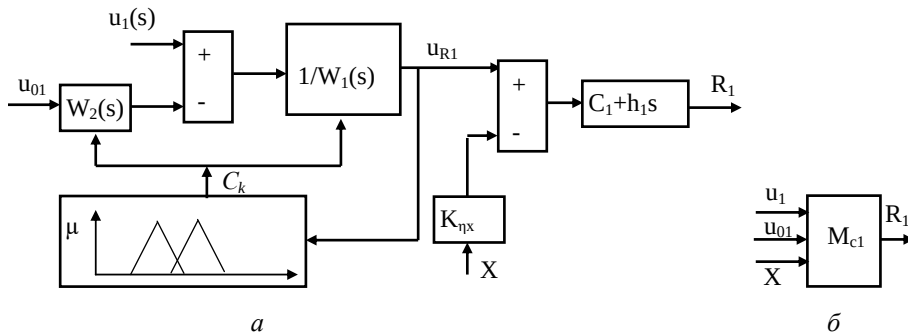


Рис. 10.38. Структурна модель призначена для обчислення реакції штанги (а) та подання даної моделі у вигляді блока (б)

Входами блока є вектор координат платформи  $x$ , динамічні збурення в приводі першої штанги  $u_1$  та динамічні збурення (вібрації) основи  $u_{01}$  в місці закріплення першої штанги.

Для обчислення нечітко визначеної жорсткості штанги  $C_k$  служить спеціальний блок моделі, який реалізує функції приналежності у відповідності із експериментальними значеннями (див. рис.10.38) із врахуванням амплітуди переміщень верхнього шарніра штанги.

Математична модель платформи та штанг об'єднуються в одну загальну структурну математичну модель (рис. 10.39).

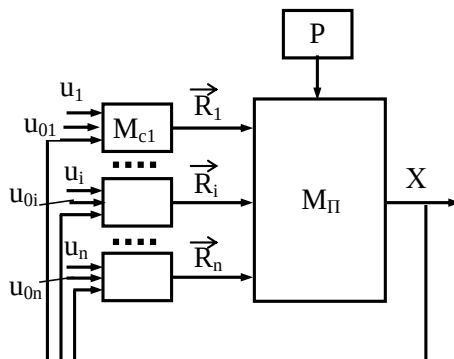


Рис. 10.39. Блок-схема загальної математичної моделі багатокоординатного робота

Виходом математичної моделі є вектор координат платформи ( $x_i$ ), входами керуючі сигнали приводів окремих штанг  $u_i$  та вібрації основи  $u_{0i}$ .

Виконано математичне моделювання переміщення платформи при дії імпульсних навантажень  $u_i$  в приводах кожної окремої штанги. В результаті розрахунків встановлено, що при імпульсних навантаженнях однієї із штанг платформа здійснює складний коливальний рух. В площині платформи даний рух відповідає спіральної траєкторії, яка локалізується в еліптичній області і затухає з часом (рис.10.40).

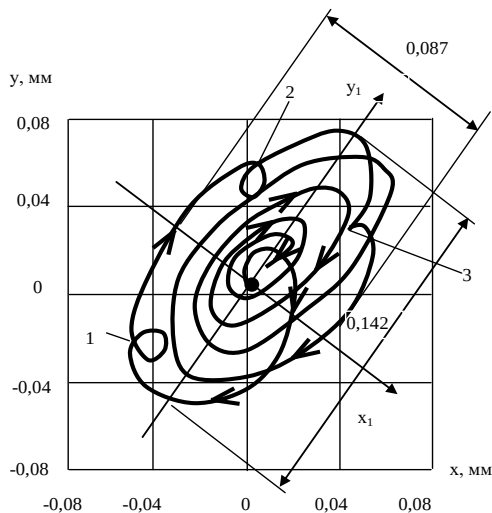


Рис. 10.40. Розрахункова траєкторія переміщення центра платформи багатокоординатного верстата при імпульсному збуренні в першій штанзі

Співвідношення вісей еліптичної ділянки складає 1,4..1,7. Напрямки вісей  $x_1$  та  $y_1$  відповідають головним вісям жорсткості пружної системи платформи. На траєкторії

переміщення платформи спостерігаються петле подібні ділянки 1, 2, 3. Вони відповідають першій основній частоті коливань штанги із часом затухають [48].

Послідовні пакетні імпульсні збурення у всіх штангах робота змінюють траєкторію переміщення платформи в площині  $xOy$ .

На траєкторії простежуються злами, відповідні наявності збурень (рис.10.41).

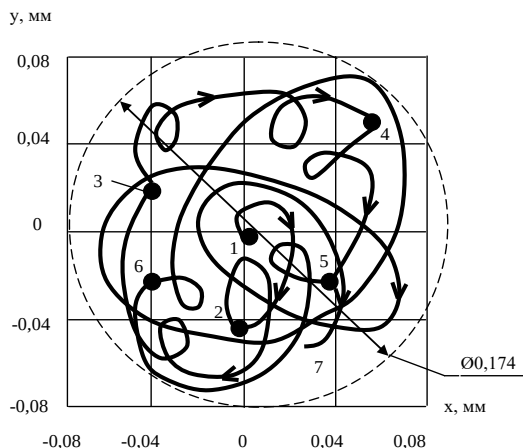


Рис. 10.41. Траєкторія переміщення полюса платформи при послідовних імпульсних збуреннях у всіх штангах робота

Злами мають місце в точках 1, ..6, які відповідають часу дії імпульсних (ударних) навантажень в штангах 1-6.

Послідовні імпульсні навантаження ускладнюють рух платформи. Траєкторія знаходиться в межах ділянки, близької до колової. На траєкторії простежуються петлеподібні ділянки, подібні власним коливанням окремих штанг. В подальшому (точка 7 і далі) траєкторія руху платформи набуває затухаючої еліптичної спіралі, яка закінчується в точці 1.

Таким чином встановлено, що для опису динамічних процесів рухомої штанги доцільно використати математичну модель еквівалентної балки з розподіленою по довжині масою. Пружні властивості штанги залежать від амплітуди коливань і являють собою нечітку множину, яка описується трикутними функціями приналежності, відповідними малим і великим амплітудам коливань. При цьому жорсткість штанги при малих амплітудах в 2..3 рази нижча, ніж жорсткість при великих амплітудах коливань.

Встановлено, що динамічні переміщення мають складний спіралевидний характер із петлеподібними ділянками. Для зменшення області динамічних переміщень запропоновано інноваційне технічне рішення захищене одержаним патентом України[53] , яке полягає у застосуванні приводів просторових мікропереміщень робочого органу маніпулятора.

## **ЧАСТИНА IV**

### **Елементи теорії проектування наземних роботизованих комплексів**

#### **РОЗДІЛ 11**

#### **Концепція теорії проектування наземних роботизованих комплексів**

##### **11.1. Загальні принципи проектування**

В результаті аналізу наявних конструкцій наземних роботизованих комплексів спеціального призначення встановлено, що вони задовольняють групі вимог відповідно виконуваних функцій. Дані вимоги враховують умови експлуатації наземних роботизованих комплексів, особливості небезпечних об'єктів та перспективи розвитку робототехніки спеціального призначення. Вимоги є результатом узагальнення проведених досліджень і є основою для розвитку основних положень теорії проектування наземних роботизованих комплексів спеціального призначення, адаптованих для роботи з небезпечними об'єктами. Вимоги обґрунтовують можливість розроблення наземних роботизованих комплексів із врахуванням технологічних можливостей підприємств України [8,22,23,30-33,66,70].

Наземний роботизований комплекс оснащений маніпулятором призначений для роботи з небезпечними об'єктами повинен бути автономною самохідною, модульною машиною із високою стійкістю до дії зовнішніх факторів.

Наземний роботизований комплекс має високу прохідність і призначений для переміщення по дорогам різного виду, в умовах бездорожжя, а також руху в умовах міста, переміщення в будівлях, печерах інших місцях із непередбачуваними перешкодами. Наземний роботизований комплекс має системи технічного зору, засоби управління, зв'язку та навігації. Наземний роботизований комплекс має забезпечувати виконання функціональних операцій з місця, з коротких зупинок та на ходу в умовах прямого та обмеженого бачення вдень і вночі, при різній вологості атмосфери, під час опадів, запиленості та інших небажаних атмосферних явищ в різні пори року та в різних широтах.

Наземний роботизований комплекс застосовується як дистанційно керований засіб для роботи з небезпечними об'єктами, а також для роботи в автономному режимі. Керуванням комплексом здійснюється оператором або автоматично в певних умовах роботи комплексу.

Комплекс повинен мати самохідне дистанційно кероване шасі колісного, гусеничного або гібридного колісно-гусеничного чи іншого типів. На платформі шасі встановлюється маніпулятор або система маніпуляторів, спеціальні та сервісні

системи. Силова установка шасі є електричною або комбінованою, має необхідні системи, агрегати і вузли, що забезпечують задані характеристики рухомості, керованості та захищеності. Самохідне шасі будується по блочно-модульному принципу. Серед основних модулів маніпулятори різного виду, в тому числі спеціальні засоби. Шасі повинне забезпечувати рух комплексу в складних дорожніх умовах із швидкістю порядку 10 км/год і вище.

Система технічного зору оснащена відеокамерами, сканерами, сенсорами, вимірювальними пристроями, а також обчислювальними і програмними засобами обробки інформації. Вона забезпечує сканування місцевості, обробку одержаної інформації, розпізнавання дорожніх перешкод, характерних ділянок місцевості та дорожньої інфраструктури. Обчислювальний (інтелектуальний) блок забезпечує можливість топографічної, прив'язки, навігації, автономну орієнтацію на місцевості, визначення курсу та обчислення довжини пройденого шляху.

Можливим є застосування інерційної навігаційної системи для визначення необхідного курсу та прокладання маршрутів руху.

Робочий модуль комплексу включає маніпулятори із відповідними системами керування, спрощені маніпулятори призначені для виконання окремих операцій, оптико-електронні пристрої з тепловізійними та радіолокаційними засобами. Також використовуються лазерні системи орієнтації, зокрема дальноміри, лазерні лінії зв'язку, стабілізатори положення маніпуляційних систем.

Додаткове обладнання наземного роботизованого комплексу включає системи супутникової навігації, систему аерозольних (димових) завад та захисту оперативно-тактичної інформації. Наземний роботизований комплекс повинен забезпечувати виконання операцій з небезпечними об'єктами або інші завдання на рівнинній, лісовій, гірській, степовій та урбанізованій місцевості. На дорогах з різноманітним покриттям та в умовах бездоріжжя, вдень і вночі, в умовах обмеженої видимості при можливій активній протидії. Наземний роботизований комплекс повинен забезпечувати можливість руйнування малорозмірних інженерних споруд.

Функціональне призначення та технічні характеристики наземних роботизованих комплексів повинні відповідати міжнародним стандартам [66-68]. Основні положення даних стандартів наведені нижче.

Рекомендовані технічні характеристики наземних роботизованих комплексів середнього класу узагальнені у наступних положеннях (орієнтовно). Рекомендований тип базової платформи – дистанційно керована, модульна, малогабаритна з гусеничним або колісним рушієм високої прохідності колісна формула 4x4, 6x6 або 8x8 з використанням електромеханічного приводу рушія (мотор - колеса). Межі габаритних розмірів наземних роботизованих комплексів 1200\*800\*500 мм. Кліренс не менше 200мм. Максимальні кути підйому і крену 30°. Максимальна ширина траншеї 0,3мм, висота перешкоди у вигляді вертикальної стінки 170мм. Максимальна глибина броду (з твердим дном 0,3мм). Тривалість безперервної роботи 3...4 год. Маса наземного роботизованого комплексу 100...300кг. Вантажопідйомність шасі 1500Н, вантажопідйомність маніпулятора 250...500Н.

З метою збільшення маневреності рекомендується використання автономних мотор-коліс. Можливість забезпечення рухомості коліс при руйнуванні протекторів. Забезпечення радіуса повороту не більше 3м та можливості повороту на місці.

Шасі наземного роботизованого комплексу має джерела живлення у вигляді акумуляторних батарей та однопровідну схему електромережі з напругою 11,5...14,5В.

Вимоги до засобів зв'язку і навігації наземного роботизованого комплексу повинні відповідати стандартам STANAG 45 3S [66-68] та інших.

Система орієнтування і навігації наземних роботизованих комплексів інерціально-супутникова (GPS, GALLILEO, SBAS). Згідно наявних вимог система забезпечує автоматизоване безперервне визначення поточних координат наземного роботизованого комплексу, його висоту і дирекційний кут повздовжньої вісі під час руху та на стоянці, а також точного часу. Точність визначення координат (середньоквадратична похибка) 15м, висота 5м. При застосуванні інерціальної системи навігації похибки визначення координат знижуються до 10м. Вимоги до засобів відеоспостереження визначають загальний кут огляду відеокамер не менше 120° у горизонтальній площині та -10°..+30° у вертикальній площині. Для реалізації вказаних вимог рекомендовані спеціальні оптичні пристрої [156].

При необхідності можуть бути використані поворотні камери. Засоби технічного зору повинні мати дальність виявлення об'єктів 3...5 км. Засоби повинні мати захист від засвітлювання, та інших завад.

Кути повороту маніпулятора у горизонтальній площині  $\pm 90^\circ$ , у вертикальній площині  $-7^\circ..+30^\circ$ . Радіус автономної дії наземного роботизованого комплексу не менше 2000м. Тривалість роботи в автономному режимі не менше 10 год. Максимальний кут підйому та крену 30°. Як правило, наземний роботизований комплекс повинен виконувати роботу з коротких зупинок або в стаціонарному режимі. Під час руху передбачена можливість виконання окремих операцій. Наземні роботизовані комплекси повинні нормально функціонувати в умовах впливу електромагнітних полів ліній електромереж, накопичених статичних електричних зарядів на різних предметах включаючи сам наземний роботизований комплекс. При цьому наземний роботизований комплекс повинен бути захищений від дії радіотехнічних засобів різноманітного призначення.

Повинні бути вжиті заходи по забезпеченню функціонування наземних роботизованих комплексів і стійкості до зовнішніх впливів. Температурний діапазон функціонування роботизованих комплексів  $-40..+50^\circ\text{C}$ . Відносна вологість до 98%. Пориви вітру до 25м/с. Функціонування роботизованих комплексів при наявності дощу та запиленості повітря.

Наземні роботизовані комплекси повинні бути стійкими до впливу миючих засобів, засобів дезактивації, дегазації, дезінфекції. Відповідна стійкість передбачена до дії палива та мастил, а також біологічних чинників. Складові наземних роботизованих комплексів повинні мати стійкість до дії механічної вібрації в діапазоні частот 5..500Гц з амплітудою до 5g. Регламентована стійкість до

одиначного механічного удару з піковим пришвидшенням до 75g та тривалістю ударного пришвидшення 5..15мс. Удари багатократної дії з піковим ударним пришвидшенням до 15g та тривалістю ударного пришвидшення 5..15мс.

Наземні роботизовані комплекси спеціального призначення повинні відповідати високим вимогам щодо надійності. Надійність забезпечується протягом всього життєвого циклу, що включає: транспортування, зберігання, підготовку до використання, застосування, зокрема спеціального застосування, технічного обслуговування та ремонту, зокрема в польових умовах та в умовах підприємства.

Встановлені різні показники надійності для окремих вузлів наземного роботизованого комплексу. Для шасі параметри потоку відмов визначаються в одиницях загального кілометражу. За перші 2000км не більше 1 відмови на 500км. Ресурс шасі до першого капітального ремонту 15000км до другого 12000км. Загальний кілометраж до 27000 км. Ресурс по маніпулятору залежить від умов експлуатації наземного роботизованого комплексу і складає в середньому не менше 15000 год при середньому напрацюванні на відмову не менше 1000 год. Гарантійний термін експлуатації наземного роботизованого комплексу не менше 5..10 років.

Встановлені вимоги щодо транспортабельності наземного роботизованого комплексу. Зокрема, при транспортуванні забезпечується фіксація рухомих вузлів маніпулятора, підвіски шасі, оптичних приладів та інших пристроїв.

До наземних роботизованих комплексів висуваються жорсткі вимоги щодо стандартизації та уніфікації основних вузлів. Системи і агрегати комплексу повинні мати оптимальну конструктивну і технологічну уніфікацію із зразками техніки, що виробляються і експлуатуються в Україні. Блоки, модулі, вузли і деталі повинні бути взаємозамінні без доробок та прилаштування в процесі експлуатації. Розроблення маніпуляторів наземних роботизованих комплексів повинно проводитись з оптимальним застосуванням стандартних, уніфікованих і раніше розроблених вузлів і агрегатів, в основному тих які виробляються в Україні.

Вимоги щодо технологічності включають забезпечення можливості виготовлення маніпуляторів та наземних роботизованих комплексів у цілому на підприємствах України. При цьому передбачена можливість одиничного, серійного та масового виробництва наземних роботизованих комплексів.

Конструктивне виконання маніпуляторів наземних роботизованих комплексів повинно забезпечувати компактність розташування агрегатів, вузлів апаратури та комунікацій. Компонівка маніпуляторів повинна мінімальним чином змінювати положення центра мас наземного роботизованого комплексу в процесі його функціонування та переміщення, зокрема, при його переміщенні на складних ділянках доріг (підйоми, спусків, схили тощо).

Необхідно забезпечити максимально зручні умови доступу до окремих вузлів і агрегатів наземного роботизованого комплексу з можливістю візуального (безапаратного) контролю його працездатності максимальну зручність, простоту та безпеку огляду та обслуговування наземного роботизованого комплексу, заходів його збереження та консервації.

Необхідно передбачити можливість модифікації маніпулятора та наземного роботизованого комплексу в цілому у напрямку оснащення додатковим захватними пристроями та іншими засобами.

При розробленні наземних роботизованих комплексів спеціального призначення висуваються техніко- економічні вимоги, зокрема за критерієм "ефективність-вартість" у порівнянні із зразками аналогічного іноземного виробництва. Додатково враховуються технологічні чинники, трудомісткість виготовлення, наявність дефіцитних матеріалів та сировини. При техніко- економічному обґрунтуванні розробки повинні бути врахована орієнтовна вартість дослідно-конструкторських робіт, вартість та терміни виробництва дослідних зразків, об'єктів випробування, вартість експлуатації та ремонту наземних роботизованих комплексів.

Окремі вимоги висуваються до метрологічного забезпечення функціонування наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. Повинні бути розроблені та доведені до практичного використання засоби (системи) виміру і контролю параметрів статичних і динамічних характеристик маніпуляторів, шасі, ходової частини та інших засобів, зокрема в польових умовах. Засоби контролю повинні розроблятися з можливістю їх перевірки в реальних умовах експлуатації наземних роботизованих комплексів. Повинні бути розроблені методики випробування і контролю основних характеристик наземних роботизованих комплексів, сформульовані відповідні критерії оцінки кількісних параметрів які визначають якісні показники їх роботи. Необхідно враховувати можливість застосування сучасних засобів вимірів та апаратури, доцільність застосування нестандартних засобів вимірювання необхідних при розробленні виготовленні і експлуатації наземних роботизованих комплексів. Для оперативного розроблення та підвищення якості маніпуляторів та наземних роботизованих комплексів в цілому необхідно розробити та довести до практичного використання необхідну номенклатуру стендів і оснастки для експериментального дослідження розроблених дослідних зразків наземних роботизованих комплексів та діагностики технічного стану наземних роботизованих комплексів, що знаходяться в експлуатації. Зокрема необхідна розробка обладнання для визначення живучості наземних роботизованих комплексів та їх стійкості до зовнішніх впливів.

Розроблення наземних роботизованих комплексів повинно проводитись із врахуванням світових стандартів в галузі НРК [66].

Наземні роботизовані комплекси розробляються в рамках єдиної стратегії в основу якої покладено спільну архітектуру безекіпажних систем JAVS (Joint Architecture for Unmanned Systems) [68].

Наземні роботизовані комплекси (Unmanned Ground Vehicle "VGV") повинні розроблятися згідно сучасних вимог. Сучасною тенденцією розвитку наземних роботизованих комплексів спеціального призначення є створення напівавтономних систем в рамках роботизованих команд Man/Unmanned Teaming.

В [67] описано застосування бойових наземних роботизованих комплексів в системах протиповітряної оборони малої дальності. При цьому використовується



мережа ударних безекіпажних платформ (UGV) оснащених кулеметами та керованими ракетами (протитанковими чи зенітними). Прикладом таких комплексів є «Фантом» [87].

Одним із перспективних напрямків є спільне застосування наземних роботизованих комплексів різних розмірів (Marsupial robotics, «сумчаста» робототехніка) [85].

Наземні роботизовані комплекси застосовуються в якості засобів хімічної та бактеріологічної розвідки.

Для зв'язку з наземними роботизованими комплексами застосовують радіорелейні системи, зокрема ті, що базуються на літальних апаратах різного виду.

Наземні роботизовані комплекси мають ряд недоліків. До них відносяться обмежений час роботи, чутливість до зовнішніх факторів, зокрема метеорологічних умов. Як недолік слід відзначити недостатню ефективність оптичних систем. Зміна поля зору оптичних систем негативно впливає на сприйняття візуальної інформації.

Недоліком наземних роботизованих комплексів є низька швидкість переміщення (до 10 км/год) та низька прохідність в умовах бездоріжжя.

Перспективним напрямком застосування наземних роботизованих комплексів є їх використання для проведення дистанційно керованих операцій із небезпечними об'єктами. Наземні роботизовані комплекси також застосовуються для перевезення небезпечних вантажів.

Згідно пропозицій міжнародних стандартів[96] класифікація наземних роботизованих комплексів проводиться за трьома категоріями: розміром, масою, режимом роботи. За розміром і функціональними можливостями наземні роботизовані комплекси розділені на наступні групи. Мікро-масою до 4,5 кг (10 фунтів); малі з масою до 90 кг (200 фунтів); середні масою 90...900 кг; великі масою понад 900 кг.

Визначено ряд режимів функціонування наземних роботизованих комплексів. До них відноситься підключений (прив'язаний) режим, де наземний роботизований комплекс керується через кабельну систему. Режим дистанційного керування через систему радіо (або оптичного чи іншого) зв'язку. Даний режим може здійснюватися 100-відсотковим ручним керуванням або телекеруванням з використанням шаблонів (підказок) які використовують дані зворотного зв'язку від наземного роботизованого комплексу до оператора. Автономний режим роботи наземного роботизованого комплексу потребує лише періодичного втручання оператора.

Випробування наземних роботизованих комплексів здійснюються із врахуванням всіх типів кліматичних та екологічних умов.

Розглядаються різноманітні види дорожніх умов, різні типи ґрунтів. Враховуються особливості експлуатації наземних роботизованих комплексів на первинних і вторинних дорогах.

Встановлюються можливості функціонування наземних роботизованих комплексів в умовах природних і техногенних перешкодах і навколо них.

Враховується вплив гранично високих і гранично низьких температур, атмосферних опадів, запиленості повітря та інші фактори. Значними є впливи вібрації, механічних чинників (удари), а також радіаційні та електромагнітні впливи.

Наземні роботизовані комплекси тестуються відповідним чином для перевірки спроможності протистояти вищезазначеним та іншим факторам.

При тестуванні наземних роботизованих комплексів, які працюють в автономному режимі, проводяться імітаційне моделювання поведінки комплексу в реальних умовах.

Маршрути руху наземного роботизованого комплексу моделюються з метою контролю правильності рішень, які приймаються системою керування комплексу у надзвичайних ситуаціях.

При випробуваннях наземних роботизованих комплексів оцінюється їх мобільність. Для оцінки мобільності використовується математичне моделювання. Математична модель включає алгоритми для моделювання наземних роботизованих комплексів в умовах пересіченої місцевості. Модель базується на експериментальних даних і включає виміри параметрів ґрунту по якому рухається наземний роботизований комплекс. Застосована бібліотека моделей NG-NRMM [96]. Архітектура бібліотеки дозволяє врахувати особливості наземного роботизованого комплексу та умови навколишнього середовища. В якості вхідних даних моделі використовується фотозйомні виміри параметрів ґрунту на траєкторії руху наземного роботизованого комплексу. Основою моделі є оцифровані карти місцевості. Вони використовують детерміновані та стохастичні параметри для опису дорожніх умов. При цьому уточнюються рівень достовірності параметрів на основі реальних вимірів здійснених апаратурою наземного роботизованого комплексу.

Використана система математичного моделювання є передумовою впровадження систем штучного інтелекту в процес керування наземним роботизованим комплексом. Для керування застосовується операційна система наземного роботизованого комплексу (ROS-M). Дана система забезпечує 3D моделювання і відповідну візуалізацію робота [68]. Перші застосування системи описані в 2017 р. В 2020 р. розроблена нова версія системи (ROS-M2.0) із поліпшеним кіберзахистом. Як недолік даної системи слід відзначити надмірність даних та складність системи. Це є суттєвим недоліком для малих наземних роботизованих комплексів малих розмірів.

Важливою тенденцією розроблення безпечних транспортних платформ є мінімізація часу перехідних процесів системи наземного роботизованого комплексу. До таких систем відносяться бортові системи пожежогасіння, активного бронезахисту та протимінного захисту. Швидкодія даних систем складає мілісекунди, а швидкодія систем їх керування мікросекунди.

В системах керування застосовуються різноманітні засоби AR доповненої реальності (Augment Reality) [66]. Стосовно наземних роботизованих комплексів застосовуються різні варіанти інтеграції доповненої реальності у систему керування. Найбільш простим є застосування доповненої реальності в засобах візуалізації

оператора наземного роботизованого комплексу. Це може бути зроблено шляхом накладення даних доповненої реальності на відеопотік бортових камер комплексу.

Для автономних наземних роботизованих комплексів частина загальних даних доповненої реальності передається на його борт і використовується автопілотом.

Для керування наземним роботизованим комплексом, як перспективний напрямок, використовуються жести. Жестовий принцип керування наземним роботизованим комплексом [100] використовується як резервний. При цьому використовується певна кількість жестових команд та відповідний темп їх поновлення.

Впровадження штучного інтелекту AI (Artificial Intelligence) є важливим напрямком розвитку наземних роботизованих комплексів. В даний час використовуються два альтернативних визначення штучного інтелекту. До першого відносяться застосування алгоритмів вибору із широкого кола можливостей із застосуванням висновків із аналізу ситуації (навчання) або адаптації до зовнішніх умов. Другому визначенню підлягають системи, які інтерпретують наявні дані обґрунтовуючи знання на основі цих даних і обирають найкращі дії направлені на досягнення поставленої мети.

Основою штучного інтелекту є ряд підходів і методів. Зокрема це машинне навчання і навчання з підкріпленням. Метод машинного мислення включає планування, представлення знань, їх обробку, пошук і оптимізацію.

В сфері керування наземними роботизованими комплексами технології штучного інтелекту є суттєвим доповненням до керованого або автономного режимів роботи наземних роботизованих комплексів. Основними напрямками застосування систем штучного інтелекту є виявлення та ідентифікація загроз, оцінка намірів, напівавтономний вибір вимірювачів та вогневих засобів, робота з меншими обчислювальними ресурсами. Значна роль штучного інтелекту у впровадженні технологій доповненої реальності [68].

На основі проведених інформаційних досліджень обґрунтована концепція та уточнені напрямки розвитку теорії проектування мобільних роботів спеціального призначення [80]. При цьому встановлена послідовність виконання окремих робіт і сформована структура та послідовність проектування наземних роботизованих комплексів спеціального призначення по напрямкам. Для кожного напрямку використані спеціальні методи.

Проведено обґрунтування концепції розвитку теорії проектування маніпуляторів та наземних роботизованих комплексів спеціального призначення в цілому.

## **11.2. Алгоритми і методи проектування**

В процесі проектування необхідно здійснити вибір геометричних параметрів наземних роботизованих комплексів окремо. Вибір проводиться окремо по групам процесів. Вибрані параметри підлягають уточненню. Для цього застосовані спеціальні методи. При виборі параметрів наземних роботизованих комплексів

враховані особливості їх схемних рішень. Запропоновані як розімкнені кінематичні схеми, так і схеми з механізмами паралельної кінематичної структури. Реалізовано блочно-модульний метод побудови наземного роботизованого комплексу [88]. Запропоновано і експериментально перевірено окремі модулі, зокрема, модулі шасі та маніпуляторів. Обґрунтовані конструктивні заходи по з'єднанню модулів. Для підвищення точності позиціонування в наземних роботизованих комплексах застосовані маніпулятори побудовані з використанням систем приводів макропереміщень та мікропереміщень [80]. Дані технічні рішення захищені патентами України [39,40,47,53].

Вибір параметрів наземних роботизованих комплексів здійснено із врахуванням специфіки роботи з небезпечними об'єктами. Запропоновані технічні рішення наземних роботизованих комплексів із немагнітних танеталевих матеріалів (композитів). Розроблені конструктивні рішення наземних роботизованих комплексів та проведено розрахунки напружено-деформованого стану основних вузлів. Запропоновано ряд конструктивних рішень наземних роботизованих комплексів із неметалевих матеріалів, яке реалізує крокуючий робот відповідно патенту України [55].

Проведені дослідження у напрямку радикального підвищення точності позиціонування та стабільності положення виконавчих пристроїв наземних роботизованих комплексів із врахуванням випадкових складових та нечіткості (розмитості, fuzzy) факторів, що визначають параметри стабільності та точності маніпуляторів наземних роботизованих комплексів по двом, трьом та шести координатам .

При цьому запропоновані принципово нові, невідомі в світовій практиці методи, побудовані на основі триангулярної оптичної системи точного позиціонування наземних роботизованих комплексів [156]. Дані системи особливо ефективні для наземних роботизованих комплексів спеціального призначення.

Розроблені теоретичні моделі дії дорожніх умов на наземні роботизовані комплекси спеціального призначення[81]. Проведено визначення особливих груп дорожніх умов та методів їх опису. Встановлені особливості стохастичних плавно змінних та різко змінних ізольованих та періодичних мікро- і макронерівностей дорожнього полотна і бездоріжжя. Застосовані статистичні методи для дослідження дорожніх умов.

При цьому враховані особливості наземних роботизованих комплексів, розміри шасі якого є порівняними із нерівностями дорожнього полотна. Це приводить до можливості неповного контакту колеса чи гусениці із дорогою. Дане наукове положення встановлене в процесі досліджень і розроблені методи його врахування в теоретичних моделях. Запропоновані теоретичні моделі є універсальними і придатні для опису, як різко-змінних, так і плавно-змінних профілів дорожнього полотна. Моделі подані у вигляді тригонометричних рядів спеціального виду. Запропоновані спрощені моделі у вигляді нелінійних кусково-постійних процесів.

Здійснено теоретичний опис дії випадкових нерівностей дороги на шасі наземного роботизованого комплексу. Проведено визначення просторового положення базової системи координат платформи шасі під час руху мобільного робота [79].

Запропоновано методи встановлення стохастичного взаємозв'язку нерівностей дороги по окремії та двох взаємопов'язаних коліях дорожнього полотна із випадковими змінами базової системи координат платформи.

Теоретичний опис подано у вигляді полігармонічних процесів із випадковими амплітудами, частотами та фазами. Даний підхід узагальнює наведені раніше методи теоретичного опису детермінованих дорожніх умов.

Встановлені особливі режими руху шасі наземного роботизованого комплексу пов'язані із випадковими змінами окремих колій (статистичний резонанс). На основі експериментальних досліджень визначені інтегральні статистичні характеристики динамічного переміщення шасі, а відповідно і маніпулятора наземного роботизованого комплексу. Встановлені резонансні властивості рухомого наземного роботизованого комплексу при його переміщенні по дорозі з випадковими квазістаціонарними нерівностями.

Проведено обґрунтування регламентів статичних характеристик наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. Використано теоретичні та експериментальні дослідження статичних характеристик наземних роботизованих комплексів. При цьому розроблені методи теоретичних розрахунків статички наземних роботизованих комплексів, методик та спеціального обладнання і пристосування із проведенням експериментальних досліджень деформативності пружної системи наземних роботизованих комплексів.

Регламенти статичних характеристик сформульовані для наземних роботизованих комплексів різного виду, зокрема наземних роботизованих комплексів з маніпуляторами на основі механізмів із паралельними кінематичними структурами. Регламенти визначають матричні характеристики жорсткості і деформативності наземних роботизованих комплексів при їх просторових навантаженнях.

Регламенти статичних характеристик наземних роботизованих комплексів покладені в основу розроблених методів та методик теоретичних розрахунків наземних роботизованих комплексів та проведених теоретичних та експериментальних досліджень статичних характеристик наземних роботизованих комплексів. Параметри, які визначають матричні характеристики жорсткості і деформативності наземних роботизованих комплексів обґрунтовані на основі теоретичних досліджень. Теоретичні дослідження здійснено відповідно запропонованої ідеї про розділення процесів у пружних системах наземних роботизованих комплексів на макропроцеси (процеси великих деформацій при значних навантаженнях) та мікропроцеси, які відповідають малим (мікрометричним) переміщенням у пружних системах наземних роботизованих комплексів при помірних навантаженнях. Згідно запропонованої робочої гіпотези макропроцеси та мікропроцеси розглядаються окремо, а теоретичні розрахунки статичних

характеристик наземних роботизованих комплексів проводяться на основі принципу суперпозиції.

Експериментальні дослідження статичних характеристик наземних роботизованих комплексів проведені для підтвердження запропонованої робочої гіпотези. Розроблена методика визначення статичних характеристик наземних роботизованих комплексів. Для вимірів статичних характеристик рекомендовано спеціальне обладнання і пристосування. Реалізовані пристрої навантаження які різняться на 2...3 порядки. В результаті проведено виміри статичних характеристик та деформативності наземного роботизованого комплексу в цілому.

При вирішенні задач статики визначені параметри силових факторів, які подані у вигляді динамічних гвинтів, що послужило основою для розвитку методів гвинтового числення, як узагальнюючого теоретичного апарату дослідження статики, кінематики та динаміки наземних роботизованих комплексів[15]. Методи гвинтового числення розвинені у напрямку конкретного застосування при дослідженні характеристик наземних роботизованих комплексів

На основі розвинених методів гвинтового числення проведено визначення кінематичних характеристик наземних роботизованих комплексів із раціоналізацією траєкторій макропереміщень шляхом введення зворотніх зв'язків по векторним кінематичним параметрам та синтезом раціональних траєкторій із застосуванням гармонічних рядів. Визначені кінематичні параметри мікропереміщень виконавчих органів наземних роботизованих комплексів.

Розроблені методи поліпшення кінематичних характеристик маніпуляторів забезпечують формування раціональних траєкторій переміщення виконавчого органу наземного роботизованого комплексу. Вони базуються на врахуванні реальних кінематичних параметрів шляхом їх вимірів та використанням одержаних значень для реалізації зворотніх зв'язків у системі керування наземного роботизованого комплексу. Наявність зворотніх зв'язків суттєво підвищує точність відпрацювання траєкторій виконавчим органом наземного роботизованого комплексу. При цьому реалізується можливість синтезу раціональних траєкторій виконавчого органу. При синтезі траєкторій реалізуються міні-максні критерії оптимізації параметрів траєкторій, зокрема забезпечується умова мінімального часу переміщення виконавчого органу при максимально допустимих пришвидшеннях. Для спрощення і уніфікації обчислювальних процедур параметри траєкторій задаються у вигляді гармонічних рядів, а зміна параметрів досягається зміною коефіцієнтів рядів. Використання гармонічних рядів зменшує негативний вплив особливостей траєкторії на кінематичні параметри руху виконавчого органу наземного роботизованого комплексу. Запропонована спеціальна методика вибору коефіцієнтів гармонічних рядів та введення їх варіацій, що забезпечують можливість ефективної зміни траєкторій з метою досягнення їх раціонального виду.

На основі дослідження кінематичних параметрів мікропереміщень виконавчих органів наземних роботизованих комплексів розроблені рекомендації по підвищенню загальної кінематичної точності наземних роботизованих комплексів. Дані

рекомендації направлені на корекцію параметрів мікропереміщень. При цьому досягається підвищення точності наземного роботизованого комплексу і зменшення динамічних навантажень на нього, а відповідно, зниження статичних і динамічних деформацій пружної системи наземного роботизованого комплексу. Рекомендації реалізуються шляхом встановлення кінематичних обмежень на алгоритми керування системою приводів наземних роботизованих комплексів. Алгоритми включають інформацію про параметри мікропереміщень, зокрема коливальність процесів на особливих ділянках та амплітудні значення коливальних процесів мікропереміщень окремих вузлів наземних роботизованих комплексів.

Підвищення кінематичної точності наземних роботизованих комплексів суттєво поліпшує їх експлуатаційні характеристики та розширює можливості їх застосування при виконанні операцій із небезпечними об'єктами.

Розроблено алгоритм формування підходів до забезпечення необхідних динамічних характеристик наземних роботизованих комплексів спеціального призначення що враховують динамічні процеси макропереміщень, процеси мікропереміщень та їх взаємодію.

На основі запропонованих підходів здійснено врахування інерційних властивостей просторових динамічних систем наземних роботизованих комплексів на основі теорії стохастичного тензорного поля, застосованої для опису тензорів інерції елементів і вузлів наземних роботизованих комплексів при макропереміщеннях та мікропереміщеннях.

Розроблено нові підходи до забезпечення необхідних динамічних характеристик наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. Підходи включають розділення процесів у наземних роботизованих комплексах на макропроцеси (процеси пов'язані із великими переміщеннями) та мікропроцеси, що визначають показники точності наземних роботизованих комплексів. Для дослідження динаміки наземних роботизованих комплексів використані комплексні методики розрахунку. Вони враховують динамічні процеси макропереміщень, процеси мікропереміщень та їх взаємодію. Взаємодія процесів визначає особливості динамічних переміщень наземних роботизованих комплексів. Вони полягають у виникненні складних просторових переміщень вихідної ланки наземних роботизованих комплексів. Встановлено масштаби динамічних збурень, які є наслідком мікропереміщень. До таких збурень відносяться, зокрема, ударні (імпульсні) навантаження в ланках динамічної системи наземного роботизованого комплексу. Для забезпечення необхідних динамічних характеристик наземних роботизованих комплексів розроблені методи врахування інерційних властивостей просторових динамічних систем наземних роботизованих комплексів. Інерційні властивості просторових динамічних систем описуються тензорними величинами. Запропоновано методи опису тензорів інерції окремих ланок наземних роботизованих комплексів спеціальними динамічними параметрами сформованими на основі теорії стохастичного тензорного поля. Введені динамічні параметри визначають інерційні властивості маніпуляторів. Вони дають можливість у замкненому вигляді виконати

опис тензорів інерції елементів і вузлів наземних роботизованих комплексів при макропереміщеннях та мікропереміщеннях. Запропоновані методи є основою розроблення математичних моделей просторових динамічних систем наземних роботизованих комплексів, елементи яких здійснюють як поступальні, так і сферичні рухи.

Математичне моделювання просторових динамічних систем наземних роботизованих комплексів проведене з метою поліпшення їх динамічних характеристик, встановлення особливостей сферичних рухів при динамічних мікропереміщеннях виконавчого органу наземного роботизованого комплексу. Здійснено визначення параметрів особливих динамічних процесів у наземних роботизованих комплексах, зокрема при наявності нелінійних та імпульсних збурень і нестационарних стохастичних змін характеристик наземних роботизованих комплексів.

Одержані результати математичного моделювання просторових динамічних систем наземних роботизованих комплексів по розробленим спеціальним моделям. Розроблені математичні моделі включають парціальні динамічні системи сферичних рухів. Вони враховують особливості змін тензорів інерції вузлів наземних роботизованих комплексів при різних умовах навантаження та зміні просторового положення наземних роботизованих комплексів. Для цього застосовані методи статистичної динаміки адаптовані до можливих випадкових змін інерційних параметрів наземних роботизованих комплексів. Використані запропоновані методи опису процесів у термінах стохастичного тензорного поля тензорів моментів інерції елементів динамічної системи наземного роботизованого комплексу.

В результаті математичного моделювання визначені параметри сферичних рухів характерних вузлів та виконавчого органу наземного роботизованого комплексу. Основну увагу приділено просторовим мікропереміщенням виконавчого органу наземного роботизованого комплексу. Виходом математичного моделювання є запропоновані рекомендації по поліпшенню динамічних характеристик наземних роботизованих комплексів.

На основі математичного моделювання встановлено наявність особливих динамічних процесів в наземних роботизованих комплексах. Визначено основні параметри особливих процесів. Дані процеси є результатом наявності нелінійних та імпульсних збурень в динамічній системі наземного роботизованого комплексу. Вони залежать від змін динамічних характеристик наземних роботизованих комплексів обумовлених змінами їх інерційних властивостей. Дані зміни мають нестационарний і стохастичний характер. Дослідження особливих процесів є основою для подальшого визначення динамічних навантажень, що діють на наземні роботизовані комплекси спеціального призначення.

Для аналізу динамічних властивостей наземних роботизованих комплексів використані розвинені в процесі досліджень методи гвинтового числення.

Визначені динамічні навантаження, що діють на наземні роботизовані комплекси спеціального призначення, зокрема, ступінчастих та імпульсних динамічних



навантажень. Встановлення взаємозв'язку кінематичних та динамічних гвинтів, що описують дані навантаження. Запропоновані методи реалізації імпульсних навантажень. Розроблено інноваційне технічне рішення пристрою для імітації дії імпульсного навантаження на наземний роботизований комплекс. Пристрій розроблено на основі використаних методів гвинтового числення.

Досліджені специфічні динамічні процеси викликані просадкою ґрунту на якому знаходиться платформа наземного роботизованого комплексу [80]. Встановлення характеристик нелінійної деформації ґрунту при дії на мобільний робот випадкових чинників та впливу деформації ґрунту на динамічну точність наземного роботизованого комплексу.

Побудована динамічна модель підресорених частин шасі та математична модель переміщення наземного роботизованого комплексу обумовлених посадкою ґрунту. Визначені закономірності вказаних переміщень.

Визначено характеристики динамічних процесів у маніпуляторах мобільних роботів обумовлені дією ударних навантажень різного виду.

Проведено ранжування факторів, які впливають на ймовірність безвідмовного функціонування наземного роботизованого комплексу. Розглянуто вплив вібраційних навантажень на працездатність наземного роботизованого комплексу та його основних вузлів.

Визначено кількісні параметри спектру випадкових навантажень, обумовлених робочими процесами гусеничного рушія, наземного роботизованого комплексу під час його переміщення та при зупинці.

Встановлено вплив приводної системи мобільного робота та гусеничного рушія на швидкість шасі та положення маніпулятора. Робочі процеси гусеничного рушія враховують розподіленість параметрів динамічної системи та невизначеність умов опирання гусениці. Розглянуті процеси, що мають місце при переміщенні наземного роботизованого комплексу та при його раптовій зупинці. Визначені параметри, які характеризують похибки позиціонування робочого органу наземного роботизованого комплексу. Запропоновані методи підвищення точності позиціонування робочого органу наземного роботизованого комплексу.

На основі досліджень впливу приводів переміщення наземного роботизованого комплексу, ходової частини та гусеничного рушія запропоновані конструктивні заходи по підвищенню плавності руху шасі наземного роботизованого комплексу. Для цього запропонована спеціальна конструкція трансмісії.

В результаті проведених робіт розроблено ряд рекомендацій по вдосконаленню схемних і конструктивних рішень вузлів наземних роботизованих комплексів спеціального призначення [80]. В своїй сукупності розроблені рекомендації являють собою набір основних положень теорії проектування наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. Наземні роботизовані комплекси призначені для роботи як в автономному режимі, так і в режимі телекерування. Основною їх перевагою у порівнянні з аналогами є підвищена точність маніпулювання об'єктами як у статичному, так і у динамічному режимах.

## РОЗДІЛ 12

### Розроблення схемних і конструктивних рішень наземних роботизованих комплексів

#### 12.1 Традиційні схемні рішення маніпуляторів наземних роботизованих комплексів

Розвиток основних положень теорії проектування наземних роботизованих комплексів потребує розроблення схемних і конструктивних рішень маніпуляторів. Наявність небезпечного об'єкту потребує вибору спеціальних матеріалів та відповідних технологій виготовлення окремих вузлів і деталей маніпулятора.

Специфіка застосування наземних роботизованих комплексів та особливості їх масо-габаритних параметрів потребує спеціальних підходів і методів підвищення точності позиціонування маніпуляторів. Ці питання є актуальними для розвитку теорії проектування маніпуляторів наземних роботизованих комплексів. Вибір геометричних параметрів маніпуляторів здійснено на основі аналізу наявних конструкцій наземних роботизованих комплексів та результатів проведених досліджень[145,148].

Типова конструкція маніпулятора встановленого на шасі наземного роботизованого комплексу реалізована за схемою маніпулятора важільного типу (рис.12.1).

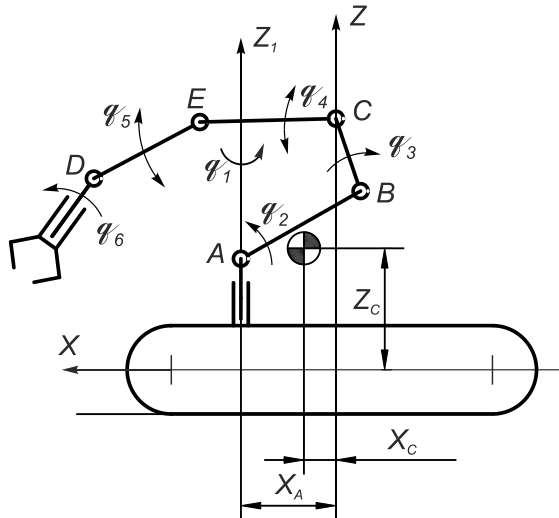


Рис. 12.1. Типова схемна реалізація наземного роботизованого комплексу із  
маніпулятором важільного типу

Наземний роботизований комплекс має гусеничне шасі на якому розміщена поворотна вісь маніпулятора із шарніром А. Шарніри А, В, С, Е, D разом з важелями

утворюють планарну важільну систему маніпулятора. Маніпулятор має поворотний виконавчий орган (схват). Недоліком даного схемного рішення маніпулятора є достатньо високе положення його центра мас. Це знижує статичну стійкість наземного роботизованого комплексу.

Наведене схемне рішення реалізує маніпулятор, що має шість керованих координат  $q_1, \dots, q_6$ . При цьому забезпечується значний робочий простір маніпулятора. Тому висота підйому схвата маніпулятора значно перевищує довжину шасі. При цьому діаметральний розмір робочого простору в горизонтальній площині в 2...3 рази перевищує довжину шасі. Робочий простір типового робота має форму близьку до половини сфери із виключенням ділянки, що відповідає шасі маніпулятора (рис.12.2).

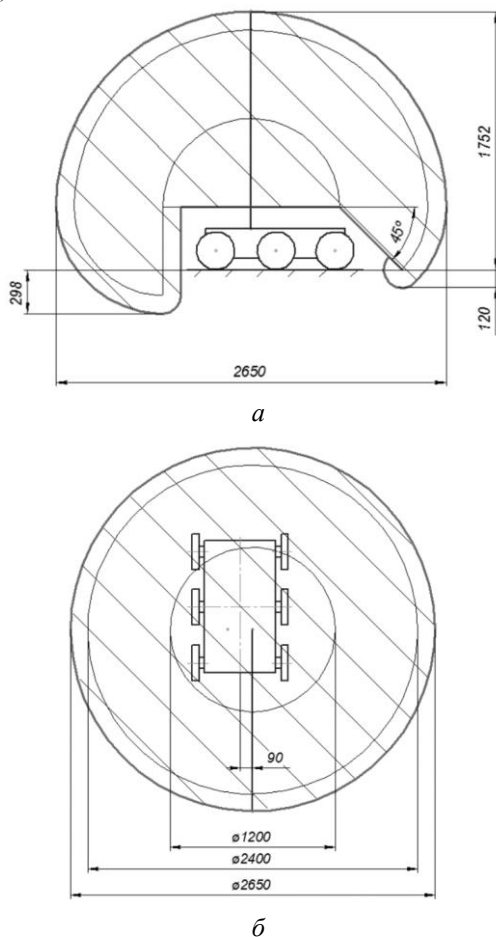


Рис. 12.2. Робочий простір маніпулятора типового наземного роботизованого комплексу: а – вид збоку; б – вид згори

Незначним чином робочий простір охоплює заглибину навколо шасі наземного роботизованого комплексу. При виді згори робочий простір має форму круга в

середній частині якого розміщене шасі робота. Специфіка робочого простору визначає проблеми забезпечення статичної і динамічної стійкості наземного роботизованого комплексу. Ці проблеми загострюються на особливих ділянках траєкторії руху наземного роботизованого комплексу. Актуальним є врахування співвідношення мас робота в цілому та об'єкта маніпулювання. Вказані проблеми є суттєвими при роботі маніпулятора на межі робочого простору, як на периферійних частинах, так і на краях робочого простору по вертикалі.

Наведена конструкція маніпулятора забезпечує можливість роботи в заглибинах, що розташовані нижче площини дорожнього покриття на якому знаходиться наземний роботизований комплекс (рис.12.3).

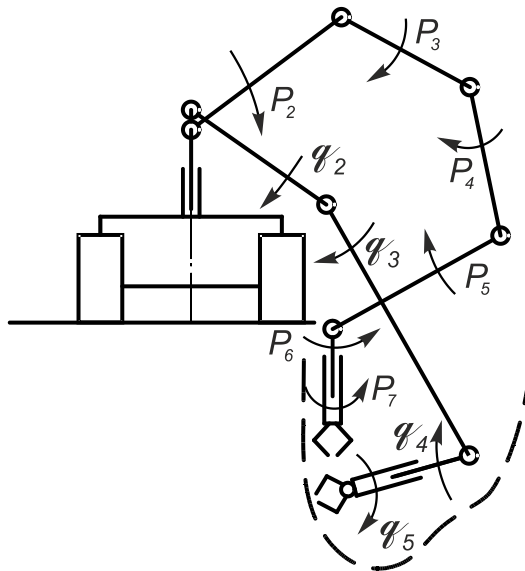


Рис. 12.3. Схема маніпулятора, що забезпечує виконання робіт в заглибинах

Положення центра мас залежить від конфігурації маніпулятора та довжини його важелів. Збільшення довжини важелів приводить до значного збільшення висоти центра мас і відповідно погіршення параметрів статичної стійкості маніпулятора при його роботі із масивними небезпечними об'єктами.

Підвищення загальної довжини маніпулятора у піднятому стані позитивно впливає на збільшення поля огляду оптичних пристроїв маніпулятора. Тому раціональною є схема маніпулятора із додатковим важелем на кінці якого встановлюється оптична система. Схема реалізована в ряді наземних роботизованих

комплексів, які застосовуються для роботи з небезпечними об'єктами [ 80,94,100 ].

Схема маніпулятора із додатковим важелем (рис.12.4) дає можливість підняти відеокамеру на висоту 2-2,5 м і вище. Для забезпечення необхідного поля огляду відеокамеру переміщується спеціальними приводами.

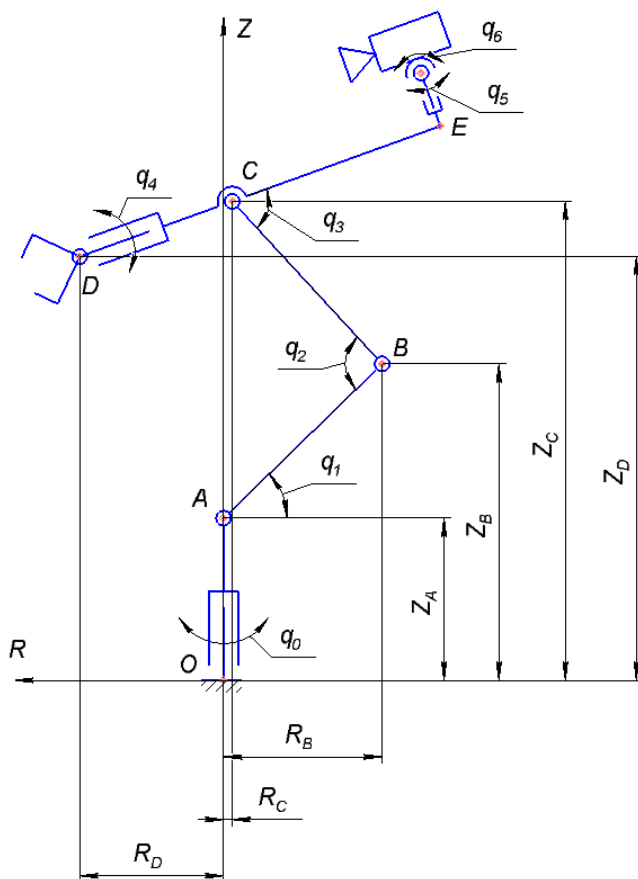


Рис. 12.4. Схемне рішення маніпулятора наземного роботизованого комплексу із спеціальним важелем для встановлення оптичних пристроїв

Дане схемне рішення має додатковий важіль  $CE$ , на кінці якого в точці  $E$  встановлена відеокамера або інший необхідний оптичний пристрій. Дана конструкція забезпечує широке поле огляду відеокамери. При цьому маса додаткового важеля  $CE$  є незначною і мало впливає на підвищення загального центра мас наземного роботизованого комплексу. Додатковий важіль частково врівноважує навантаження схвата  $D$ , що підвищує вантажопідйомність маніпулятора. Важелі маніпулятора  $AB$ ,  $BC$  і  $CD$  переміщуються в паралельних площинах. При цьому реалізується можливість поперечно-кутових переміщень важелів без обмежень обумовлених наявністю сусідніх важелів. Зокрема можливе вертикальне встановлення схвата у верхньому положенні (рис.12.5).

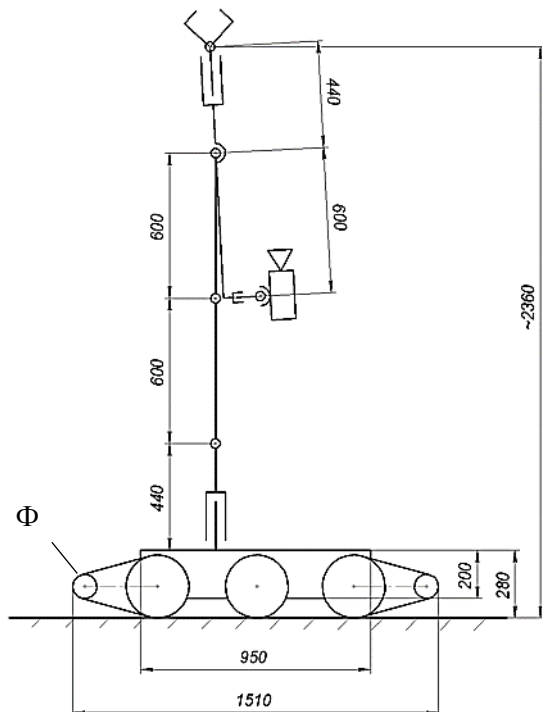


Рис. 12.5. Встановлення схвата маніпулятора у верхньому положенні

Для підвищення статичної стійкості наземного роботизованого комплексу він оснащується додатковими гусеничними рушіями у вигляді консольних рушіїв  $\Phi$  (фліпперів). Вони дають можливість збільшити протяжність опорної частини шасі, а також підвищити прохідність наземного роботизованого комплексу при його переміщенні по нерівній дорозі (рис. 12.6).

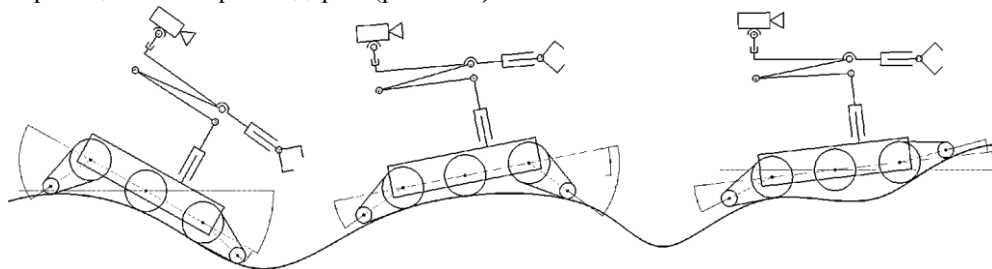


Рис. 12.6. Підвищення прохідності наземного роботизованого комплексу за рахунок фліпперів при його переміщенні по нерівній дорозі

Фліпери встановлюються під необхідним кутом за допомогою спеціальних приводів. При цьому роботизований комплекс може долати значні перешкоди зокрема окремі нерівності на дорозі.

Як правило, наземний роботизований комплекс має не один, а два маніпулятори. Прикладом є робот оснащений стрілецьким озброєнням, що має маніпулятор встановлений на шасі (рис. 12.7).

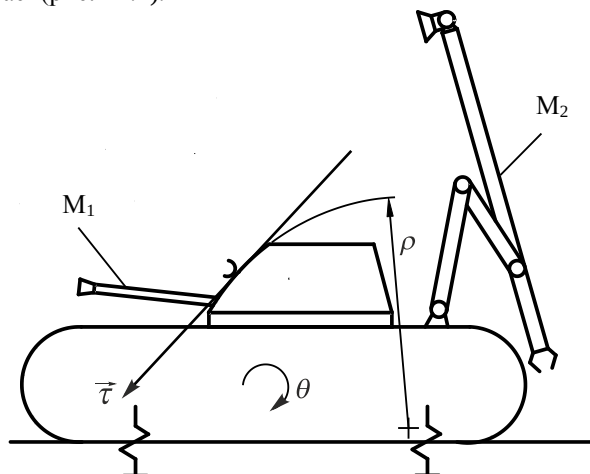


Рис. 12.7. Наземний роботизований комплекс, що має спрощений маніпулятор  $M_1$  для наведення зброї та маніпулятор важільного типу  $M_2$

Маніпулятор для наведення зброї  $M_1$ , як правило має лише один важіль із двома ступенями вільності. Тому він має спрощену кінематичну схему.

Схемне рішення маніпулятора пов'язане із схемним і конструктивним виконанням шасі. В процесі досліджень встановлено, що найбільш раціональним є виконання шасі по модульному принципу[88]. Дане положення перевірено шляхом розроблення і апробації експериментальних зразків модулів. Розроблені взаємозамінні колісні та гусеничні модулі. Колісний модуль має раму, на якій встановлені автономні колісні рушії з приводами (рис. 12.8).

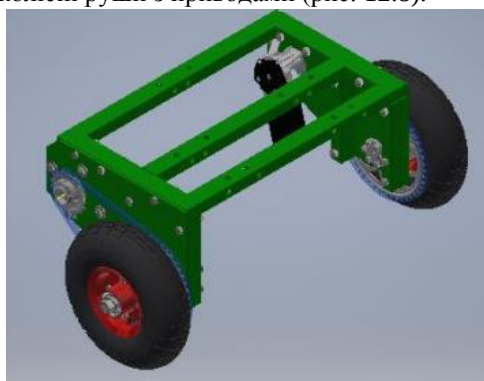


Рис. 12.8. Твердотільна модель розробленого експериментального зразка колісного модуля шасі наземного роботизованого комплексу

Аналогічне виконання має гусеничний модуль шасі.

Модулі можуть поєднуватись в різних варіантах. В раціональному варіанті маємо об'єднання кількох однотипних модулів (рис. 12.9).

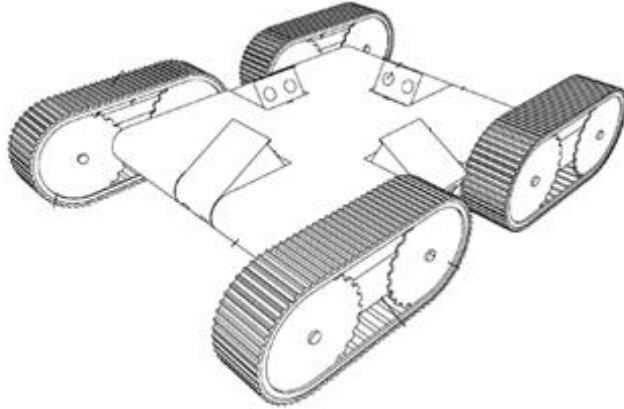


Рис. 12.9. Об'єднання двох модулів в шасі гусеничного типу

Шасі складене із модулів, має уніфіковані вузли кріплення маніпуляторів.

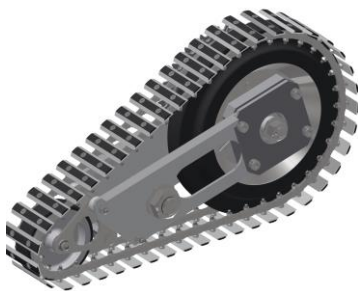
Проведено розроблення конструктивних рішень окремих вузлів і елементів наземних роботизованих комплексів та конструктивних схем роботів у цілому. Розроблені окремі модулі шасі. Вони дозволяють як автономне використання так і об'єднання в один конструктивний вузол. Розроблено базовий модуль гусеничного типу в якому реалізовано об'єднання фліпера і основного гусеничного рушія[88] (рис.12.10).



Рис. 12.10. Твердодільна модель запропонованого автономного модуля шасі гусеничного типу із встановленим на ньому маніпулятором



Основу модуля складають фліпери, що мають рухому гусеницю та привід повороту фліпера навколо опорного барабана (рис. 12.11).



*Рис. 12.11. Твердотільна модель фліпера використаного в автономному модулі шасі гусеничного типу*

Для підвищення прохідності рекомендовано наземний роботизований комплекс складений із двох модулів гусеничного типу (рис. 12.12).



*Рис. 12.12. Твердотільна модель наземного роботизованого комплексу у вигляді мобільної транспортної платформи оснащеної комплектним маніпулятором важільного типу*

Дане схемне рішення забезпечує високу прохідність гусеничного рушія . В разі необхідності мобільна транспортна платформи може змінювати кліренс , переміщуватись покроково або рухатись по сходам.

Можливе поєднання модулів різного типу. Зокрема реалізовано колісно-гусеничний варіант шасі (рис. 2.13).

Використання гібридних колісно-гусеничних рушіїв із позитивним ефектом обґрунтовано в результаті проведених досліджень. Запропоновані і експериментально перевірені окремі колісні і гусеничні модулі. Розроблені та перевірені схеми їх об'єднання.

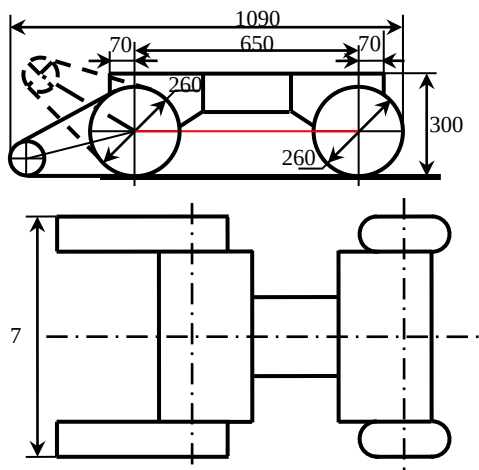


Рис. 12.13. Схемне рішення шасі наземного роботизованого комплексу із двох модулів колісного і гусеничного

Для підвищення прохідності рекомендовано наземний роботизований комплекс складений із двох модулів гусеничного типу [80].

Конструктивні рішення вузлів забезпечують раціональну компоновку шасі та можливість реалізації різних варіантів наземних роботизованих комплексів.

Модулі можуть поєднуватись в різних варіантах і оснащуватись маніпуляторами різного виду. Для виконання окремих робіт раціональним є застосування модульного шасі, оснащеного маніпулятором на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами (рис. 12.14).



Рис. 12.14. Твердотільна модель наземного роботизованого комплексу шасі якого сформовано із модулів колісного та гусеничного типу, а маніпулятор виконано на основі механізму із паралельними кінематичними структурами

Вибір схеми модульного шасі та їх геометричних розмірів здійснюється із врахуванням функціонального призначення наземного роботизованого комплексу. Для розширення функціональних можливостей наземний роботизований комплекс оснащується системою маніпуляторів. Як правило, маніпулятори мають різну вантажопідйомність.

Розроблено наземний роботизований комплекс шляхом об'єднання двох модулів із системою двох ідентичних маніпуляторів розміщених по краях шасі (рис. 12.15).

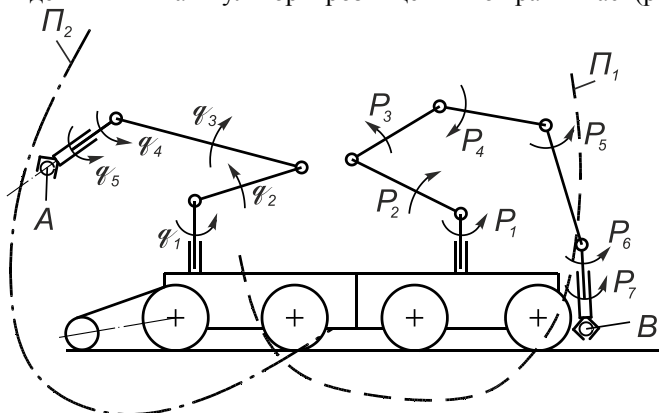


Рис. 12.15. Конструктивне рішення наземного роботизованого комплексу шасі якого має три модулі і оснащена

Дане схемне рішення суттєво збільшує робочий простір наземного роботизованого комплексу. Розміщення маніпуляторів по краях шасі в окремих випадках підвищує його статичну стійкість на особливих ділянках траєкторії руху.

Схемне рішення забезпечує високу прохідність. Воно є доцільним при долатті окремих перешкод та при переміщенні робота по пересіченій місцевості з'єднання модулів шасі є уніфікованим. Схемне рішення допускає різне розташування маніпуляторів на шасі (рис. 12.16).

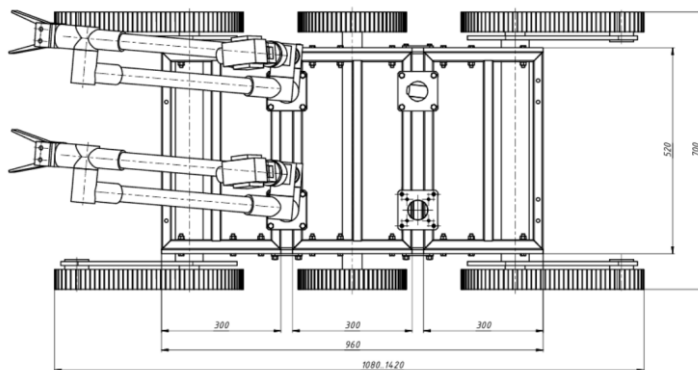


Рис. 12.16. Конструктивна схема шасі наземного роботизованого комплексу складеного із трьох модулів на якому встановлена пара маніпуляторів

Маніпулятори 1, 2 розміщені на поперечній балці і дають можливість працювати з об'єктами одночасно з обох боків шасі 3 мобільного робота (рис. 12.17).

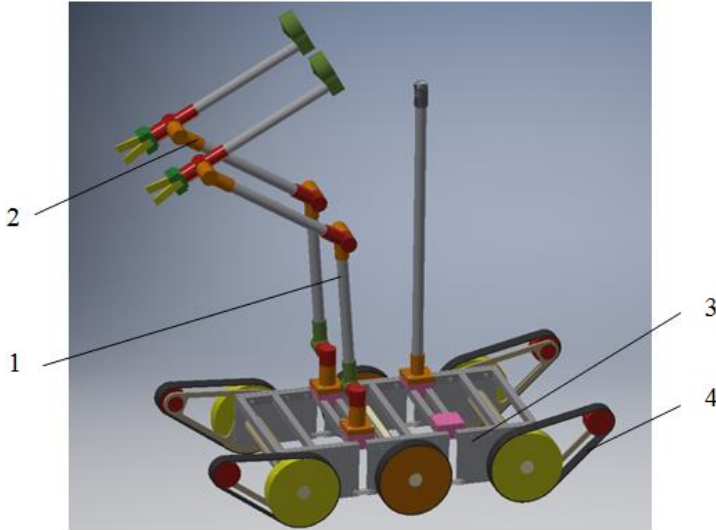


Рис. 12.17. Маніпулятори наземного роботизованого комплексу, розміщені на поперечній балці

Дана конструкція наземного роботизованого комплексу забезпечує робочий простір, що охоплює половину повного тілесного кута

В процесі досліджень розроблені схемні рішення маніпуляторів різного виду.

Наведені схемні рішення наземних роботизованих комплексів реалізовані у вигляді експериментальних зразків [80].

В процесі досліджень запропоновано ряд інноваційних рішень маніпуляторів наземних роботизованих комплексів. Вони включають механізми з паралельними кінематичними структурами. Раціональним є виконання маніпулятора у вигляді паралелограмного механізму (рис. 12.18).

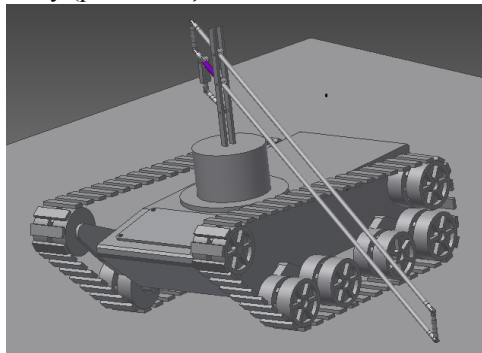
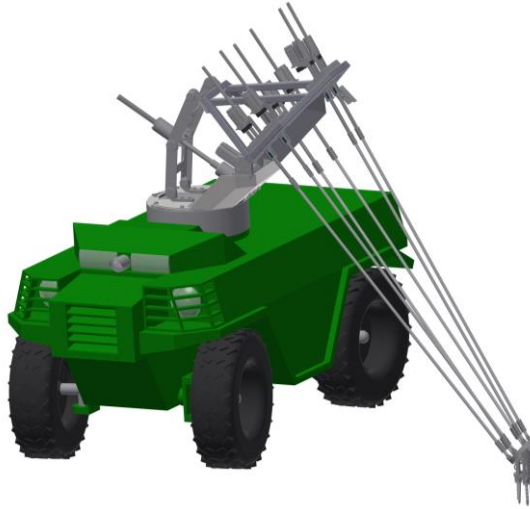


Рис. 12.18. Маніпулятор наземного роботизованого комплексу у вигляді паралелограмного механізму

Конструкція маніпулятора такого типу може бути реалізована із немагнітних (композитних) матеріалів, що є важливим при роботі з небезпечними об'єктами.

Перевагою даної конструкції є гнучкість процесу регулювання положення виконавчого органу маніпулятора. Недоліком конструкції є обмежений робочий простір маніпулятора. Для усунення даного недоліку запропоновані гібридні рішення маніпуляторів [53]. Вони включають маніпулятори важільного типу об'єднані із маніпуляторами на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами.

Перспективним є застосування маніпуляторів по схемі механізму гексапода (рис. 12.19).



*Рис. 12.19. Наземний роботизований комплекс із маніпулятором у вигляді механізму гексапода*

Перевагою даної конструкції є гнучкість процесу регулювання положення виконавчого органу. Недоліком є обмежений робочий простір маніпулятора. Для усунення даного недоліку запропоновані гібридні рішення маніпуляторів.

Вибір геометричних параметрів маніпуляторів наземних роботизованих комплексів проводиться за критерієм забезпечення максимального робочого простору. Вибір схемного рішення враховує можливість забезпечення найбільшої висоти підняття оптичного пристрою та виконання робіт нижче поверхні розташування шасі мобільного робота.

Шасі рекомендується будувати по модульному принципу використовуючи однотипні модулі колісного та гусеничного виду. Проводиться універсальне з'єднання модулів агрегатуючи вузли кріплення модулів із вузлами встановлення маніпуляторів на шасі. Рациональним є застосування гібридних шасі складених із колісно- гусеничних модулів в поєднанні із системою маніпуляторів, що включають як маніпулятори розімкнутого типу так і маніпулятори на основі механізмів із паралельними кінематичними структурами.

## 12.2. Інноваційні схемні рішення наземних роботизованих комплексів

В процесі досліджень запропоновано інноваційне схемне рішення наземного роботизованого комплексу оснащеного маніпулятором, який має приводи макропереміщень та прецизійні приводи мікропереміщень[53]. Макропереміщення здійснюються приводами маніпулятора важільного типу, а мікропереміщення маніпулятором побудованим по схемі механізму гексапода (рис. 12.20).

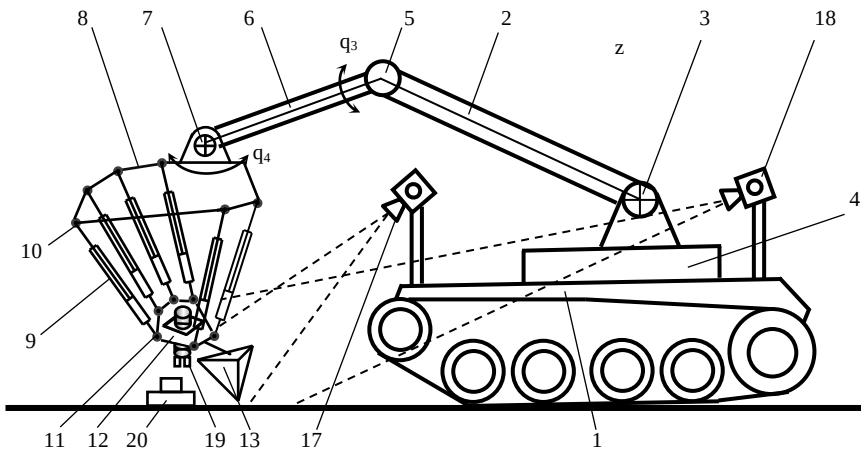


Рис. 12.20. Схема наземного роботизованого комплексу, що має гібридну систему маніпуляторів призначену для роботи з небезпечними об'єктами

Наземний роботизований комплекс з дистанційним керуванням має самохідне шасі 1, антропоморфний маніпулятор, який містить головну частину силового плеча 2, з активним шарніром 3 диференційного типу. Головна частина силового плеча 2 з'єднана приводом переміщення платформи, 4 опорно-поворотного пристрою маніпулятора, а також головна частина плеча 2 з'єднана шарніром 5 із кінцевою частиною 6 силового плеча 2, на кінці якого розташований шарнір 7, на якому розміщена кисть 8 з приводами її повороту відносно силового плеча. При цьому, приводи силового плеча 2 та 6 розташовані в шарнірах 3, 5 і 7. При цьому, всі механізми силового плеча 2 та платформи 4 опорно-поворотного пристрою мають фіксатори (на рисунку не показані), які фіксують рухомі елементи силового плеча 2 та кисті 8 в чітко визначених позиціях, а на кисті 8 встановлено виконавчий пристрій 19 з паралельними кінематичними структурами, що має шість штанг 9 змінної довжини із шарнірами та відповідними приводами. При цьому шарніри 10 з приводами закріплені на кисті, а протилежні шарніри 11 всіх штанг закріплені на рухомій платформі 12, з якою жорстко з'єднаний пристрій 13 визначення точного

просторового положення платформи, виконаний у вигляді тригранної піраміди (рис. 12.21).

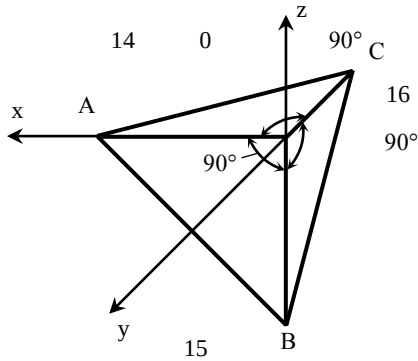


Рис. 12.21. Пристрій для визначення точного положення виконавчого органу наземного роботизованого комплексу

Піраміда закріплена на виконавчому органі робота і знаходиться в полі зору оптичних пристроїв. Піраміда має ребра 14, 15 і 16 розміщені під кутом  $90^\circ$  і орієнтовані по вісям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  симетрії платформи 12. Піраміда 13 розміщена у полі зору 3D сканерів 17 і 18, які встановлені на шасі 1 і зв'язані із постом дистанційного керування наземного роботизованого комплексу (на рисунку не показано).

Виміряне за допомогою 3D сканерів точне положення платформи 4 служить для встановлення точного просторового положення технологічного пристрою 19, який встановлено на платформі. В якості такого пристрою використовується схват, обертовий інструмент встановлений у шпindelній головці розміщеній на платформі або інше обладнання. Визначене точне положення технологічного пристрою забезпечує його необхідну взаємодію із об'єктом 20 маніпулювання, який обробляється наземним роботизованим комплексом. Розміри, положення та координати реперних точок об'єкта 20 обробки також визначаються 3D сканерами 17 і 18 [47].

Наземний роботизований комплекс працює наступним чином: механізми антропоморфного маніпулятора забезпечує поперечно-кутові переміщення маніпулятора встановленого на опорно-поворотному пристрої та відносні переміщення ланок маніпулятора. При цьому, кутове переміщення опорно-поворотного пристрою 4 на кут  $q_1$  розміщує антропоморфний маніпулятор (кисть) 8 в необхідній радіальній площині. Привід повороту головної частини силового плеча 2 змінює його поперечно-кутового положення на кут  $q_2$ . Привід повороту кінцевої частини силового плеча 6 повертає на кут  $q_3$ , а приводи повороту кисті 8 повертають її на кут  $q_4$ . Всі вище вказані приводи мають фіксатори (на рисунку не показані), які фіксують рухомі елементи силового плеча і кисті в чітко визначених позиціях, які характеризуються кутами  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$ .

Позиції антропоморфного маніпулятора дискретним чином охоплюють весь робочий простір наземного роботизованого комплексу (рис. 12.22).

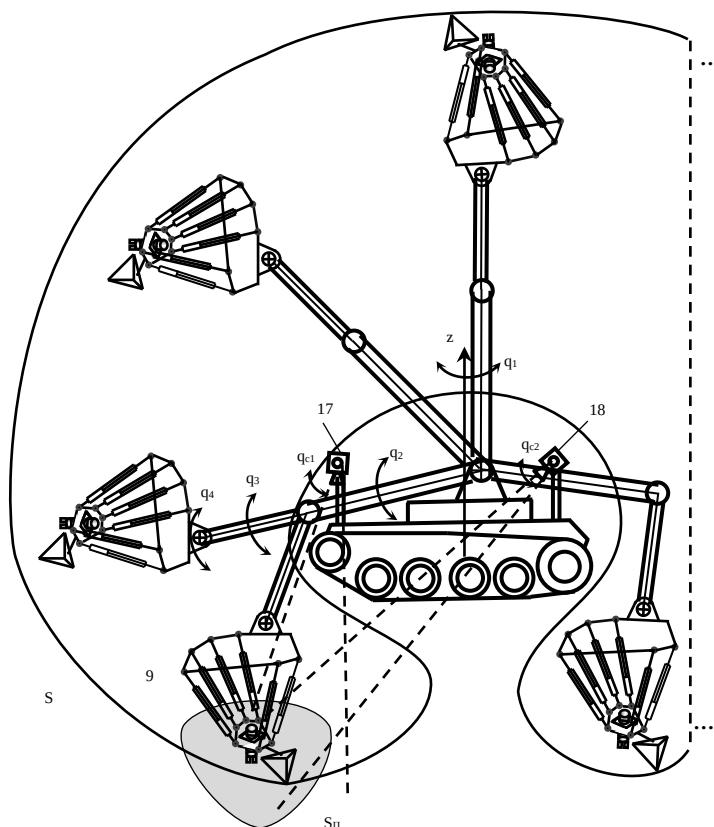


Рис. 12.22. Конфігурація складових робочого простору маніпулятора гібридного виду

Запропоновано робочий простір маніпулятора-гексапода. Робочий простір охоплює повну сферу за виключенням центральної та нижньої частин.

В радіальній площині, яка відповідає вісі  $z$  обертання опорно-поворотного пристрою робочий простір описується у вигляді замкненої кривої  $S$ , що визначає можливі області розташування номінального положення платформи 12, яка встановлюється в різних точках робочого простору. Крайні положення платформи досягаються при максимальному вильоті антропоморфного маніпулятора і змінюються від розташування платформи на максимальній висоті до розташування платформи нижче опорної поверхні шасі.

При фіксації рухомих елементів маніпулятора фіксується і номінальне положення платформи. Зміною довжини шести штанг 9 платформа 12 зміщується відносно свого номінального положення в межах робочого простору платформи  $S_{II}$ . Просторове положення платформи задається її поступальними і поперечно-кутовими переміщеннями, які повністю визначаються довжиною шести штанг. Дані



переміщення є точними і обмежені незначними діапазонами. При цьому координати центра мас загального роботизованого комплексу можуть змінюватись, а шасі мобільного роботизованого комплексу практично залишається нерухомим.

Для встановлення фактичного положення платформи 12 відносно шасі служить пристрій визначення точного просторового положення платформи 12, виконаний у вигляді тригранної піраміди 13, яка жорстко закріплена на платформі 12. Піраміда 13 знаходиться в полі зору 3D сканерів 17 і 18, які встановлені на шасі. Сканери визначають і передають на пост дистанційного керування інформацію про координати полюса платформи, за який прийнято вершину піраміди та дані про положення вісей симетрії платформи, які орієнтовані по ребрам піраміди ОА (лежить на осі  $x$ ), ОВ (лежить на осі  $y$ ) та ОВ (лежить на осі  $z$ ).

Результати вимірів розташування полюса платформи та напрямків вісей симетрії платформи порівнюються із розташуванням на платформі технологічного пристрою 19 та координатами реперних точок об'єкта 20 маніпулювання.

При цьому досягається висока точність встановлення геометричних розмірів та взаємного розташування платформи і об'єкта, а відповідно і висока точність маніпулювання об'єктами або необхідними технологічними пристроями.

Запропоновані і наведені вище схемні рішення наземних роботизованих комплексів мають традиційні схеми виконання шасі колісного або гусеничного виду. При роботі з небезпечними об'єктами, зокрема мінами, дана схема шасі є неприйнятною. Більш раціональним варіантом є наземні роботизовані комплекси крокуючого типу.

Запропоновано інноваційне схемне рішення наземного роботизованого комплексу крокуючого типу [58]. (рис. 12.23).

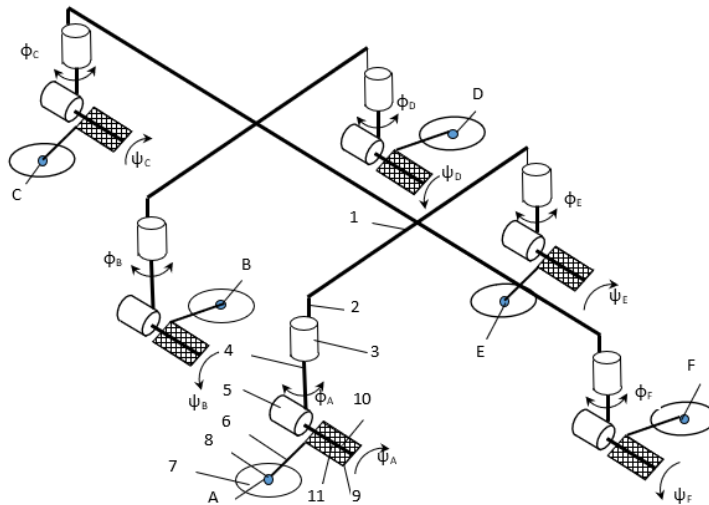


Рис. 12.23. Схемне рішення шасі наземного роботизованого комплексу крокуючого типу

Крокуючий пристрій має корпус 1, до якого приєднані стрижні 2 механізму хитання та керуючі приводи 3,5. При цьому стрижні виконані у вигляді ніг, які являють собою верхній важіль 4, нижній важіль 6 і опору ноги 7. При цьому верхній важіль 4 має керований привід 3 з функцією поворотного руху верхнього важеля (показано стрілкою  $\varphi_A$ ). Привід 3 зв'язує верхній важіль 4 через стрижень 2 з корпусом 1, а інший кінець верхнього важеля 4 зв'язаний з нижнім важелем 6 через керований привід 5 з функцією поворотного руху нижнього важеля 6 (показано стрілкою  $\psi_A$ ).

Нижній важіль 6 через сферичний шарнір 8 зв'язаний з опорою ноги 7. При цьому нижній важіль 6 має в своїй середній частині демпфер у вигляді торсіона 10 та з'єднаною з ним обоймою 9, між якими поміщена еластична вставка 11. При цьому обойма 9 зв'язана з однією частиною важеля 6, а торсіон 11 зв'язано з іншою частиною важеля, що приєднана до привода 5. Для забезпечення надійного поперечно-кутового переміщення обойми відносно торсіона, в обоймі встановлено підшипник 12 (рис. 12.24).

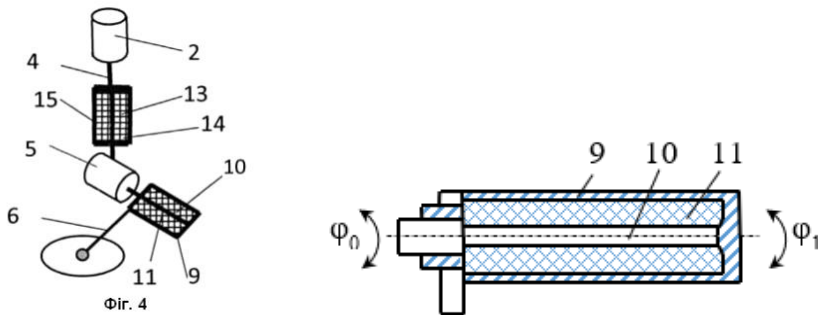
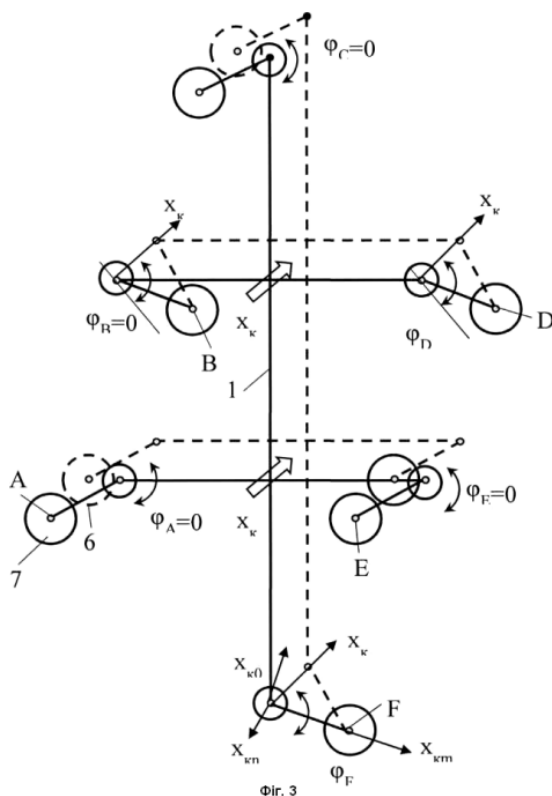


Рис. 12.24. Конструктивне рішення демпферного пристрою торсіонного типу

Підшипник 12 підтримує торсіон 10 у радіальному напрямку відносно обойми 9.

Крокуючий пристрій може мати різне число ніг. На рисунку наведено пристрій, що має шість ніг. Крокуючий пристрій переміщується двома способами: статичним методом повільних переміщень та динамічним чином шляхом виконання стрибків. Розглянемо переміщення крокуючого пристрою статичним методом. В початковому положенні пристрою опори А, С і Е підняті над поверхнею і можуть вільно переміщуватись поворотом ніг на кути  $\varphi_A$ ,  $\varphi_C$ ,  $\varphi_E$ . Корпус 1 утримується трьома опорами В, D і F, які розташовані на опорній поверхні. При цьому корпус може переміщуватись у вертикальному напрямку зміною кутів положень нижніх важелів на кути  $\psi_B$ ,  $\psi_D$  та  $\psi_F$ . Переміщення корпусу 1 на один крок у статичному режимі здійснюється одночасним поворотом ніг на однаковий кут  $\varphi_B = \varphi_D = \varphi_F = \varphi_F$  (рис. 12.25).

При повороті ніг корпус зміщується в напрямку показаному стрілками  $x_K$ . Напрямок переміщення залежить від кута повороту  $\varphi_K$  і змінюється на кут  $180^\circ$  від напрямку  $x_{K0}$  до напрямку  $x_{Km}$ . Величина зміщення (крок) залежить від вибраного напрямку  $x_K$ . Максимальне зміщення відбувається в напрямку  $x_{Km}$ .



*Рис. 12.25. Схема покрокового переміщення шасі наземного роботизованого комплексу*

Після переміщення на крок встановлюються необхідні кутові положення  $\varphi_A$ ,  $\varphi_C$ ,  $\varphi_E$  трьох інших опор А, С, Е. Дані опори опускаються і пристрій опирається на поверхню опорами А, С, Е. При цьому, опори В, D, F піднімаються і встановлюється нове кутове положення опор  $\varphi_B$ ,  $\varphi_D$ ,  $\varphi_F$ . В подальшому крокуючий пристрій може переміщуватись поворотом опор В, D, F, як це було вказано раніше, або може переміщуватись послідовним поворотом опор А, С, Е та В, D, F. Можливий також варіант переміщення пристрою лише поворотом опор А, С, Е.

Вибираючи необхідне початкове кутове положення опор можна забезпечити покрокове статичне переміщення пристрою у будь-якому напрямку.

При розташуванні пристрою на опорах має місце амортизація корпусу 1 при його вертикальних переміщеннях за рахунок демпферів торсійного типу, які знаходяться в нижніх важелях. Це забезпечує можливість переміщення пристрою динамічним чином. Можливі різні схеми динамічних переміщень.

Одна із схем полягає у одночасному періодичному звільненні всіх опор. Відповідно даній схемі приводами 5 забезпечується розгойдування корпусу 1 у

вертикальному напрямку. Приводи 5 формують синусоїдальні переміщення важелів 6, які через торсіонні демпфери зв'язані з приводами 5. Забезпечуються незатухаючі синусоїдальні зміни кутових положень всіх важелів 6. При цьому, кути  $\psi_A$ ,  $\psi_B$  та  $\psi_C$ ,  $\psi_D$ ,  $\psi_E$ ,  $\psi_F$  змінюються по синусоїдальному закону. Амплітуда синусоїдальних переміщень важелів вибирається достатньо великою. При цьому, сили інерції корпусу перевищують гравітаційні сили і корпус 1 відривається від поверхні. При цьому, відбувається поворот верхніх важелів на деякий кут  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_D = \varphi_E = \varphi_F = +\varphi_\delta$ . При опусканні корпусу забезпечується поворот верхніх важелів у зворотньому напрямку на кут  $-\varphi_\delta$ . Цим забезпечується переміщення корпусу 1 відносно нерухомої опорної поверхні. З метою поліпшення енергетичних параметрів пристрою реалізуються синусоїдальні зміни кута  $\varphi_\delta$ , а частоти вертикальних і горизонтальних переміщень опор ніг синхронізуються. Розглянута схема одночасного динамічного переміщення всіх опор забезпечує стрибкоподібний покроковий рух крокуючого пристрою.

Інша схема динамічного покрокового руху реалізує поперечно-кутові динамічні переміщення корпусу. Згідно даної схеми синусоїдальні переміщення трьох опор, наприклад опор А, В і С та трьох інших опор D, E і F відбуваються в протифазі. При цьому, суттєво зменшуються вертикальні переміщення центра мас корпусу 1. Під час максимального вертикального переміщення частин корпусу в області опор А, В і С здійснюється поворот даних опор на кути  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = +\varphi_\delta$ , а опор D, E і F на кути  $\varphi_D = \varphi_E = \varphi_F = -\varphi_\delta$ . При цьому, корпус зміщується у певному напрямку на величину динамічного кроку відповідного кута  $\varphi_\delta$ .

З метою підвищення енергетичних параметрів синусоїдальні вертикальні і горизонтальні переміщення окремих опор синхронізуються.

Інша раціональна схема динамічного покрокового руху полягає у циклічному (циркуляційному) почерговому синусоїдальному переміщенні опор, розташованих по периметру корпусу. Наприклад, реалізується схема циркуляційного підняття корпусу послідовно на опорах А, В, С, D, E, F. Вертикальні переміщення корпусу відбуваються по синусоїдальному закону із одночасним зміщенням опор на кути  $\varphi_\delta$ . При відриві окремої опори від поверхні відбувається її зміщення і фіксація. Таким чином, за один цикл динамічних переміщень всіх опор вони повертаються на кут  $\varphi_\delta$ . Зворотнє переміщення на кут  $-\varphi_\delta$  відбувається при розміщенні опори на поверхні. При цьому, корпус пристрою зміщується на один крок.

З метою оптимізації динамічних характеристик покрокового переміщення пристрою запропоноване вдосконалене технічне рішення ноги крокуючого пристрою. Дане рішення відрізняється від раніше розглянутого тим, що між кінцем верхнього важеля 4 та керованим приводом нижнього важеля 5 встановлено демпфер у вигляді торсіону 13 та з'єднаною з ним оболонкою 14, між якими поміщена еластична вставка 15, при цьому кінець верхнього важеля 4 з'єднано з торсіоном 13, а керований привід 5 з оболонкою 14.

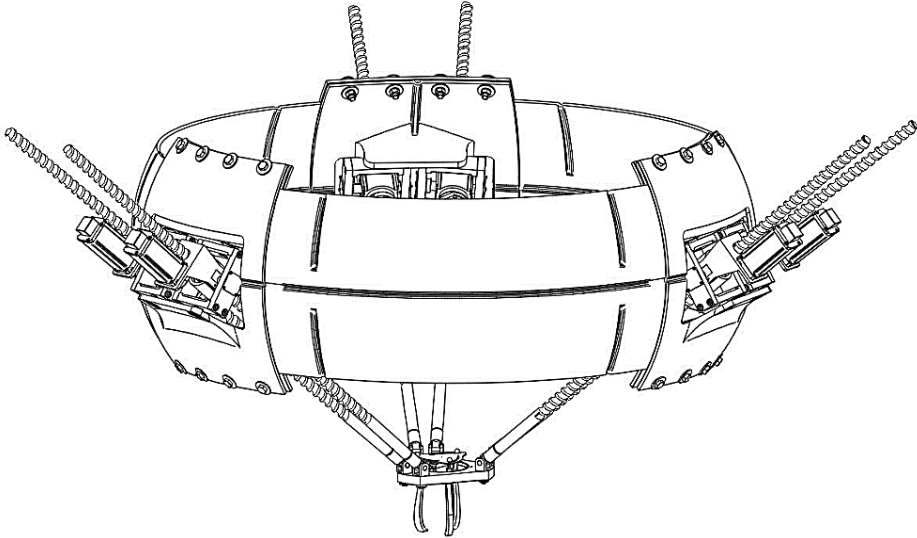
Наявність демпфера в приводі верхнього важеля дає можливість виключити ударні навантаження та знизити енерговитрати в приводі при реалізації синусоїдальних переміщень верхнього важеля.

## РОЗДІЛ 13

### Маніпулятор наземного роботизованого комплексу виготовлений із композитних матеріалів

#### 13.1. Компонівка маніпулятора наземного роботизованого комплексу виготовленого із композитних матеріалів

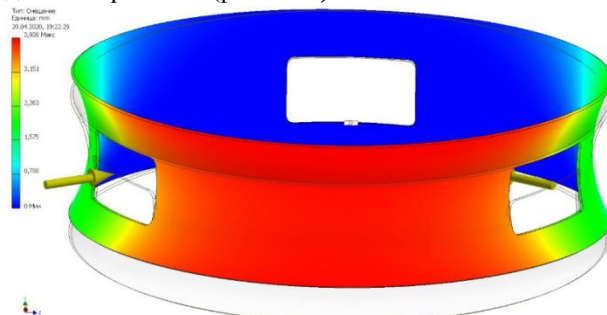
Запропоновані конструктивні рішення наземних роботизованих комплексів орієнтовані на роботу із об'єктами різного виду. Небезпечні об'єкти як правило потребують особливих вимог до конструктивно-технологічного рішення маніпулятора наземного роботизованого комплексу. Основною вимогою є застосування немагнітних або неметалевих матеріалів у конструкції маніпулятора та його виконавчого органу. Дана задача є основною при розробленні наземних роботизованих комплексів призначених для роботи з небезпечними об'єктами. Тому в процесі виконання робіт основну увагу приділено розробленню конструктивних рішень маніпуляторів виконаних із неметалевих матеріалів. Застосовані композитні матеріали різного виду. Зокрема розроблено конструктивні схеми маніпулятора на основі механізму гексаподу виготовленого із композитних матеріалів (рис. 13.1).



*Рис. 13.1. Маніпулятор у вигляді механізму гексаподу реалізований із композитних матеріалів*

Основою маніпулятора є несуча рама на якій розміщені приводи зміни довжини штанг. В процесі виконання робіт проведено аналіз ряду варіантів виконання рами. Базовим варіантом є кільцева рама у вигляді оболонки. Розглянуто різні варіанти форми оболонки.

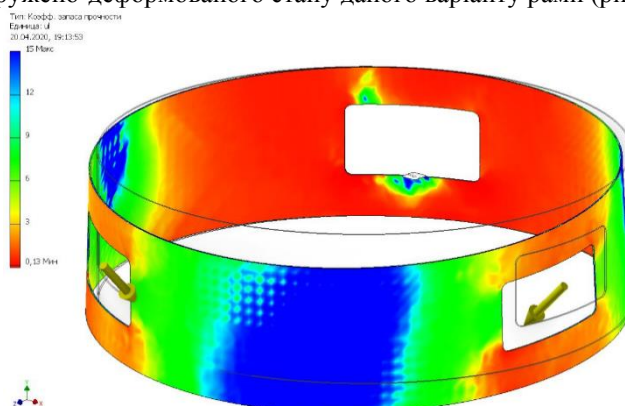
Проведені розрахунки різних варіантів форми оболонки рами. Виконані розрахунки напружено-деформованого стану рами. Зокрема розрахована рама у вигляді оболонки двоякої кривизни (рис. 13.2).



*Рис. 13.2. Розрахунок напружено-деформованого стану рами у вигляді оболонки двоякої кривизни*

В результаті розрахунків встановлені області дії максимальних напружень та деформацій рами під дією сил. Доведено, що запропонована форма оболонки рами задовольняє умовам міцності. Жорсткість даної рами є задовільною. Недоліком даного варіанту є складність компоновки вузлів маніпулятора на рамі.

Розглянута рама маніпулятора у вигляді циліндричної оболонки. Проведено розрахунок напружено-деформованого стану даного варіанту рами (рис. 13.3).



*Рис. 13.3. Розрахунок напружено-деформованого стану внутрішньої частини рами у вигляді циліндричної оболонки*

Циліндрична оболонка має суттєві переваги по технології виготовлення, але її жорсткісні параметри є низькими. Тому запропоновані більш раціональні варіанти конструктивного виконання рами.

Маніпулятор у вигляді механізму гексаподу має три блоки шарнірів із штангами змінної довжини. Тому раціональним варіантом рами є виконання несучого пояса

рами у вигляді оболонки, що має фасонну коноїдальну поверхню із трьома вісями симетрії (рис. 13.4).

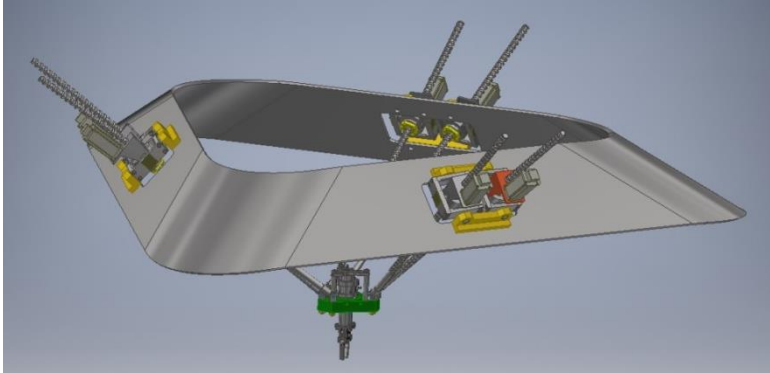


Рис. 13.4. Компонівка маніпулятора із несучою рамою у вигляді фасонної коноїдальної оболонки

Рама має отвори в яких розміщуються приводи маніпулятора та елементи кріплення. Загальна компоновка маніпулятора відповідає типовій конфігурації механізму гексапода.

Основною проблемою реалізації рами даного типу є забезпечення необхідної жорсткості несучої рами. Проведено розрахунок напружено деформованого стану рами (рис. 13.5). Для цього задані необхідні параметри.

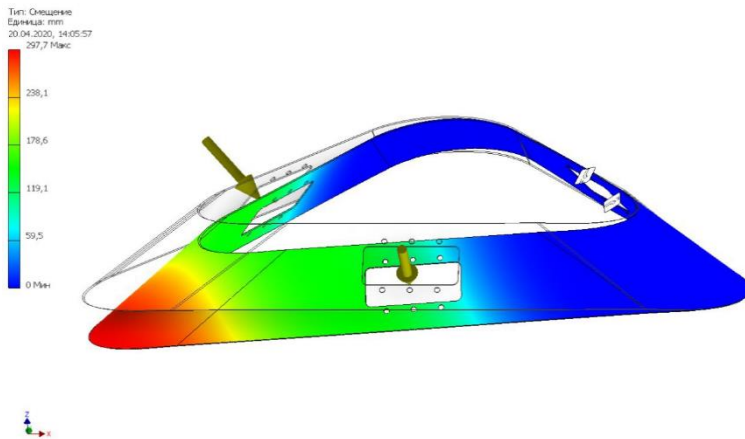


Рис. 13.5. Результати розрахунків напружено-деформованого стану рами у вигляді фасонної конічної оболонки

Встановлено, що в даній конструкції значно перевищено допустимі напруження (близько 5 раз). Також мають місце значні деформації. Тому дана конструкція рами потребує суттєвого вдосконалення. Рама потребує підсилення оболонки по краям отворів та введення ребер жорсткості. Це суттєво ускладнює технологію

виготовлення рами і є недоцільним. Відповідно даний варіант рами може бути реалізований лише при суттєвому доопрацюванні.

В результаті аналізу ряду варіантів, зокрема тих які наведені вище, зроблено висновок, що раціональним варіантом несучої частини рами є її виконання у вигляді опуклої оболонки тороподібного виду (рис. 13.6).



*Рис. 13.6. Раціональний варіант виконання несучої рами маніпулятора виконаної із композитних матеріалів*

Тонкостінна рама із композитного матеріалу має низку жорсткості. Тому локальні деформації рами є значними. Це враховано у виконанні з'єднань і загальної конструкції рами в цілому.

Для даного варіанту основна несуча частина рами у вигляді опуклої тороподібної оболонки підсилена накладками в місцях розташування отворів. Накладки розташовані парами симетрично по колу (рис. 13.7).



*Рис. 13.7. Розташування пар накладок по периметру тороподібної рами*

Накладки встановлюються на внутрішній і зовнішній поверхнях тороподібної оболонки і з'єднуються між собою болтовим з'єднанням утворюючи основу для



закріплення шарнірів маніпулятора. Розроблені раціональні вузли кріплення накладок та шарнірів (рис. 13.8).



Рис.13.8. Схема закріплення шарнірів на рам маніпулятора

Проведено розрахунок вузлів кріплення накладок і шарнірів (рис. 13.9).

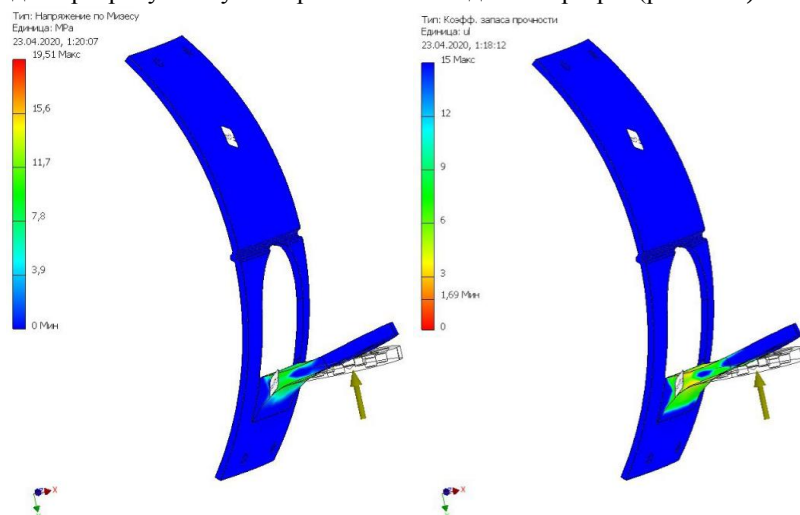


Рис.13.9. Розрахунок напружено-деформованого стану зовнішньої накладки в місці встановлення шарніра

При розрахунках обґрунтовано розміри та конструктивне виконання основних елементів накладок та вузлів кріплення.

Рама із приводами є основною частиною маніпулятора. Для реалізації наземного роботизованого комплексу призначеного для роботи з небезпечними об'єктами використано розроблене описане в попередньому підрозділі інноваційне схемне рішення згідно одержаного патенту України [55].

Дане схемне рішення реалізує крокуючий наземний роботизований комплекс, що має шість опорних елементів ніг. Дані опорні елементи мають вигляд рамних конструкцій виконаних із композитного матеріалу. Робот має по два приводи поворотного руху на кожний опорний елемент (рис. 13.10).

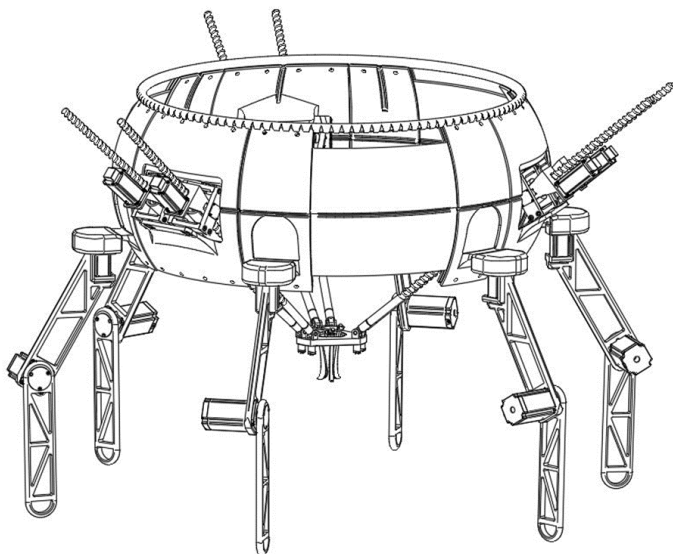


Рис. 13.10. Конструктивне виконання крокуючого наземного роботизованого комплексу призначеного для роботи з небезпечними об'єктами

Кожен опорний елемент має важелі які служать для переміщення робота в цілому. Схема переміщення робота у вертикальному напрямку реалізується поворотом важелів (рис. 13.11).

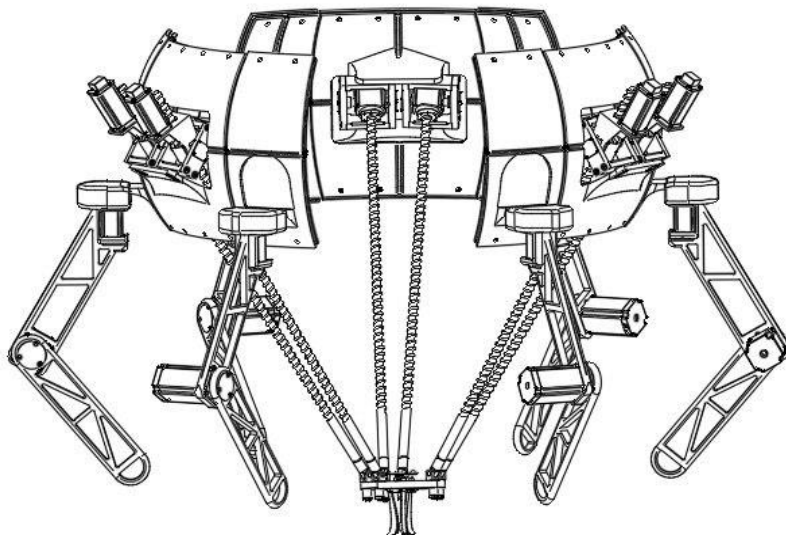


Рис. 13.11. Схема переміщення важелів при зміні положення маніпулятора у вертикальному напрямку

### 13.2. Вузли і деталі маніпулятора наземного роботизованого комплексу виготовленого із композитних матеріалів

Для переміщення наземного роботизованого комплексу використовуються приводи з торсіонами [55]. Дані приводи знижують динамічні навантаження на наземний роботизований комплекс. Схема реалізації привода дає можливість виконати важелі у вигляді рамних конструкцій (рис. 13.12).

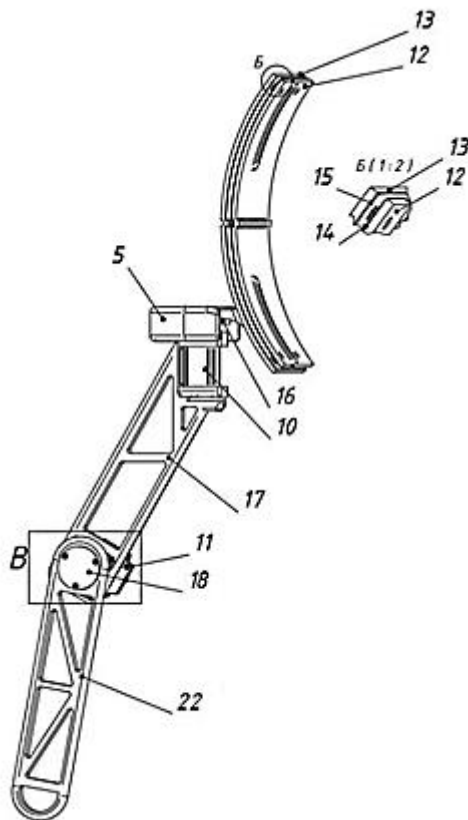


Рис. 13.12. Конструктивна реалізація важелів наземного роботизованого комплексу

Важелі мають нижню частину 22 та верхню 17. Частини важелів з'єднуються шарнірами 18, що мають пружно деформовані торсіонні приводи 11. Система важелів має вузли кріплення 10 з приводами повороту 5 які закріплені на рамі.

Шарнір 18 має привід, який забезпечує поворот нижньої частини важеля 22.

В даній конструкції нижня частина важеля виконує функцію опорного елемента наземного роботизованого комплексу. Це є доцільним для мобільних роботів, які переміщуються по твердим поверхням. Переміщення по дорогам загального виду

або по бездоріжжю потребує оснащення нижніх важелів спеціальними опорними елементами.

Розроблено ряд варіантів виконання шарнірів з приводами повороту важелів.. Зокрема, розроблено шарнір із розширеним діапазоном поперечно-кутових переміщень, який застосовано у вузлі з'єднання двох частин важелів (рис. 13.13).

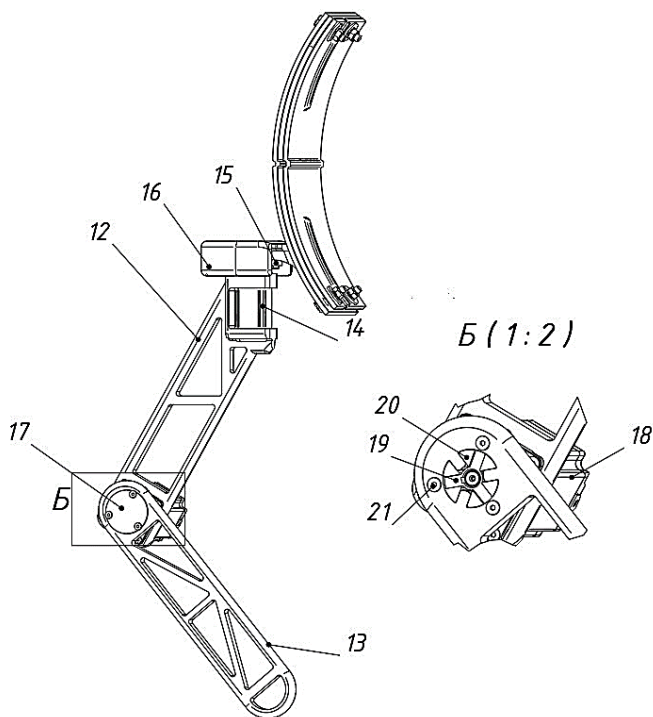


Рис. 13.13. Конструктивне виконання важільної системи із широкодіапазонним шарніром у вузлі з'єднання важелів

Шарнір 17 має фланцеве з'єднання 19 із нижнім важелем 13. При цьому мотор редуктор приводу 18 закріплено на верхньому важелі 12. Привід має додаткові демпферні пристрої 20, 21. Розширення діапазону поперечно-кутових переміщень шарніра дає можливість реалізувати більш ефективний алгоритм покрокового переміщення наземного роботизованого комплексу. Є можливість встановлення нижнього важеля у горизонтальне положення. Розширення діапазону поперечно-кутових переміщень шарніра забезпечує надійне опирання важеля на опорну поверхню та стійке положення платформи мобільного робота при виконанні спеціальних операцій. В конструкціях шарнірів максимально використані вузли і деталі із неметалевих матеріалів.

Привід повороту нижнього важеля 13 розміщено в прямокутному отворі, що знаходиться у верхній частині нижнього важеля.

Кріплення приводу забезпечує сприйняття крутних та згинальних моментів, що діють на важелі при переміщенні наземного роботизованого комплексу

Для захисту приводів від впливу зовнішніх факторів вони оснащені спеціальними кришками. Кришки забезпечують додаткове підсилення корпусних деталей важеля.

Дане конструктивне виконання шарніра забезпечує поперечно-кутове переміщення нижньої частини важеля на кут до  $160^\circ$  (рис. 13.14).

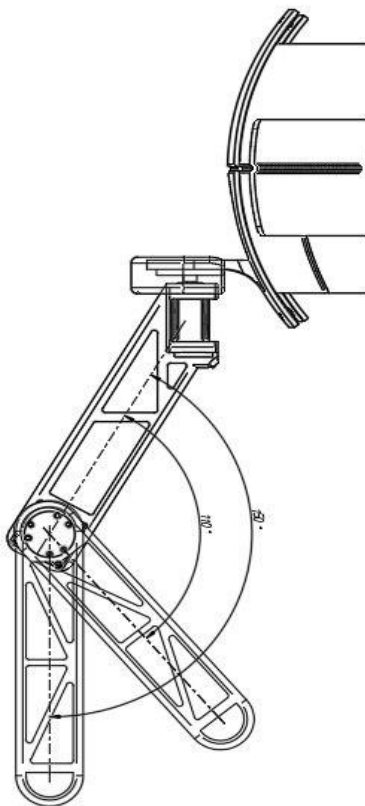


Рис. 13.14. Діапазон поперечно-кутових переміщень нижньої частини важеля

Ферменні конструкції важелів виготовлені із композитних матеріалів. Використані високоміцні армовані композити. Для забезпечення працездатності наземного роботизованого комплексу в дорожніх умовах важелі мають кожухи (корпусні деталі), що встановлюються на поверхні важелів і служать для їх захисту від дій зовнішніх факторів.

При проектуванні важелів враховані особливості взаємодії нижньої частини нижнього важеля з опорною поверхнею. Передбачена можливість заклинювання із виникненням відповідних навантажень у опорній частині нижнього важеля.

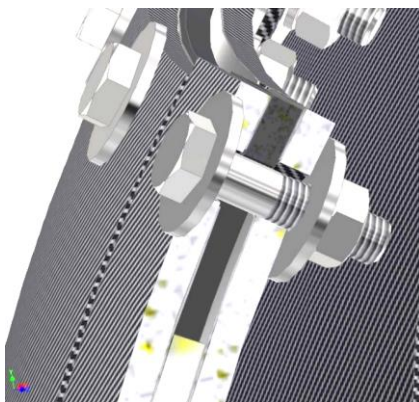
Корпусні деталі мають вигляд коробчастих оболонок (рис. 13.15). Вони жорстко з'єднані з важелями і виконують додаткові функції по сприйняттю різноманітних експлуатаційних навантажень.



*Рис. 13.15. - Корпусна деталь верхнього важеля крокуючого робота*

Для підсилення корпусної деталі в ній виконані спеціальні вставки.

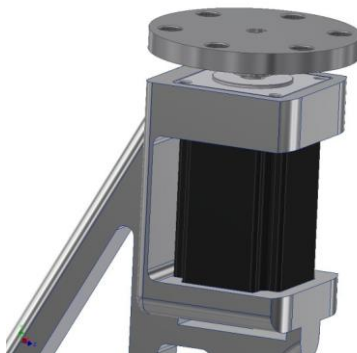
Приводи повороту верхніх важелів встановлені у прямокутних отворах рами і мають спеціальну систему кріплення, що забезпечує сприйняття просторових навантажень (рис. 13.16).



*Рис. 13.16. Несуча частина верхнього важеля із вузлами кріплення приводів*

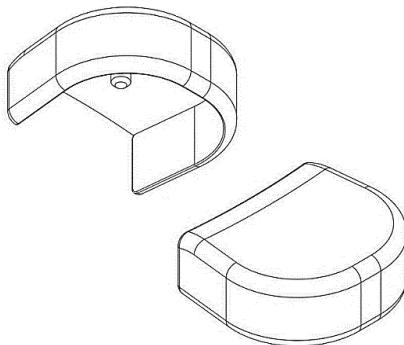
Корпуси приводів повороту систем верхнього та нижнього важелів встановлені в отворах кронштейну рами наземного роботизованого комплексу. Кожен привід повороту важелів закріплено в прямокутному отворі, що знаходиться у верхній частині верхнього важеля. Кріплення приводів забезпечує сприйняття крутних та згинальних моментів, що діють на важіль.

Конструктивно приводи реалізовані у вигляді шарнірних вузлів для повороту важелів навколо вертикальної вісі (рис. 13.17).



*Рис.13.17. Конструктивна реалізація шарнірного вузла для повороту важелів навколо вертикальної вісі*

Для захисту приводів від впливу зовнішніх факторів вони оснащені спеціальними кришками (рис. 13.18)



*Рис.13.18. Конструктивне виконання кришок приводу важеля*

Геометричні параметри важелів оптимізовані за критерієм забезпечення міцності при мінімальній масі. Для цього проведені розрахунки напружено-деформованого стану окремих вузлів та елементів важелів.

В якості розрахункового навантаження прийнята еквівалентна вертикальна гравітаційна сила 500Н, що відповідає загальній масі роботизованого комплексу порядку 300 кг (номінал 200 кг).

Проведено розрахунки ферменної конструкції верхнього важеля. Встановлено, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності досягається у нижній частині вузла кріплення верхнього важеля і складає 1,5. Це можна вважати допустимим для даної конструкції. У верхній частині важеля коефіцієнт запасу міцності близько 4-х, а основна частина несучої системи важеля має запас міцності близько 10.

Деформації верхнього важеля є значними. Зміщення кінця важеля складає близько 3 мм. Для крокуючого наземного роботизованого комплексу, що переміщується в складних дорожніх умовах дані переміщення можна вважати допустимими і прийнятними.

Деформації важеля набагато менші можливих деформацій ґрунту під опорами важелів (рис. 13.19.).

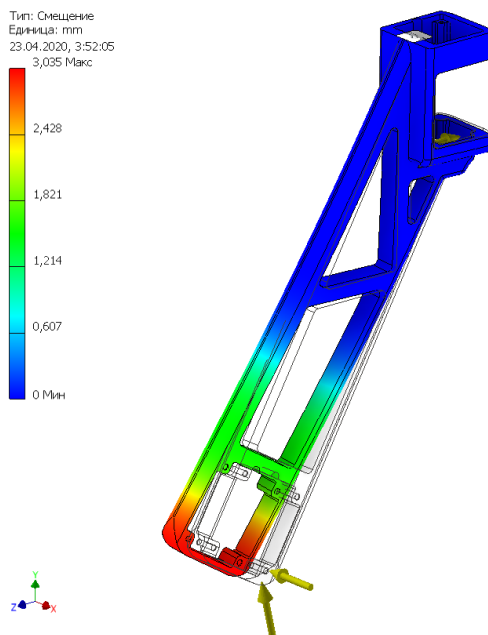


Рис. 13.19. Результати розрахунків напружено-деформованого стану несучої системи верхнього важеля

Встановлено, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності досягається у нижній частині вузла кріплення важеля і складає 1,5. Це можна вважати допустимим для даної конструкції. У верхній частині важеля коефіцієнт запасу міцності близько 4-х, а основна частина несучої системи важеля має запас міцності близько 10.

Деформації верхнього важеля є значними. Зміщення кінця важеля складає близько 3 мм. Для крокуючого робота дані переміщення можна вважати допустимими. Вони набагато менші можливих деформацій ґрунту під опорами важелів.

Проведено розрахунок напружено-деформованого стану несучої системи нижнього важеля для прийнятого раніше розрахункового навантаження. При розрахунках прийнята найбільш несприятлива схема взаємодії нижньої частини важеля з ґрунтом, коли наявне заклинювання із виникненням відповідних моментів у опорній частині важеля (рис. 13.20).

В результаті розрахунків встановлено, що максимальні напруження складають 65..82 МПа. Дані напруження характерні для кінцевих ділянок ферми нижнього важеля. В середній частині ферми напруження складають 16..45 МПа.

Встановлено, що мінімальний запас міцності складає 3,3.

В середньому запаси міцності на ділянках нижнього важеля значно вищі і знаходяться в межах 6, а в окремих частинах важеля 10 і більше.



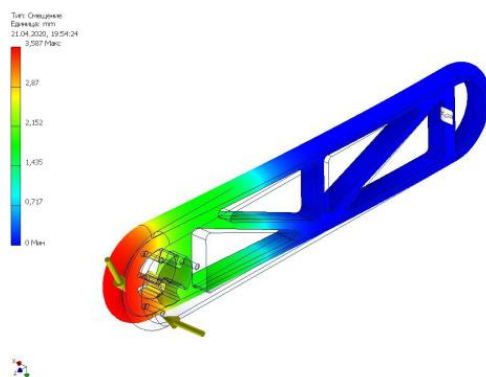


Рис. 13.20. Розрахункові деформації конструкції нижнього важеля

В результаті розрахунків встановлені переміщення важеля, що складають 3,2...3,6 мм. Дані переміщення можна вважати допустимими для важелів виготовлених із композитних матеріалів.

Таким чином загальні переміщення кінцевих частин системи двох важелів складають близько 6 мм. Для компенсації даних переміщень може бути введено корекція в систему керування приводами переміщення важелів.

Із проведених розрахунків напружено-деформованого стану несучої системи мобільного робота встановлені місця максимальних напружень. Для їх зниження проведено підсилення елементів рами та окремих вузлів та деталей важелів. Зокрема рекомендовано додаткове армування рами в місці встановлення приводів (рис. 13.21).

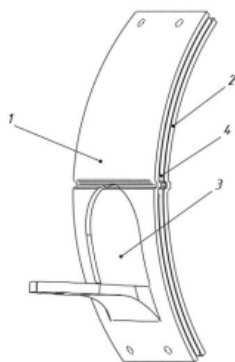


Рис. 13.21. Схема встановлення додаткових армуючих елементів рами в місцях закріплення приводів

Запропоноване інноваційне рішення рами дає можливість реалізувати мобільний робот для виконання спеціальних операцій практично без застосування металевих, зокрема магнітних матеріалів.

Наведені конструкторські рішення рами і важільної системи реалізовані в наземному роботизованому комплексі із робочим органом у вигляді армованої оболонки із вуглецевого композиту (рис. 13.22).

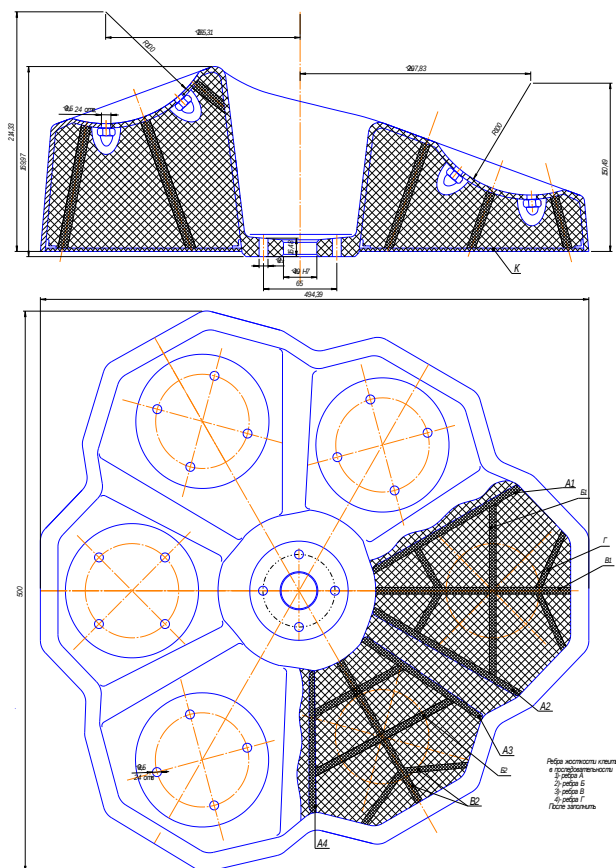


Рис. 13.22. Виконання робочого органу наземного роботизованого комплексу із композитного матеріалу

Робочий орган наземного роботизованого комплексу являє собою універсальну рухому платформу на якій монтуються необхідні пристрої. Платформа має замкнену зовнішню оболонку порожнина якої заповнена пористим неметалевим матеріалом.

Основною проблемою виготовлення платформи є виготовлення фасонної просторової нижньої частини зовнішньої оболонки платформи. Для виготовлення фасонної частини зовнішньої оболонки платформи розроблена спеціальна форма.

Форма має основну частину виконану із пластинчастих збірних елементів з'єднаних зварювальними швами та приєднані до основної частини сферичні елементи (рис. 13.23).

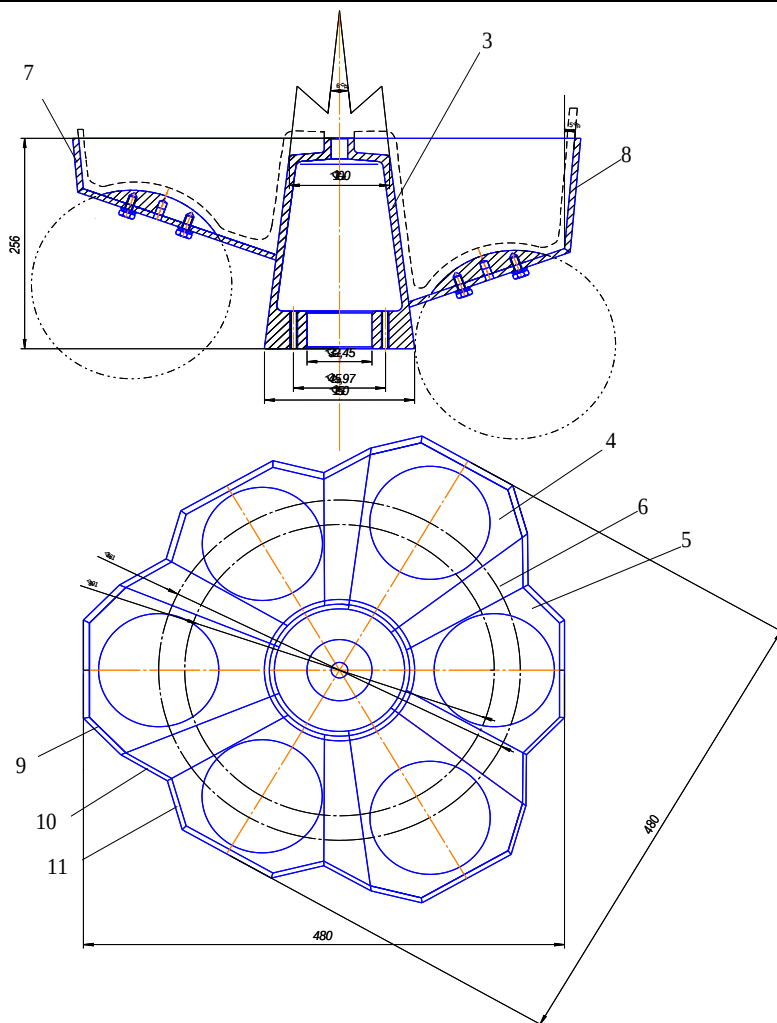


Рис. 13.23 Конструктивна схема форми для виготовлення нижньої частини оболонки платформи наземного роботизованого комплексу.

Основна частина форми має центральну деталь ( конус) 3 і розташовані навколо конуса сектори 4 та 5. Між секторами розташовані косинки 6. По периферії форми розміщений бандаж , що включає послідовно розташовані стінки короткі 7 та стінки довгі 8 та фасонні вставки 9, 10 і 11 з'єднані між собою.

Форма являє собою складну просторову зварну конструкцію. Для точного стикування та з'єднання плоских фасонних деталей форми проведено геометричне моделювання форми. Для цього розроблена її твердотільна модель (рис.13.24 ).

Для забезпечення надійності конструкції проведено макетування форми. Макет форми виготовлено із немателевих матеріалів із точною геометричною відповідністю. Макет перевірено при формуванні моделі оболонки платформи.

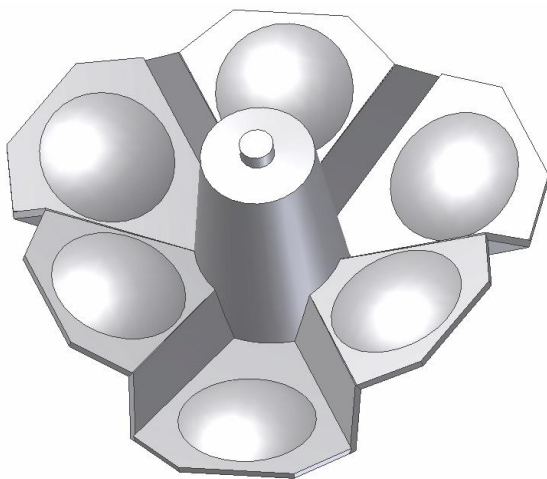


Рис.13.24. Твердотільна модель форми для виготовлення оболонки платформи із композитного матеріалу

По результатам макетування уточнені розміри фасонних плоских деталей: секторів, косинок, стійок і вставок та центральної деталі (конуса).

На основі макетування розроблена технічна документація та виготовлені окремі деталі форми (рис. 13.25).

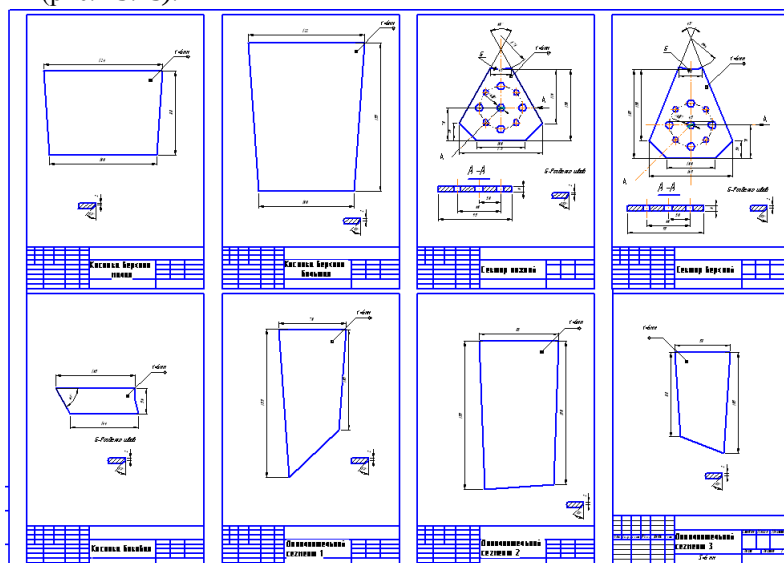


Рис. 13.25. Технічна документація (деталювання) плоских деталей із яких виготовляється форма для виробництва оболонки платформи із композитного матеріалу

Плоскі фасонні деталі наведені в технічній документації мають в необхідних місцях фаски для виконання зварювальних швів. Деталі збираються на спеціальному стапелі. Основним елементом форми є центральний стрижень (конус) по якому формується центральна частина оболонки платформи із композиту. Конус являє собою трубчасту зварну конструкцію із відповідними уклонами (рис. 13.26).

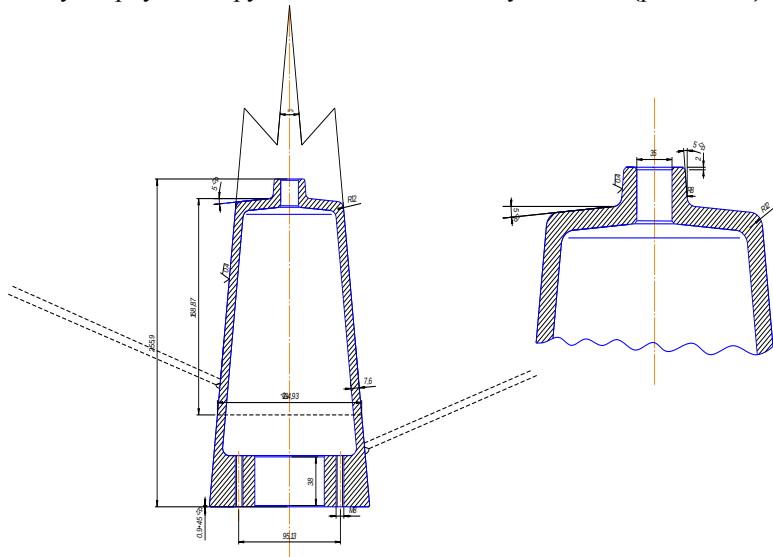


Рис. 13.26. Конструктивна схема конуса, що є основною складовою форми

Конус у своїй верхній частині має торець призначений для формування фланця оболонки платформи із композиту. На конусі передбачені необхідні уклони та конічні ділянки. Робочі поверхні деталі мають необхідні параметри мікропрофілю. Конус також має різьбові отвори для закріплення форми в зібраному стані.

Окремі деталі форми з'єднані зварювальними швами. Для цього розроблена спеціальна технологія, що враховує особливості використання форми. Згідно даної технології по стапелю виставляються фасонні плоскі деталі форми з контролем їх положення і здійснюється попередній та остаточний провар швів із зовнішньої неробочої поверхні форми. Зварювання ведеться переривчастим швом з метою зменшення термічних деформацій. В кінці здійснюється повний провар швів. Наявні щілини в подальшому заповнюються герметизуючою пастою подібною сумішшю.

Після виконання всіх необхідних зварювальних швів заготовка форми піддається термічній та остаточній механічній обробці. Обробляється конічний отвір у звареній конструкції. Конічний отвір служить для точної установки конуса. Після обробки конічного отвору здійснюється підготовка швів у місцях зварювання плоских фасонних деталей із конусом. Проводиться установка конуса та його закріплення шляхом зварювання підготовлених швів із зовнішньої неробочої частини форми.

Одержана заготовка форми комплектується сферичними сегментами. Кожен сферичний сегмент виготовляються окремо. Сегменти мають отвори для їх фіксації переміщення та закріплення на основній частині форми (рис. 13.27).

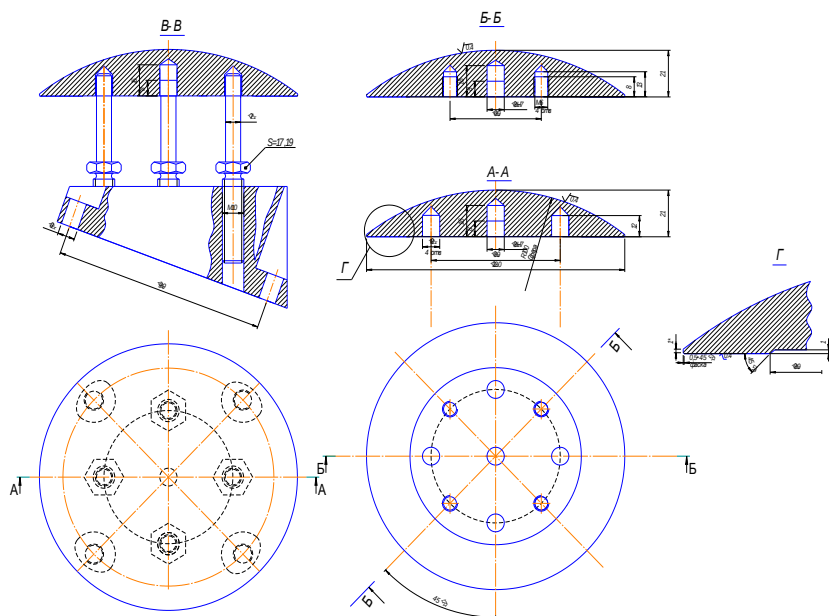


Рис. 13.27. Конструктивна схема сферичного сегменту

Форма використана для виготовлення платформи із вуглецевого композиту. Композит формується із фрагментів (фасонних викroyок) тканини. Фасонні викroyки, як правило, повторюють форми косинок та стійок форми. Для викладки сферичних поверхонь застосовуються округлі викroyки з радіальними розрізами.

При укладці викroyки на поверхні сферичного сегменту краї розрізів перекриваються. При цьому забезпечується щільне прилягання тканини до поверхні форми. Кругові фасонні викroyки чергуються із накладанням невеликих викroyок дугоподібної, сегментної та прямокутної форми. При цьому забезпечується перехресне розташування волокон послідовно накладених фрагментів тканини.

Фланець платформи викладається із кільцевих викroyок, які чередуються із викroyками у вигляді розгортки конуса із розрізами на його периферійній частині.

При формуванні фланця також застосовують дугоподібні викroyки та вузькі смужки тканини розташовані в радіальному напрямку відносно вісі форми.

Особливу увагу приділено формуванню ділянок гострих кутів форми та різких переходів між плоскими ділянками. Спочатку вони заповнюються вузькими смужками тканини, які розташовуються по грані гострого кута. Потім накладаються невеликі фрагменти тканини з метою заповнення пустот в околі грані гострого кута.

Заповнена фрагментами тканини форма просочується розчином полімеризатора. Проводиться ущільнення тканини спеціальними пристроями. Заготовка форми піддається термічному впливу в спеціальній електричній печі. Температура

спікання композиту складає 300-320°C. Процес охолодження відбувається при регламентованому технологічним процесом закону зміни температури.

Після охолодження заготовка оболонки видаляється із форми. Для цього використовуються спеціальні гвинтові пристрої, переміщення сферичних сегментів (рис. 13.28).

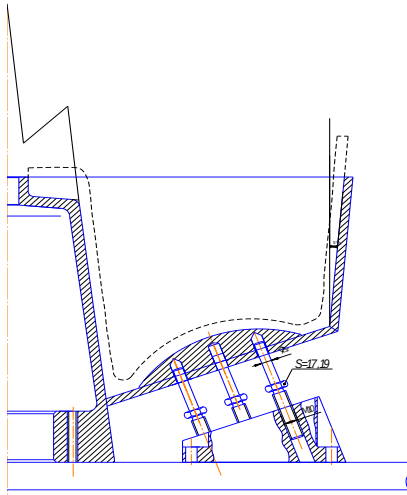


Рис. 13.28. Спеціальні гвинтові пристрої, що служать для виштовхування готової оболонки із форми після спікання

Заготовка оболонки обробляється по контуру і використовується для виготовлення платформи в цілому.

Запропонована технологія є попередньою і потребує перевірки у виробничих умовах.

В результаті виконаних робіт обґрунтована можливість реалізації інноваційної конструкції наземного роботизованого комплексу крокуючого типу який нечутливий до засобів ідентифікації металевих, зокрема магнітних матеріалів. Дана конструкція є перспективною для роботи з небезпечними об'єктами, зокрема мінами оснащеними пристроями самоліквідації чутливими до металевих матеріалів.

В результаті проведених робіт запропоновано ряд схемних рішень маніпуляторів наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. Вони є базою теорії проектування маніпуляторів. Запропоновані конструкції встановлюються на шасі незначних розмірів. Тому маніпулятори мають неточну основу. При переміщенні шасі основа маніпулятора змінюється в широких межах. Це не дає можливості забезпечити точне позиціонування основи і маніпулятора в цілому.

Вказана проблема є загальною. Без її вирішення неможливе проектування прогресивних конструкцій наземного роботизованого комплексу. В процесі проведених досліджень розроблені пропозиції по кардинальному підвищенню точності позиціонування маніпуляторів наземного роботизованого комплексу спеціального призначення.

## **РОЗДІЛ 14**

### **Проектування виготовлення та апробація експериментального зразка наземного роботизованого комплексу**

#### **14.1. Основні конструктивні параметри наземного роботизованого комплексу із паралельними кінематичними структурами**

Механізми із паралельними кінематичними зв'язками являють собою просторові стрижневі конструкції із ланками змінної довжини або із рухомими шарнірними з'єднаннями. Вони мають значну вантажопідйомність при мінімальній масі. На основі механізмів із паралельними структурами розроблені наземні роботизовані комплекси. Вони призначені для роботи з небезпечними об'єктами у польових умовах. До таких небезпечних об'єктів відносяться: міни, снаряди, ємності з токсичними матеріалами, трубопроводи та резервуари під тиском, зокрема ємності з пошкодженнями, що супроводжуються витокami рідких і газоподібних речовин та інші. Як правило, об'єкт має забруднення, орієнтований довільним чином і не допускає переміщення. Обробка об'єктів є необхідною для проведення підготовчих операцій по транспортуванню об'єктів, визначенню їх стану та ступеня небезпечності або для знешкодження об'єктів на місці.

Перспективним є виконання операцій точної матеріалообробки (свердлувальних, фрезерувальних та інших) безпосередньо на небезпечних об'єктах у польових умовах. Розробка наземних роботизованих комплексів для матеріалообробки небезпечних об'єктів у польових умовах має важливе значення для підвищення обороноздатності та національної безпеки держави [96].

Освоєння виробництва наземних роботизованих комплексів для високоточної обробки небезпечних об'єктів радикально змінює організацію та проведення робіт по ліквідації надзвичайних ситуацій, ремонту військової техніки, утилізації вибухонебезпечних об'єктів, токсичних та радіоактивних речовин. Це має велике значення для організації робіт в надзвичайних ситуаціях.

Проблему обробки небезпечних об'єктів у польових умовах запропоновано вирішити за допомогою наземних роботизованих комплексів на основі механізмів паралельної структури.

Пристрої з паралельними кінематичними структурами мають низьку енерго- та матеріалоемність. Тому їх доцільно використати для високоточної матеріалообробки об'єктів у польових умовах [10,12].

Наземні роботизовані комплекси з паралельними кінематичними зв'язками (пристрої типу гексапода) є новим і перспективним видом робототехнічного обладнання. Розроблений наземний роботизований комплекс (верстат-робот) має нерухому основу 1, на якій встановлено шість штанг змінної довжини 2, які пов'язані із рухомою платформою 3, на якій розміщені необхідні пристосування, зокрема шпіндельні головки 4 (рис. 14.1).



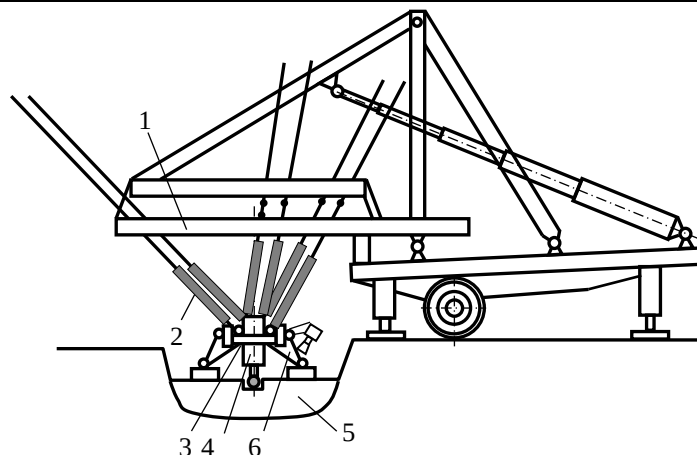


Рис. 14.1. Принципова схема наземного роботизованого комплексу

Для зниження вібрацій платформи між платформою верстата -робота і оброблюваним об'єктом 5 встановлюється важільна система 6.

Для транспортування наземного роботизованого комплексу його рама 1 підіймається гідравлічним приводом. При цьому маніпулятор компактно розміщується на платформі (рис. 14.2).

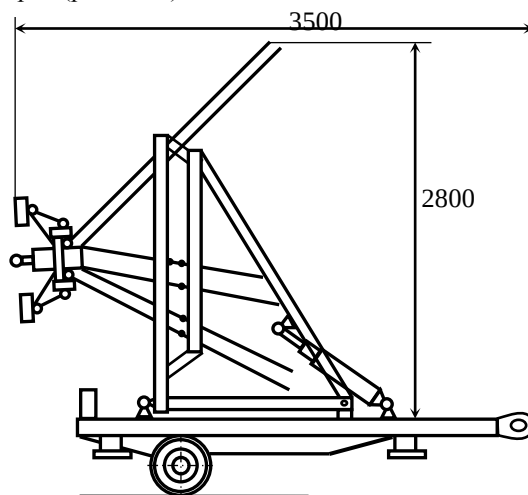


Рис. 14.2. Наземний роботизований комплекс на основі мехізму з паралельними структурами в транспортному положенні

Основою наземного роботизованого комплексу є стрижнева система, що включає шість штанг змінної довжини. Довжина кожної штанги змінюється автономними аналоговими приводами, що включають електродвигуни, пасові передачі та передачі гвинт-гайка (рис. 14.3).

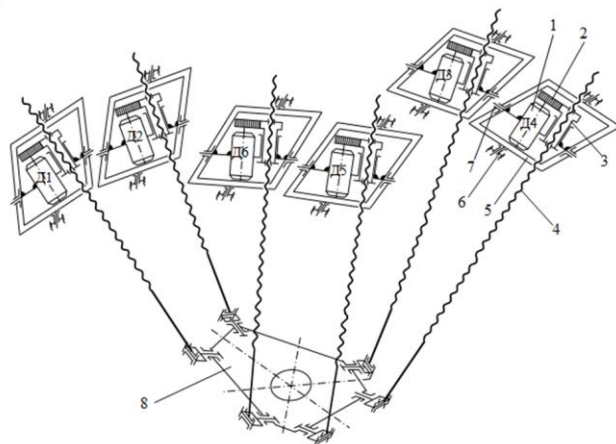


Рис. 14.3. Кінематична схема маніпулятора на основі механізму-гексапода

Наземні роботизовані комплекси побудовані на основі рухомої стрижневої структури мають недостатню жорсткість несучої системи. Тому запропонована принципово нова ідея обробки об'єктів за допомогою наземних роботизованих комплексів, яка полягає у використанні обладнання, що має низьку жорсткість із додатковими пристроями маніпулювання, які закріплюються на об'єкті і забезпечують необхідну точність при обробці [12].

Для роботи в польових умовах верстат-робот повинен мати збільшений робочий простір. Пропонується забезпечити зміну робочого простору шляхом введення додаткових рухомих стрижневих просторових механізмів у систему штанг змінної довжини (рис. 14.4).

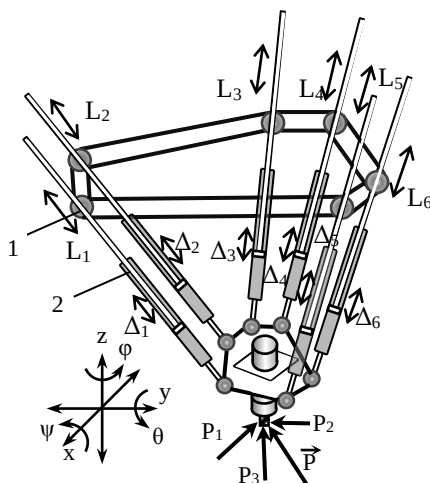


Рис. 14.4. Стрижнева система наземного роботизованого комплексу, що об'єднує шість штанг змінної довжини

Штанги змінної довжини мають аналогові приводи 1, що служать для зміни довжини штанг та дискретні приводи 2, які дозволяють суттєво змінити довжину штанг дискретним чином.

Це дає можливість в 2...4 рази змінювати робочий простір верстата-робота та реалізувати різноманітне розташування робочого органу відносно нерухомої основи (рис. 14.5).

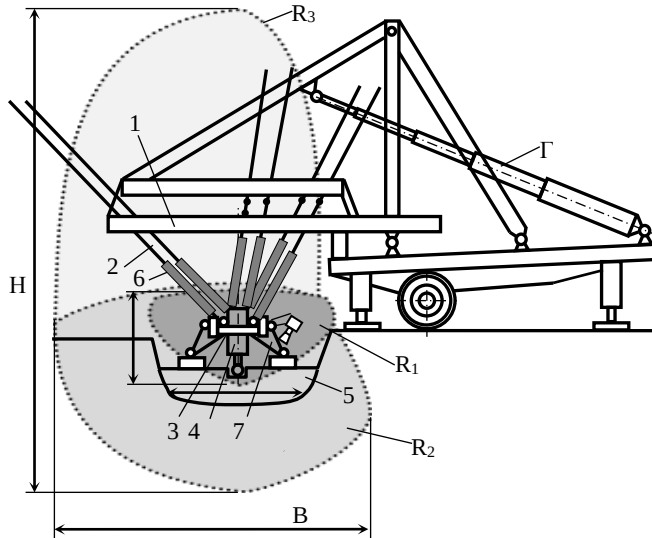


Рис. 14.5. Зміни робочого простору наземного роботизованого комплексу

Область робочого простору  $R_1$  забезпечується аналоговими приводами. Додатково робочий простір змінюється за рахунок дискретних змін конфігурації стрижневої системи. Дискретні зміни довжини приводів 6 поширюють робочий простір на область  $R_2$ .

Поворот рами 1 наземного роботизованого комплексу з допомогою гідропривода розширює робочий простір на область  $R_3$ . Забезпечується можливість обробки об'єктів, що розташовані на вертикальній (торцевій) стінці. При цьому забезпечується обробка об'єктів згори, знизу або збоку. Допустимою є обробка об'єктів, розміщених в нішах. Це суттєво відрізняє запропоноване обладнання для обробки об'єктів від традиційного обладнання для обробки в умовах цеху.

Стрижнева структура наземного роботизованого комплексу з паралельними кінематичними зв'язками може бути змінена з використанням додаткових стрижнів і відповідних приводів. При цьому суттєво збільшується довжина штанг і додатково збільшується робочий простір. Як приклад, нарощення довжини штанг дозволяє проводити обробку об'єктів у заглибинах чи траншеях (рис. 14.6).

Для компенсації похибок, обумовлених деформативністю пружної системи наземного роботизованого комплексу, застосовані різноманітні методи прив'язки виконавчого органу до об'єкта та контролю його положення.

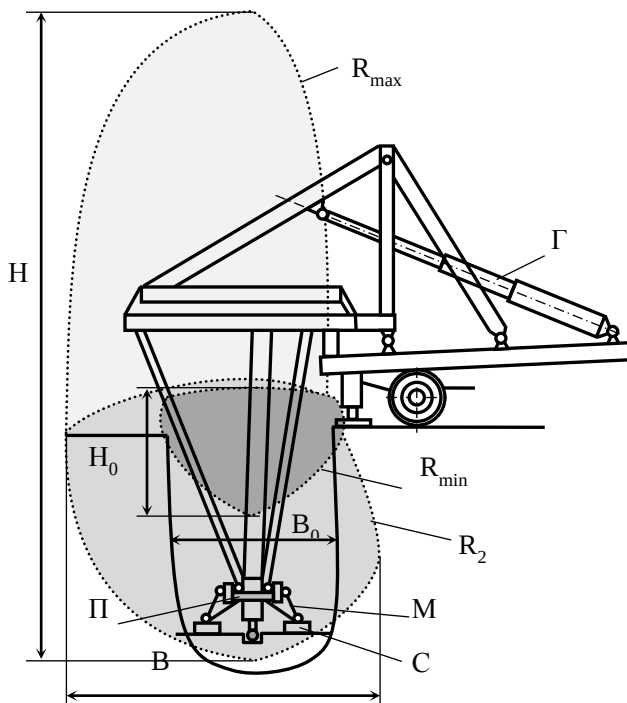


Рис. 14.6. Розширення робочого простору наземного роботизованого комплексу шляхом нарощення довжин штанг введенням в них додаткових стрижнів

Для базування виконавчого органу на об'єкті застосовується додатковий маніпулятор. Він має ряд схватів, які забезпечують жорстке з'єднання платформи робота із оброблюваним об'єктом. При цьому рухомий інструмент встановлюється на платформі робота і забезпечує обробку об'єкта з необхідною точністю [70,72].

Конструкція маніпулятора дає можливість закріпити оброблюваний об'єкт на платформі робота. Відповідно при необхідності та можливості наземний роботизований комплекс здійснює переміщення небезпечного об'єкта, його поворот або видалення окремих частин об'єкта чи сторонніх предметів, що заважають технологічному процесу обробки.

Шпиндельна головка із інструментом здійснює обмежені переміщення відносно платформи верстата-робота, здійснюючи обробку об'єкта. Контроль обробки забезпечується відеосупроводом процесу та спеціальними системами вимірів.

На платформі робота автоматично можуть бути встановлені необхідні пристрої із магазину пристроїв. Застосовуються пристрої для ідентифікації об'єктів та пристрої обробки об'єктів. Зокрема, пристрої огляду об'єкту: відеокамери, лазерні сканери, вимірювальні щупи, тактильні пристрої, аналізатори хімічного складу, твердості та

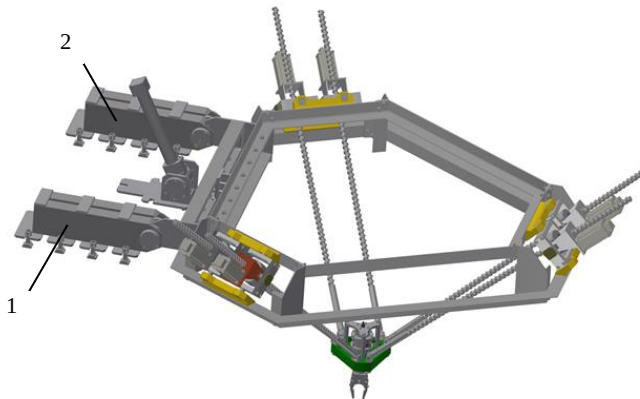
інших властивостей об'єкту. Пропонуються пристрої очищення об'єкта, зокрема піскоструменеві та гідроструменеві [11].

Основним методом обробки деталей наземним роботизованим комплексом є високоточна механічна обробка (6...9 квалітет точності). Для механічної обробки об'єкта використовуються шпиндельні головки із одним або декількома шпинделями, призначеними для установки інструментів: дискових пил, фрез, свердел, мітчиків та інших. Можливе використання щіток та голкофрез для очищення поверхонь.

В якості можливих пристроїв механічної обробки пропонуються роботомеханічні пристрої типу автоматизованих ключів, викруток, поворотних лещат. Можливе застосування гідрофікованих пресових пристроїв для видавлювання, гнуття та різання, прошивки отворів, тощо.

Пропонуються до застосування різноманітні пристрої для реалізації інженерно-фізичних методів обробки. Зокрема, різакі газові, різакі плазмові, різакі лазерні. Зварювальні апарати для точкового зварювання, газового та електрозварювання.

Наземний роботизований комплекс з паралельними кінематичними структурами реалізовано в якості дослідного зразка. Зразок є мобільним і придатний до виконання операцій матеріалобробки в польових умовах. Рама верстата- робота шарнірно закріплена на двох балках 1, 2, які встановлюються і закріплюються на транспортному засобі (рис. 14.7).



*Рис. 14.7. З'єднання поворотної рами наземного роботизованого комплексу з балками, що встановлені на транспортному засобі*

Для перевірки працездатності наземного роботизованого комплексу розроблено спеціальне оснащення у вигляді додаткової опори.

Опора має вертикальні стійки 1 і 2 і балки 3, 4 які закріплені на горизонтальній основі та вертикальній стінці (рис. 14.8).

Балки 3 і 4 мають шарніри з горизонтальними вісями на яких повертається рама 5 мобільного робота. Рама являє собою гексагональну стрижневу структуру. Вона утворена двома поясами верхнім 6 і нижнім 7 з'єднаних стійками 8. Кут повороту рами регулюється приводом 8. Він закріплений на балці 9.

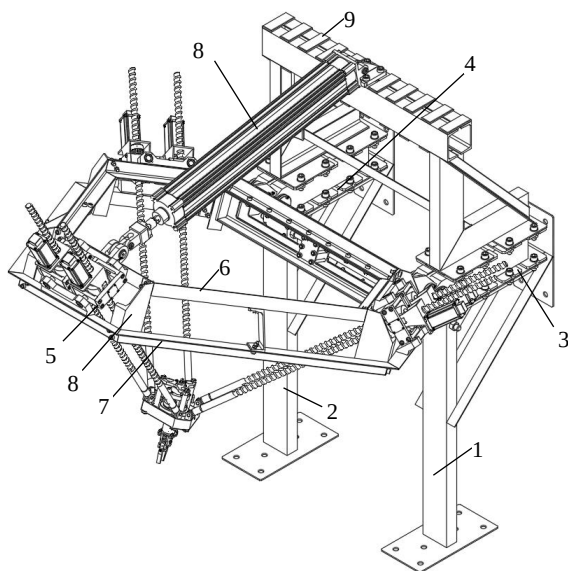


Рис. 14.8. Встановлення рухомої рами наземного роботизованого комплексу на спеціальній опорі

Для переміщення рами використано додатковий пневмопривід у вигляді пневмоциліндра який дає можливість переміщувати раму повертаючи її у вертикальній площині (рис. 14.9).

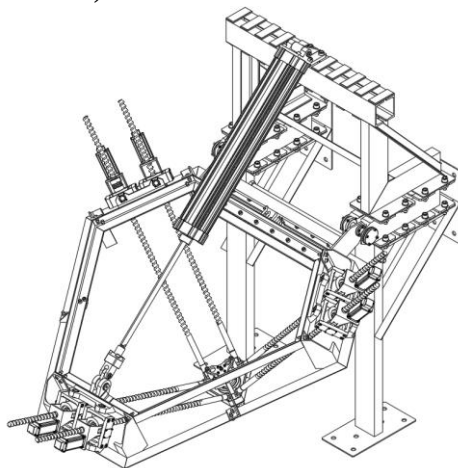


Рис. 14.9. Схема переміщення рами наземного роботизованого комплексу за допомогою пневмопривода

Діаметр поршня пневмоциліндра 100мм, хід поршня 800 мм. Максимальне зусилля на штоці складає 7кН при тиску в пневмосистемі 10 бар. Пневмопривод

забезпечує переміщення рами та компенсацію гравітаційних навантажень, що діють на стрижневу систему наземного роботизованого комплексу.

Для фіксації рами у заданому поперечно-кутовому положенні поряд з пневмоприводом використовуються механічні приводи, які мають трубчасту гайку із правою і лівою різью на її кінцях та два різьбових хвостовики, що входять в різьбовій частині труби. Привод розміщено паралельно пневматичному приводу і забезпечує поворот на кут  $45^\circ$  (рис. 14.10).

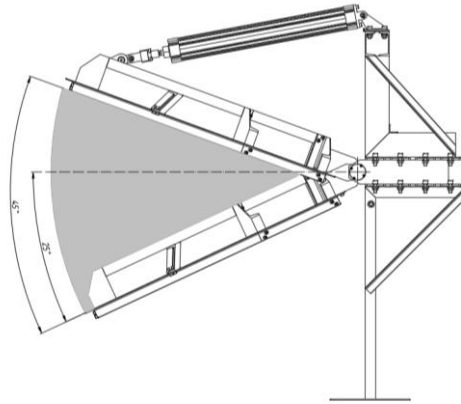


Рис. 14.10. Схема повороту та фіксації рами наземного роботизованого комплексу

Наземний роботизований комплекс у своїй основній частині реалізовано в якості дослідного зразка. Виготовлена рамна конструкція наземного роботизованого комплексу. Вона включає два пояси (рис. 14.11).



Рис. 14.11. Дослідний зразок рамної конструкції наземного роботизованого комплексу із штангами змінної довжини та рухомою платформою при вигляді збоку

Шість штанг змінної довжини закріплені на рамній конструкції і зв'язані з платформою (рис. 14.12).



Рис. 14.12. Дослідний зразок рамної конструкції наземного роботизованого комплексу із штангами змінної довжини та рухомою платформою при вигляді згори

Виготовлені основні вузли і укомплектовані приводи зміни довжини штанг наземного роботизованого комплексу. Приводи зміни довжини штанг мають електродвигуни з пасовими передачами і передачі «гвинт-гайка» кочення, що забезпечують поступальне переміщення штанг (рис.14.13 а).

Приводи зміни довжини штанг встановлені в карданних шарнірах, які допускають поворот привода навколо двох взаємно-перпендикулярних вісей. Карданні шарніри мають рухомі внутрішні рамки на яких закріплені приводи (рис. 14.13 б).



а

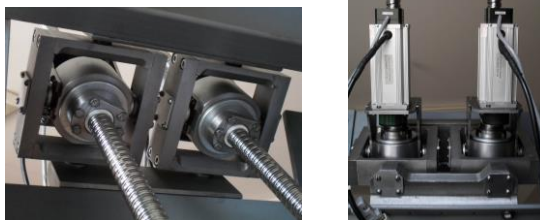


б

Рис. 14.13. Привід штанги змінної довжини з сервоприводом Maxsine EP2-TL12F:  
а - вигляд згори; б - вигляд збоку

Внутрішні рамки закріплені з можливістю повороту в корпусі комплектної подвійної шарнірної опори, яка розташована на рамі наземного роботизованого комплексу (рис. 14.14).





*Рис. 14.14. Подвійна комплектна шарнірна опора двох штанг встановлена на рамі наземного роботизованого комплексу*

Приводи наземного роботизованого комплексу встановлені на рамі під кутом, а штанги змінної довжини проходить через отвір гайки (рис. 14.15).



*Рис. 14.15. Розташування подвійної шарнірної опори штанг змінної довжини на рамі наземного роботизованого комплексу*

На платформі наземного роботизованого комплексу встановлюється необхідне обладнання (рис. 14.16).



*Рис. 14.16. Конструкція схвата, який встановлено на платформі наземного роботизованого комплексу*

Використовуються шпindelні вузли із пристроями закріплення інструменту та різноманітні схвати. Схват із додатковими приводами повороту і затиску дає можливість закріпити об'єкт і повернути його на певний кут відносно вісі обертання схвата. Схват має універсальну конструкцію із змінними пальцями

Рама наземного роботизованого комплексу виготовлена і апробована в процесі експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних вимірів укомплектовано відповідне оснащення і апаратура. Переміщення рами здійснено спеціальними гвинтовими приводами, які дозволяють встановити необхідне поперечно-кутове положення рами.

Для забезпечення заходів техніки безпеки на рамі робота встановлені стійки для додаткового опирання рами на нерухому поверхню. Стійки є страхувальними елементами, які запобігають руйнуванню стрижневої системи робота в непередбачуваних ситуаціях. Всього встановлюється мінімум дві стійки (рис. 14.17).



Рис. 14.17. Наземний роботизований комплекс в процесі експериментальних досліджень із страховочними стійками встановленими на рамі

Розроблена конструкція захватного пристрою призначеного для утримання деталей кулястої форми. Пристрій має три пружні пальці, які переміщуються пневмоциліндром (рис. 14.18).

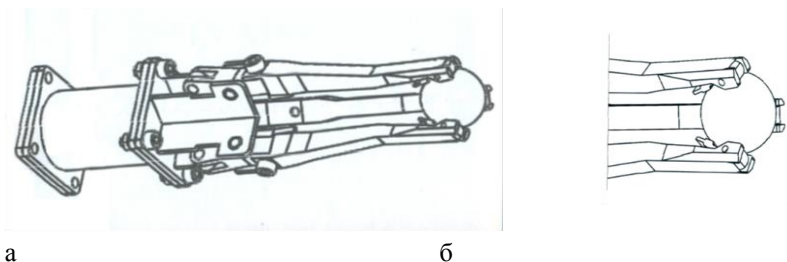


Рис. 14.18. Конструктивне рішення захватного пристрою для утримання деталей кулястої форми: а – конструктивна схема; б – розташування губок на пальцях

В типовій конструкції використовуються важелі, які переміщуються гідро- або пневмоциліндрами (рис. 14.19).



Рис. 14.19. Конструкція захватного пристрою з важелями, які переміщуються і повертаються пневмоциліндрами

Для роботи із небезпечними об'єктами використовуються спеціально розроблені пальці схватів із пружними елементами. Вони суттєво знижують навантаження на об'єкт маніпулювання. Еластичні захватні пристрої можуть мати різну конструкцію. Запропоновано конструкцію схвата із пружними захватними пальцями (рис. 14.20).

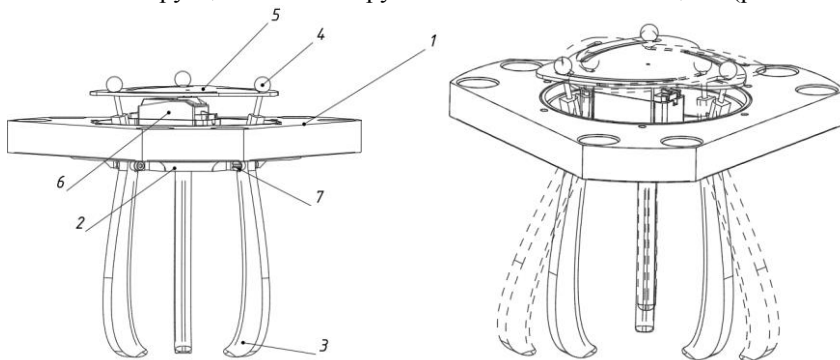


Рис. 14.20. Діапазон переміщень захватних пальців

Проведена перевірка працездатності даного пристрою. Підтверджена його висока ефективність. Розроблено і апробовано універсальний пристрій для захвату і утримання небезпечних об'єктів. Пристрій забезпечує мінімальне навантаження на об'єкт маніпулювання. Пристрій встановлюється у виконавчому органі маніпулятора який забезпечує точне позиціонування пристрою та його переміщення і поворот в напрямках Z і  $\phi$  (рис. 14.21).

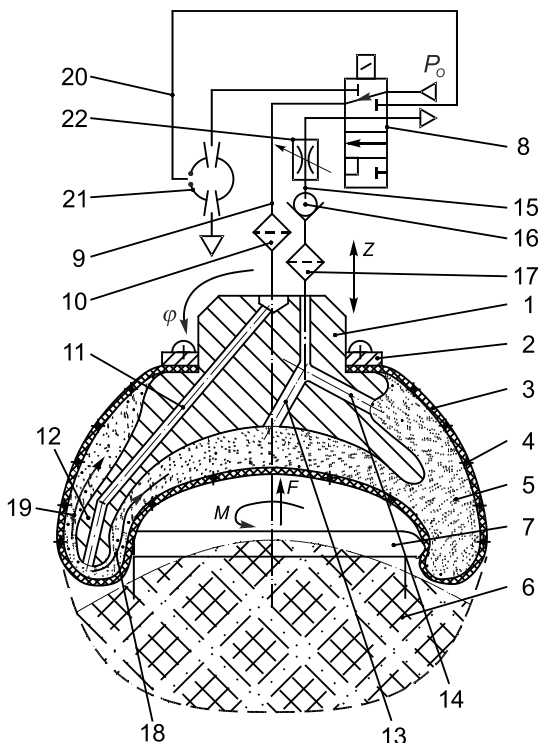


Рис. 14.21. Схема пристрою для захвата і утримання небезпечною об'єкту\*

Пристрій має корпус 1 на якому фланцем 2 закріплена гумо-тканинна оболонка 3. Оболонка армована металевими кільцями 4 які формують верхню напівсферичну частину оболонки та її нижню донну частину. Порожнина гумо-тканинної оболонки частково заповнена дрібнодисперсним сипучим матеріалом 5. В неробочому стані оболонка провисає набуваючи грушовидної форми, а сипучий матеріал скупчується в її нижній частині 6 (показано пунктиром). Захватний пристрій призначено для захвата і утримання небезпечного об'єкту 7, наприклад підриваюча міна. Об'єкт має складну форму з виступами на поверхні та можливим забрудненням. При зміщенні пристрою вниз по стрілці Z оболонка 4 контактує із об'єктом 7 вільно охоплюючи його виступи.

Пристрій має пневмосистему живлення середньою тиску  $P_0 \cong 10 \text{ бар}$ . В необхідних випадках тиск живлення може бути підвищено до необхідного значення. Пневмосистема включає електропневматичний розподільник 8 який має дві позиції та шість ліній. В позиції показаній на рисунку повітря по лінії 9 через фільтр 10 підводиться через отвори 11 до нижніх кінців виступів 12 розміщених на корпусі 1.

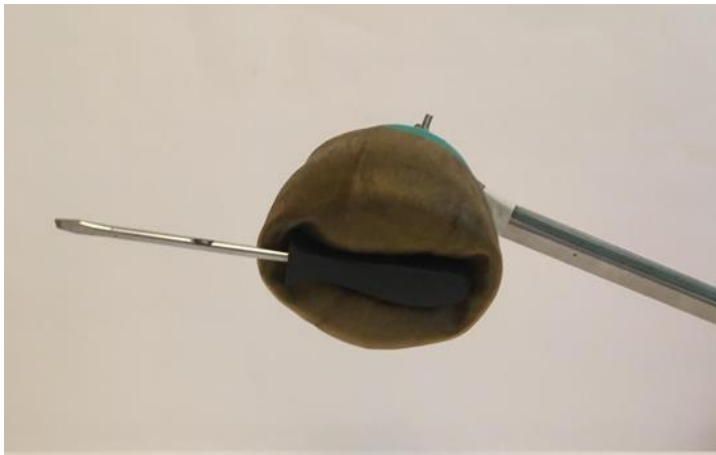
\*-пристрій розроблено, виготовлено і апробовано в лабораторії кафедри конструювання верстатів та машин «КПІ імені Ігоря Сікорського» під керівництвом завідувача лабораторії Костриці Сергія Миколайовича.

Кількість виступів 12 залежить від функціонального призначення захватного пристрою і може складати 3, 4, 5 та більше.

Повітря із порожнини гумо-тканинної оболонки 4 відводиться через отвори 13, 14 розташовані вище виступа 12. Відповідна лінія 15 має зворотній клапан 16 та фільтр 17. Підвід та відвід повітря створює циркуляцію дрібнодисперсного сипучого матеріалу 5 в напрямках показаних стрілками 18 та 19. При цьому сипучий матеріал рівномірно розміщується в порожнині гумо-тканинної оболонки яка охоплює об'єкт 7. Для захвату об'єкта розподільник 8 переключається змінюючи свою позицію на альтернативну. При цьому пневмолінії 9 і 15 підключаються магістраллю 20 до ежектора 21. В магістралі 20 створюється вакуум необхідного рівня. Повітря видаляється із порожнини гумо-тканинної оболонки 4, а сипучий матеріал 5 ущільнюється. Фільтри 10 і 17 запобігають видаленню сипучого матеріалу із порожнини оболонки, а зворотній клапан 16 і дросель 22 забезпечують необхідний розподіл сипучого матеріалу в нижній частині оболонки яка здійснює захват і утримання небезпечного об'єкта 7.

Видалення повітря забезпечує жорсткий захват і утримання небезпечного об'єкта. Зокрема може бути реалізовано необхідний крутний момент  $M$  для повороту об'єкта, або зусилля  $F$  необхідне для його підняття.

Приведено макетування розробленого пристрою (рис. 14.22).



*Рис. 14.22. Макетний зразок універсального пристрою для захвату і утримання небезпечного об'єкту*

Підтверджена працездатність розробленого універсального захватного пристрою та його ефективність при захваті та утриманні об'єктів різної форми. Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість застосування розробленого універсального захватного пристрою в наземних роботизованих комплексах призначених для роботи з небезпечними об'єктами [151].

## 14.2. Моделювання просторового руху платформи наземного роботизованого комплексу із паралельними кінематичними структурами

Механізми з паралельними кінематичними структурами є основою прогресивних конструкцій маніпуляторів. При їх математичному моделюванні визначаються основні закономірності статички, кінематики та динаміки маніпуляторів. Розроблені методи математичного моделювання є універсальними і придатні для дослідження маніпуляторів різного виду, зокрема маніпуляторів - триподів та маніпуляторів – гексаподів [11,12].

Розглянемо зворотну задачу кінематики просторового механізму з паралельними кінематичними структурами. При моделюванні механізму задається положення робочого органу (платформи), а необхідні геометричні і кінематичні параметри механізму знаходяться в залежності від зміни положення робочого органу.

Робочий орган механізму, який включає корпус, вузли кріплення штанг та інші необхідні пристрої, являє собою жорстку механічну систему. Його можна вважати одним твердим тілом. Положення робочого органу як твердого тіла характеризується набором координат із 6-ти параметрів. Три із них є декартовими координатами відповідним чином вибраного полюса платформи, а три інші характеризують просторове кутове положення робочого органу (рис.14.23).

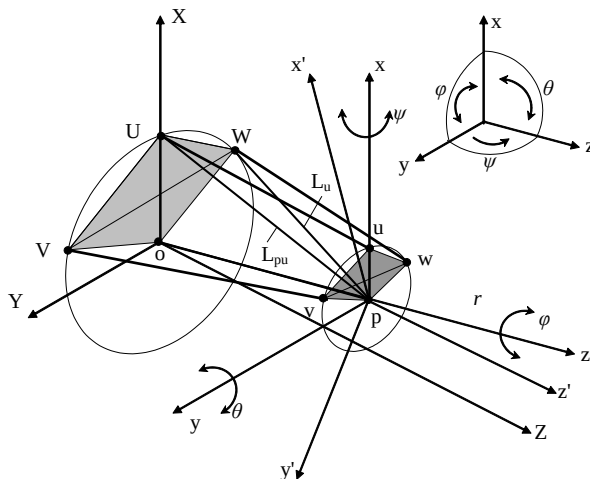


Рис. 14.23. Схема типового маніпулятора з паралельними кінематичними структурами та системи координат які характеризують просторове положення робочого органу механізму

Незалежно від типу і конструкції механізму з паралельними кінематичними структурами положення його робочого органу визначається однаковим чином.

Вихідною системою координат є нерухома система декартових прямокутних координат X, Y, Z. В полюсі p платформи розміщено центр паралельно зміщеної

системи координат  $x, y, z$  колінеарно відповідним осям нерухомої системи координат. Робочий орган механізму при своєму просторовому переміщенні повертається відносно полюса  $p$ . Із робочим органом зв'язана рухома система координат  $x', y', z'$ . Осі даної системи координат зміщені і повернуті відносно осей нерухомої системи координат  $X, Y, Z$ , а також повернуті відносно осей паралельно зміщеної системи  $x, y, z$  [7,76,151].

Зв'язок між координатами довільної точки нерухомої і повернутої систем координат встановлюється напрямними косинусами, які утворюють таблицю:

$$[c_{ij}] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}.$$

В таблиці позначено косинуси кутів між осями :

$$px = px_1, py = px_2, pz = px_3$$

$$c_{ij} = \cos(px_i, px_j'), i, j = 1, 2, 3$$

Матриця напрямних косинусів є ортогональною. Її визначник дорівнює одиниці, а її обернена матриця співпадає із транспонованою матрицею.

Використання напрямних косинусів дозволяє знайти координати деякої точки  $M$  платформи в нерухомій системі координат через координати точки в повернутій системі координат згідно залежності:

$$x_i' = \sum_{j=1}^3 c_{ij} x_j$$

де для скорочення позначено:

$$x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$$

$$x_1' = x', x_2' = y', x_3' = z'$$

Попередня рівність може бути записана в матрично-векторному вигляді:

$$\begin{pmatrix} x_i' \end{pmatrix} = [c_{ij}] \begin{pmatrix} x_j \end{pmatrix},$$

де  $\begin{pmatrix} x_i' \end{pmatrix}$  – вектор, який визначає положення деякої точки  $M$  в повернутій системі

координат;  $\begin{pmatrix} x_j \end{pmatrix}$  – вектор, який визначає положення точки  $M$  в нерухомій системі координат.

Матриця напрямних косинусів є симетричною і загалом визначається лише трьома незалежними параметрами. В якості таких параметрів вибирається відповідна система кутів Ейлера. Всього застосовується 12 базових систем кутів Ейлера [9]. Будемо використовувати дві системи кутів Ейлера  $(\psi, \Theta, \varphi)$  та  $(\alpha, \beta, \gamma)$ . При цьому

матриця напрямних косинусів подається у вигляді добутку трьох ортогональних матриць, наприклад:

$$\begin{aligned} [c_{ij}] &= A_1(\psi)A_2(\Theta)A_3(\varphi) \quad \text{або} \\ [c_{ij}] &= B_1(\alpha)B_2(\beta)B_3(\gamma), \end{aligned}$$

де  $A_1, A_2, A_3$  – ортогональні матриці, кожна із яких залежить від відповідного кута Ейлера із системи кутів Ейлера  $\Psi, \Theta, \varphi$ ;  $B_1, B_2, B_3$  – ортогональні матриці, які залежать від кутів Ейлера  $\alpha, \beta, \gamma$ .

Матриці, які відповідають даним системам кутів Ейлера, наведено нижче.

Розглянемо перетворення координат вектора при повороті робочого органа, який описано системою кутів Ейлера  $\Psi, \Theta, \varphi$ .

Зміна системи координат жорстко пов'язаної з робочим органом відповідає трьом послідовним поворотам робочого органа механізму відносно осей нерухомої системи координат. Повернута система координат згідно даних кутів Ейлера одержана із нерухомої системи шляхом трьох послідовних поворотів робочого органа відносно осей нерухомої системи координат.

Перший поворот здійснюється на кут  $\Psi$  відносно осі  $Ox$  (рис. 14.24).

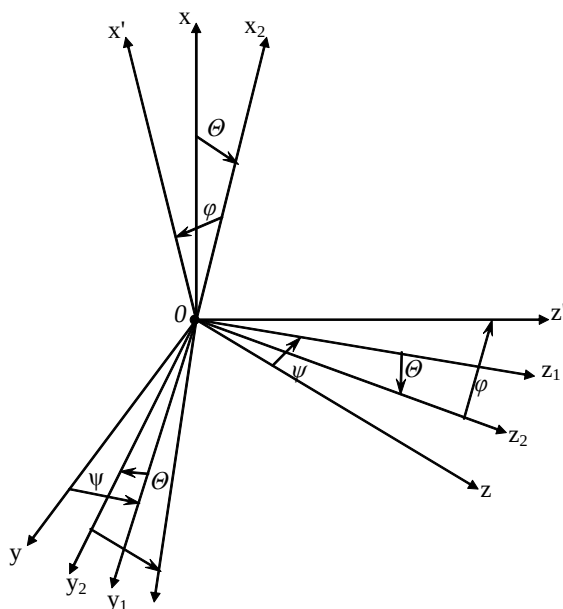


Рис. 14.24. Схема послідовних поворотів робочого органа відносно нерухомих осей координат



Даний поворот описується матрицею  $A_1$ , в якій кути Ейлера залежать від часу  $t$ . Матриця, що описує поворот навколо осі  $Ox$  має вигляд:

$$A_1(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi(t)) & -\sin(\psi(t)) \\ 0 & \sin(\psi(t)) & \cos(\psi(t)) \end{pmatrix}.$$

Матриця являє собою символну залежність від часу  $t$ .

Після першого повороту система координат жорстко зв'язана з робочим органом механізму займе положення  $Ox_1y_1z_1$ .

Перший поворот відповідає руху робочого органа в горизонтальній площині.

Другий поворот здійснюється на змінний в часі кут  $\Theta$  відносно осі  $y$ .

Відповідна матриця даного повороту залежить від кута  $\Theta$  і визначена у вигляді:

$$A_2(t) = \begin{pmatrix} \cos(\Theta(t)) & 0 & \sin(\Theta(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\Theta(t)) & 0 & \cos(\Theta(t)) \end{pmatrix}.$$

Після другого повороту система координат пов'язана з робочим органом займе положення  $Ox_2y_2z_2$ .

Другий поворот відповідає руху робочого органа механізму у вертикальній площині.

Третій поворот здійснюється на кут  $\varphi$  відносно нерухомої осі  $Oz$ .

Поворот навколо осі  $z$  на кут  $\varphi$  описується матрицею повороту  $A_3$ .

Відповідна матриця повороту виражена через кут  $\varphi$  у вигляді:

$$A_3(t) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi(t)) & -\sin(\varphi(t)) & 0 \\ \sin(\varphi(t)) & \cos(\varphi(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Після третього повороту система координат жорстко зв'язана із робочим органом займе положення  $Ox'y'z'$  (див. рис. 14.24), що відповідає положенню осей повернутої системи координат.

Сумарний поворот системи координат жорстко пов'язаної з робочим органом виражається матрицею напрямних косинусів компоненти якої залежать від кутів Ейлера  $\psi, \Theta, \varphi$ . Дана матриця має наступний вигляд:

$$A(t) := A_1(t) \cdot A_2(t) \cdot A_3(t).$$

Розглянута система кутів Ейлера найбільш зручна для опису руху робочого органу механізму з паралельною кінематикою.

Разом з нею застосовується ще ряд систем кутів Ейлера. Зокрема, три кути Ейлера ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) відповідають наступним поворотам системи координат жорстко зв'язаної з робочим органом маніпулятора. Перший поворот здійснюється на кут  $\alpha$  відносно осі  $oz$  нерухомої системи координат (рис. 14.25).

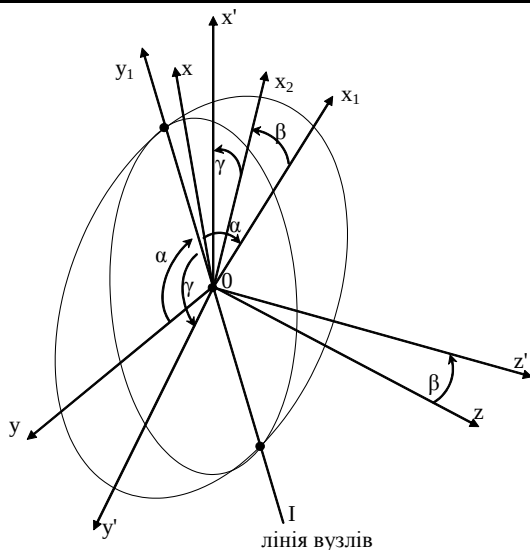


Рис.14.25. Схема послідовних поворотів системи координат жорстко зв'язаної із робочим органом механізму на кути Ейлера ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )

Даний поворот робочого органу відповідає його обертанням навколо вісі платформи, тобто вісі, перпендикулярної площині платформи.

Матриця, яка описує перший поворот залежить від кута Ейлера  $\alpha$ , який є функцією часу. Відповідно, вигляд матриці першого повороту:

$$B1(t) := \begin{pmatrix} \cos(\alpha(t)) & -\sin(\alpha(t)) & 0 \\ \sin(\alpha(t)) & \cos(\alpha(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Другий поворот системи координат жорстко зв'язаної із робочим органом здійснюється на кут  $\beta$  відносно нового положення осі  $y$ , а саме відносно осі  $y_1$ .

Дана вісь являє собою лінію вузлів I (див. рис. 14.25).

Матриця яка описує другий поворот залежить лише від кута Ейлера  $\beta$ . Матриця другого повороту визначена у вигляді :

$$B2(t) := \begin{pmatrix} \cos(\beta(t)) & 0 & \sin(\beta(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta(t)) & 0 & \cos(\beta(t)) \end{pmatrix}.$$

Третій поворот системи координат жорстко зв'язаної з робочим органом маніпулятора здійснюється на кут  $\gamma$  відносно нового положення осі  $z$ , а саме відносно нової осі  $z'$ .

Матриця, яка описує третій поворот системи координат жорстко зв'язаної з робочим органом маніпулятора визначена у вигляді:

$$B3(t) := \begin{pmatrix} \cos(\gamma(t)) & -\sin(\gamma(t)) & 0 \\ \sin(\gamma(t)) & \cos(\gamma(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Загальна матриця напрямних косинусів для даного набору кутів Ейлера має вигляд:

$$B(t) := B1(t) \cdot B2(t) \cdot B3(t)$$

В результаті трьох послідовних поворотів системи координат жорстко зв'язаної з робочим органом маніпулятора платформа займе деяке кінцеве положення в просторі.

Поворот робочого органа являє собою обертання кожного радіуса вектора точок робочого органа навколо деякої осі  $L$ , точки якої є інваріантними (рис. 14.26).

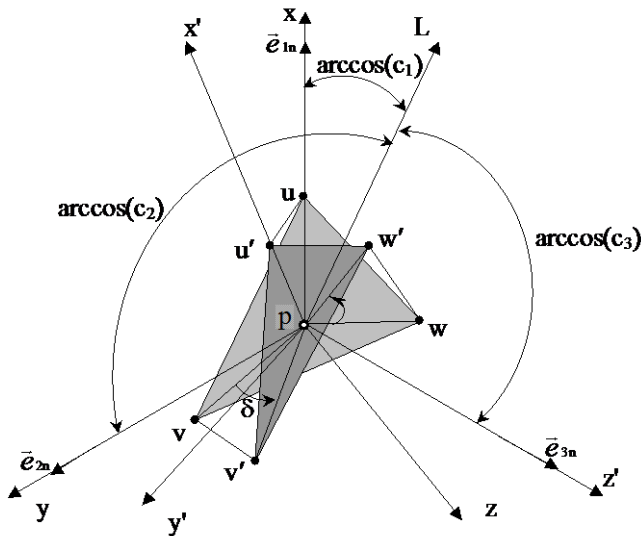


Рис. 14.26. Вісь обертання  $L$  та її положення в нерухомій системі координат

Кут повороту  $\delta$  навколо даної осі визначається матрицею напрямних косинусів згідно співвідношень

$$\cos \delta = \frac{1}{2} [Tr(c_{ij}) - 1] = \frac{1}{2} (c_{11} + c_{22} + c_{33} - 1)$$

Положення осі обертання відносно осей нерухомої системи координат  $Oxyz$  характеризується трьома напрямними косинусами  $c_1, c_2, c_3$ , які визначаються через матрицю обертання згідно залежностей:

$$c_1 = \frac{c_{32} - c_{23}}{2 \sin \delta}, \quad c_2 = \frac{c_{13} - c_{31}}{2 \sin \delta}, \quad c_3 = \frac{c_{21} - c_{12}}{2 \sin \delta}$$

Загальна матриця повороту може бути визначена через параметри, що характеризують вісь обертання у вигляді:

$$[c_{ij}] = \cos \delta \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + (1 - \cos \delta) \begin{bmatrix} c_1^2 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2^2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3^2 \end{bmatrix} + \sin \delta \begin{bmatrix} 0 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Обертання робочого органа відносно нерухомої системи координат може бути визначено чотирма параметрами Ейлера  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ . Вони зв'язані із величинами, що характеризують вісь обертання згідно залежностей:

$$\lambda = c_1 \sin \frac{\delta}{2}, \quad \mu = c_2 \sin \frac{\delta}{2}, \quad \nu = c_3 \sin \frac{\delta}{2}, \quad \lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 + \rho^2 = 1.$$

Матриця повороту виражається через параметри Ейлера наступним чином:

$$[c_{ij}] = \begin{bmatrix} \lambda^2 - \mu^2 - \nu^2 + \rho^2 & 2(\lambda\mu - \nu\rho) & 2(\nu\lambda - \mu\rho) \\ 2(\lambda\mu - \nu\rho) & \mu^2 - \nu^2 - \lambda^2 + \rho^2 & 2(\mu\nu - \lambda\rho) \\ 2(\nu\lambda - \mu\rho) & 2(\mu\nu - \lambda\rho) & \nu^2 - \lambda^2 - \mu^2 + \rho^2 \end{bmatrix}$$

Одержані матриці дозволяють визначити положення, швидкості і пришвидження при повороті платформи.

Розглянемо три окремі точки  $u$ ,  $v$ ,  $w$  на платформі маніпулятора. Ці точки розміщені в одній площині ( $oxy$ ) і є місцями розташування шарнірів штанг змінної довжини [147]. Задамо координати точок таким чином, щоб вони розміщувались на колі радіуса  $r$  з центром в початку координат (рис. 14.27).

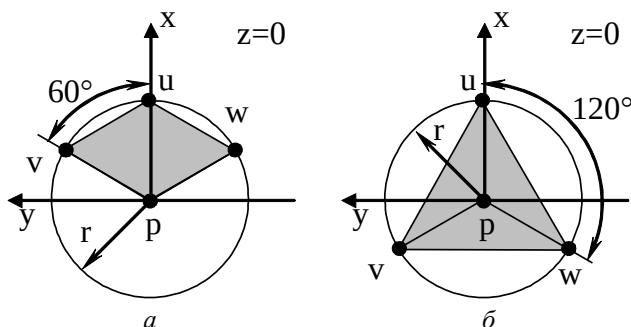


Рис. 14.27. Точки на робочому органі маніпулятора в яких закріплені сферичні шарніри штанг змінної довжини для двох різних варіантів а і б

Координати точок  $u$ ,  $v$ ,  $w$  в системі координат жорстко зв'язаній із робочим органом механізму визначимо у вигляді:

$$\text{де } (r, 0, 0) \text{ для точки } u, \left( \frac{r}{2}, r \frac{\sqrt{3}}{2}, 0 \right) \text{ для точки } v, \left( \frac{r}{2}, -r \frac{\sqrt{3}}{2}, 0 \right) \text{ для точки } w.$$

Прийmemo, що робочий орган маніпулятора здійснює усталений гармонічний рух в горизонтальній та вертикальній площинах, які проходять через початкове

положення платформи. При цьому кути повороту робочого органу відносно нерухомої системи координат визначаються у вигляді:

$$\begin{aligned}\psi(t) &= \psi_a \sin(\omega_\psi t + \psi_\psi), \\ \theta(t) &= \theta_a \sin(\omega_\theta t + \psi_\theta), \quad \varphi(t) = 0.\end{aligned}$$

де  $\psi_a$ ,  $\theta_a$  - амплітудні значення кутів відхилення робочого органу платформи від початкового положення;  $\omega_\psi$ ,  $\omega_\theta$  - кругові частоти кутових коливальних рухів робочого органу відповідно в горизонтальній та вертикальній площинах;  $t$  - час;  $\psi_\psi$ ,  $\psi_\theta$  - початкові фази гармонічних законів руху робочого органу робота відповідно в горизонтальній та вертикальній площинах.

Визначимо переміщення кінців штанг (точок  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) при зміні кутів Ейлера згідно залежностей:

$$\psi(t) = \sin(2\pi t), \quad \theta(t) = \sin(2\pi t), \quad \varphi(t) = 0.$$

Для вказаних значень кутів Ейлера визначена символічна матриця повороту у вигляді:

$$A(t) \rightarrow \begin{pmatrix} \cos(\sin(2 \cdot \pi \cdot t)) & 0 & \sin(\sin(2 \cdot \pi \cdot t)) \\ \sin(\sin(2 \cdot \pi \cdot t))^2 & \cos(\sin(2 \cdot \pi \cdot t)) & -\sin(\sin(2 \cdot \pi \cdot t)) \cdot \cos(\sin(2 \cdot \pi \cdot t)) \\ -\sin(\sin(2 \cdot \pi \cdot t)) \cdot \cos(\sin(2 \cdot \pi \cdot t)) & \sin(\sin(2 \cdot \pi \cdot t)) & \cos(\sin(2 \cdot \pi \cdot t))^2 \end{pmatrix}$$

При цьому розраховані зміни координат кінців штанг у функції часу. Розрахункові значення проекцій точок  $u$  і  $v$  на осі нерухомої системи координат мають вигляд гладких періодичних процесів (рис.14.28).

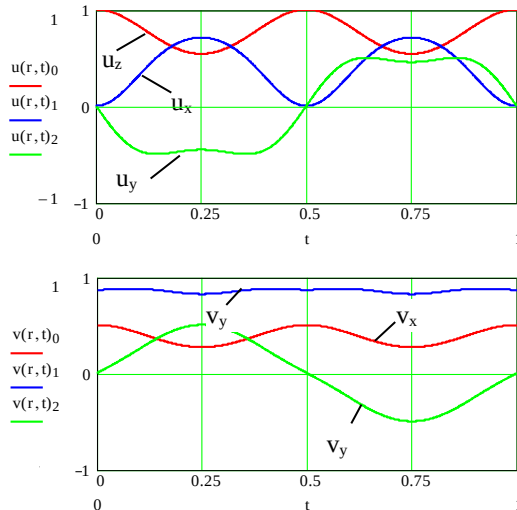


Рис.14.28. Зміна в часі координат кінців штанг (точки  $u$  і  $v$ ) при зміні кутів Ейлера  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  по закону  $\psi(t) = \sin(2\pi t)$ ,  $\theta(t) = \sin(2\pi t)$ ,  $\varphi(t) = 0$

Аналогічні обчислення здійснено для гармонічних змін системи кутів Ейлера  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . При цьому кути задавались у вигляді:

$$\begin{aligned}\alpha(t) &= \alpha_a \sin(\omega_\alpha t + \psi_\alpha), \\ \beta(t) &= \beta_a \sin(\omega_\beta t + \psi_\beta), \\ \gamma(t) &= \gamma_a \sin(\omega_\gamma t + \psi_\gamma).\end{aligned}$$

де  $\alpha_a$ ,  $\beta_a$ ,  $\gamma_a$  амплітудні значення кутів;  $\omega_\alpha$ ,  $\omega_\beta$ ,  $\omega_\gamma$  - початкові фази відповідних кутів Ейлера.

Як характерний приклад прийняті закони зміни кутів Ейлера у вигляді

$$\alpha(t) = \sin(2\pi t), \quad \beta(t) = \sin(2\pi t), \quad \gamma(t) = 0.$$

Для даних законів зміни кутів Ейлера  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  визначена символічна матриця повороту у функції часу. Вона має наступний вигляд

$$B(t) \rightarrow \begin{pmatrix} \cos(\sin(2\pi t))^2 & -\sin(\sin(2\pi t)) & \cos(\sin(2\pi t)) \cdot \sin(\sin(2\pi t)) \\ \cos(\sin(2\pi t)) \cdot \sin(\sin(2\pi t)) & \cos(\sin(2\pi t)) & \sin(\sin(2\pi t))^2 \\ -\sin(\sin(2\pi t)) & 0 & \cos(\sin(2\pi t)) \end{pmatrix}$$

На основі наведених залежностей знайдені поточні координати кінців штанг механізму у функції часу.

Розрахункові значення координат точки  $v$  робочого органа при змінах кутів Ейлера по закону:

$$\alpha(t) = \sin(2\pi t), \quad \beta(t) = \sin(2\pi t), \quad \gamma(t) = 0 \text{ наведено на рис. 14.29.}$$

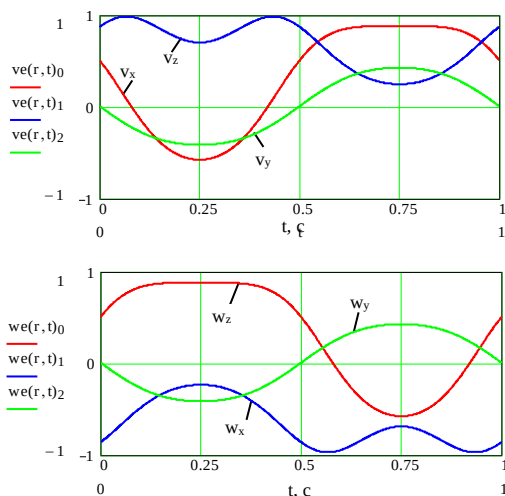


Рис. 14.29. Змінні в часі координати кінців штанги (точка  $v$  і  $w$ ) при гармонічних змінах кутів Ейлера  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  по закону  $\alpha(t) = \sin(2\pi t)$ ,  $\beta(t) = \sin(2\pi t)$ ,  $\gamma(t) = 0$

В процесі досліджень знайдено положення миттєвої осі обертання платформи (напрямні косинуси  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  та кут обертання в функції часу. Обчислення згідно формул наведених раніше здійснено наступним фрагментом документа MathCAD:

$$Tr(t) := \sum_{i=0}^2 A(t)_{i,i}, \quad \delta(t) := a \cos \left[ \frac{Tr(t) - 1}{2} \right], \quad \delta_{grd}(t) := \delta(t) \cdot \frac{180}{\pi},$$

$$c1(t) := \frac{A(t)_{2,1} - A(t)_{1,2}}{2 \cdot \sin(\delta(t))}, \quad c2(t) := \frac{A(t)_{0,2} - A(t)_{2,0}}{2 \cdot \sin(\delta(t))}, \quad c3(t) := \frac{A(t)_{1,0} - A(t)_{0,1}}{2 \cdot \sin(\delta(t))}.$$

Результати обчислень подані у графічному вигляді (рис.14.30.)

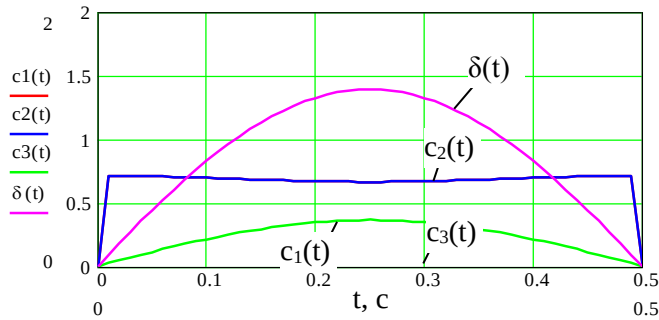


Рис. 14.30. Фрагмент документа MathCAD і результати визначення положення осі обертання і кута повороту при гармонічних поперечно-кутових поворотах робочого органу механізму в горизонтальній і вертикальній площинах

Розраховані значення параметрів дають положення осі обертання та кути повороту платформи. Дані величини є інваріантними і не залежать, зокрема від вибору системи кутів Ейлера. Це підтверджено розрахунком. Обчислення здійснено для системи кутів Ейлера  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  які змінюються по гармонічному закону. Одержані параметри подані у графічному вигляді (рис. 14.31).

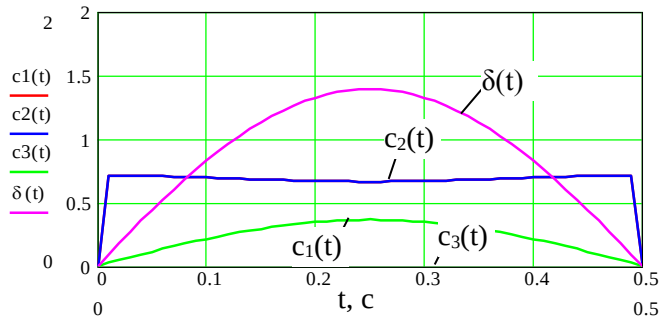


Рис. 14.31. Розрахунок положення осі обертання робочого органу при гармонічних змінах системи кутів Ейлера  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

Результати розрахунків в даному випадку співпадають із одержаними раніше. Визначені шляхом математичного моделювання поточні координати кінців штанг

просторового механізму послужили основою для визначення змінної довжини штанг (l-координат). Змінна в часі довжина штанги являє собою відстань між рухомою точкою робочого органа механізму (наприклад точка  $u$ ) і точкою закріплення другого кінця штанги (точка  $U$ ).

Довжина штанги обчислюється за формулою:

$$L_u = \sqrt{(x_u - x_v)^2 + (y_v - y_u)^2 + (z_u - z_v)^2}.$$

Аналогічні формули мають місце для інших штанг. Координати точок закріплення кінців штанги  $U$ ,  $V$ ,  $W$  визначимо у вигляді векторів залежних від геометричного параметра  $r$  наступним чином:

$$U(r) = \begin{pmatrix} 3r \\ 0 \\ -4r \end{pmatrix}, \quad V(r) = \begin{pmatrix} \frac{3r}{2} \\ \frac{3r\sqrt{3}}{2} \\ -4r \end{pmatrix}, \quad W(r) = \begin{pmatrix} \frac{3r}{2} \\ -\frac{3r\sqrt{3}}{2} \\ -4r \end{pmatrix}.$$

Для усталеного гармонічного поперечно-кутового переміщення робочого органа змінні в часі довжини штанг подані в графічному вигляді на рис. 14.32.

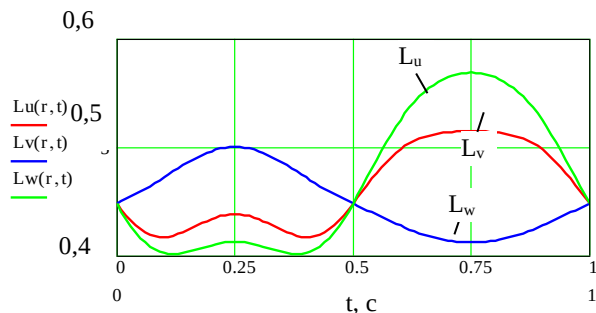


Рис. 14.32. Залежність  $L$ -координат від часу для гармонічного поперечно-кутового руху робочого органа

Дана залежність має ряд екстремумів, на яких  $\frac{\partial L}{\partial t} = 0$ ,  $i=u,v,w$ .

В цих точках елементарна нескінченно мала зміна  $L$ -координати повинна привести до нескінченно великих змін положення робочого органа. Тобто ці точки є особливими (критичними, сингулярними). Дослідження сингулярних положень робочого органа робота являє собою важливу окрему науково технічну задачу. В загальному випадку переміщення робочого органа є результатом суми поступального і обертального переміщень. Визначимо переміщення характерної точки робочого органа (полюса  $P$ ) гармонічною векторною функцією часу. При цьому координата полюса визначиться у вигляді:



$$\begin{aligned}x_p(t) &= x_a \sin(\omega_{xp}t + \psi_{xp}), \\y_p(t) &= y_a \sin(\omega_{yp}t + \psi_{yp}), \\z_p(t) &= z_a \sin(\omega_{zp}t + \psi_{zp}),\end{aligned}$$

де  $x_p, y_p, z_p$  - амплітудні значення переміщення полюса;  $\omega_{xp}, \omega_{yp}, \omega_{zp}$  - кругові частоти зміни проекцій переміщення полюса;  $\psi_{xp}, \psi_{yp}, \psi_{zp}$  - початкові фази зміни проекцій переміщення полюса.

В якості характерного випадку прийнято гармонічні переміщення полюса по закону  $x_p(t) = \sin t, y_p(t) = \cos t, z_p(t) = 0$

Зміна довжини штанг для випадку коли полюс переміщується по гармонічному закону  $x_p(t) = \sin t, y_p(t) = \cos t, z_p(t) = 0$ .

Розраховані за допомогою пакета MathCAD довжини штанг наведені на рис. 14.33.

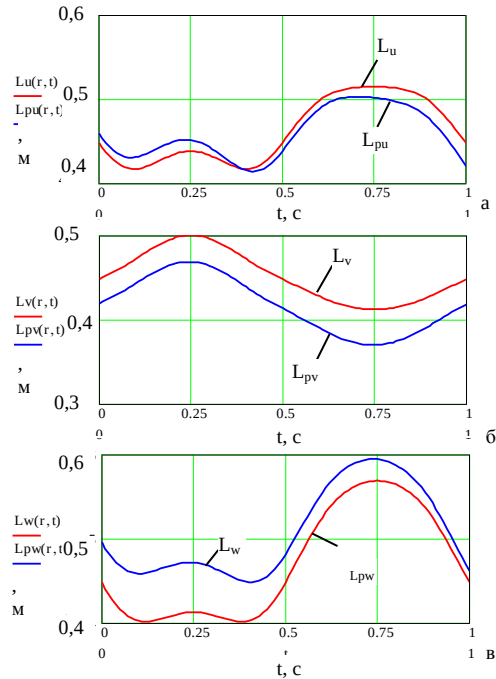


Рис. 14.33. Залежність довжини штанг та відстані опори штанги від полюса, від часу при гармонічних поперечно-кутових переміщеннях робочого органа механізму і гармонічних переміщеннях полюса: а – для точки и, б – для точки v, в – для точки w

Робочий простір механізму-трипода визначено як теоретичними так і експериментальними методами. Визначення робочого простору проведено

наступним чином. Задавались поточні положення платформи механізма-трипода із врахуванням обмежень на довжини штанг. Крайні положення платформи фіксувались у вигляді просторової поверхні. Поверхня, що обмежує робочий простір задавалась своїми перетинами. В результаті вимірів встановлені форма і геометричні розміри перетину в площині  $oxz$  поверхні, яка обмежує робочий простір механізму (рис. 14.34а).

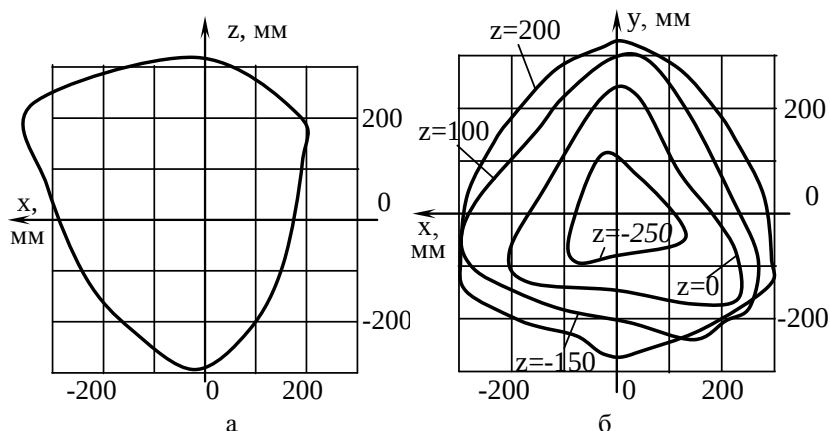


Рис. 14.34. Перетин робочого простору механізму - трипода в площині  $Oxz$  (а) та горизонтальні перетини ( $z=const$ ) поверхні, що обмежує робочий простір (б)

Визначені також перетини робочого простору набором паралельних горизонтальних площин (диврис. 14.34 б).

Загалом робочий простір механізму має пірамідальну форму із трьома напрямками симетрії.

Швидкість переміщення кожної точки робочого органа механізму є суперпозицією швидкості поступального руху полюса і обертального руху робочого органа навколо полюса.

Проекції швидкості на осі нерухомої системи координат виражаються через кути Ейлера згідно формул:

$$\begin{aligned}\omega_{01}(t) &= -\sin(\alpha(t)) \cdot \frac{d}{dt} \beta(t) + \cos(\alpha(t)) \cdot \sin(\beta(t)) \cdot \frac{d}{dt} \gamma(t), \\ \omega_{02}(t) &= \cos(\alpha(t)) \cdot \frac{d}{dt} \beta(t) + \sin(\alpha(t)) \cdot \sin(\beta(t)) \cdot \frac{d}{dt} \gamma(t), \\ \omega_{03}(t) &= \frac{d}{dt} \alpha(t) + \cos(\beta(t)) \cdot \frac{d}{dt} \gamma(t), \\ \omega_0(t) &= \begin{pmatrix} \omega_{01}(t) \\ \omega_{02}(t) \\ \omega_{03}(t) \end{pmatrix},\end{aligned}$$

де  $\omega_{01}, \omega_{02}, \omega_{03}$  - проекції кутової швидкості на осі нерухомої системи координат;  $\omega_0$  - вектор кутової швидкості робочого органа верстата, визначений своїми трьома проекціями в нерухомій системі координат;  $\alpha, \beta, \gamma$  - кути Ейлера, розглянуті раніше.

Розрахунок проекцій кутової швидкості в залежності від часу для гармонічних законів зміни кутів Ейлера  $\alpha$  і  $\beta$  ( $\gamma = 0$ ) наведено на рис. 14.35.

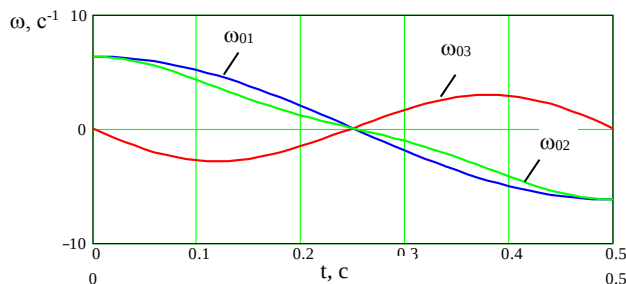


Рис. 14.35. Закон зміни проекцій кутової швидкості робочого органа механізму - трипода в нерухомій системі координат при гармонічних змінах кутів Ейлера

Проекції кутової швидкості в рухомій системі координат жорстко зв'язані з робочим органом верстата виражаються через кути Ейлера  $\alpha, \beta, \gamma$  згідно залежностей

$$\omega_{e1}(t) = -\sin(\beta(t)) \cdot \cos(\gamma(t)) \frac{d}{dt} \alpha(t) + \sin(\gamma(t)) \cdot \frac{d}{dt} \beta(t),$$

$$\omega_{e2}(t) = \sin(\beta(t)) \cdot \sin(\gamma(t)) \cdot \frac{d}{dt} \gamma(t) + \cos(\gamma(t)) \cdot \frac{d}{dt} \beta(t),$$

$$\omega_{e3}(t) = \cos(\beta(t)) \cdot \frac{d}{dt} \alpha(t) + \frac{d}{dt} \gamma(t).$$

Розрахункові значення проекцій швидкості платформи в рухомій системі координат подані на рис. 14.36.

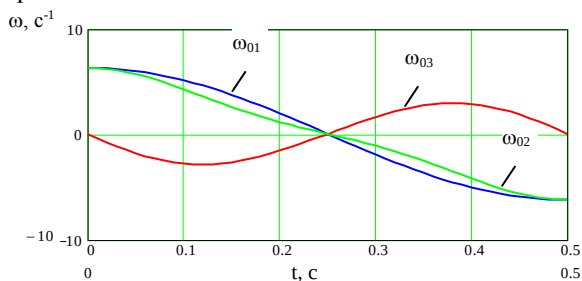


Рис. 14.36. Зміни проекцій кутової швидкості в часі в рухомій системі координат при гармонічних змінах кутів Ейлера  $\alpha$  і  $\beta$

Аналогічні формули і розрахункові залежності мають місце при використанні кутів Ейлера  $\psi, \Theta, \varphi$ . Зокрема проєкції швидкості в рухомій системі координат визначені залежностями:

$$\begin{aligned}\omega_1(t) &= \cos(\Theta(t)) \cdot \cos(\psi(t)) \cdot \frac{d}{dt} \Phi(t) + \sin(\psi(t)) \cdot \frac{d}{dt} \Theta(t), \\ \omega_2(t) &= -\cos(\Theta(t)) \cdot \sin(\psi(t)) \cdot \frac{d}{dt} \Phi(t) + \cos(\psi(t)) \cdot \frac{d}{dt} \Theta(t), \\ \omega_3(t) &= \sin(\Theta(t)) \cdot \frac{d}{dt} \Phi(t) + \frac{d}{dt} \psi(t).\end{aligned}$$

Розрахункові значення проєкцій кутової швидкості при гармонічних змінах кутів  $\psi$  і  $\Theta$  наведено на рис. 14.37.

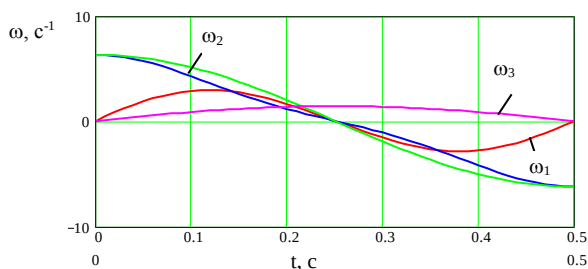


Рис. 14.37. Закон зміни проєкцій кутової швидкості робочого органа верстата в рухомій системі координат при гармонічній зміні кутів Ейлера  $\psi$  і  $\Theta$

Лінійна швидкість обертального руху  $\vec{v}_{MO}$  деякої точки  $M$  робочого органу механізму пов'язана із кутовою швидкістю обертання робочого органа навколо полюса згідно векторної рівності:

$$\vec{v}_{MO} = \vec{\omega} \times \vec{R}_M,$$

де  $\vec{\omega}$  - вектор кутової швидкості;  $\vec{R}_M$  - радіус вектор, що визначає положення точки  $M$  в просторі.

Швидкість просторового руху точки  $M$  складається із швидкості руху полюса  $\vec{v}_p$  та швидкості обертального руху  $\vec{v}_{MO}$ . Відповідно значення швидкості:

$$\vec{v}_M = \vec{v}_p + \vec{\omega} \times \vec{R}_M$$

Вектор швидкості руху полюса знаходиться шляхом диференціювання вектора переміщень полюса. В проєкціях на осі нерухомої системи координат маємо:

$$\begin{aligned}var1(t) &= \frac{d}{dt} p1(t), var2(t) = \frac{d}{dt} p2(t), var3(t) = \frac{d}{dt} p3(t), var(r, t) = \begin{pmatrix} var1(t) \\ var2(t) \\ var3(t) \end{pmatrix}\end{aligned}$$

де  $var = v_p$  - вектор швидкості переміщення полюса;  $p_1, p_2, p_3$  - проекції переміщень полюса, які визначені в залежності від часу  $t$ .

Розрахункові значення проекцій швидкості полюса при гармонічному законі переміщення наведено на рис. 14.38.

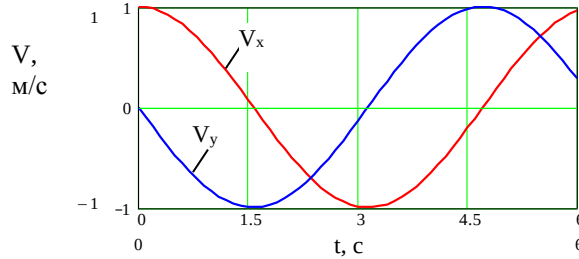


Рис. 14.38. Розрахункові значення швидкості полюса робочого органа механізма-трипода при переміщенні робочого органу по гармонічному закону

Розраховані значення швидкості полюса та кутової швидкості робочого органа є основою для знаходження абсолютних швидкостей точок робочого органа. Швидкості визначені залежністю

$$va(r, t) := var(r, t) + \omega(t) \times u(r, t).$$

Розрахунок вектора швидкості точки  $u$  в проекціях на нерухому систему координат наведено на рис. 14.39.

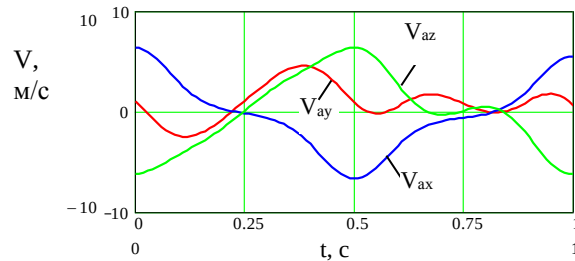


Рис. 14.39. Розрахункові значення абсолютної швидкості точки  $u$  робочого органу при гармонічних законах зміни кутів Ейлера  $\alpha, \beta, \gamma$  і гармонічному законі руху полюса

Знайдений вектор кутової швидкості є основою для визначення вектора кутового пришвидження робочого органа механізму.

Вектор кутового пришвидження  $\vec{\varepsilon}$  визначено диференціюванням

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

По величині і напрямку вектор кутового пришвидження співпадає із швидкістю руху кінця вектора  $\vec{\omega}$  кутової швидкості по його годографу.

Нижче наведено (рис. 14.40) розрахунок компонент вектора кутового пришвидшення для випадку гармонічного закону зміни кутів Ейлера  $\alpha, \beta, \gamma$ .

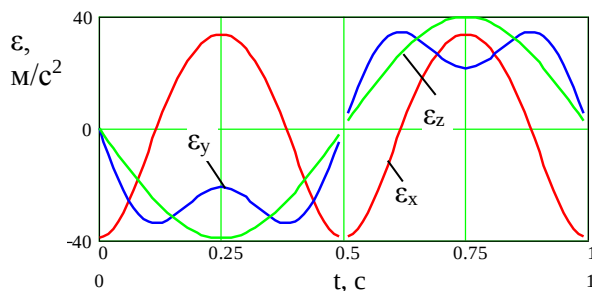


Рис. 14.40. Розрахункові значення складових вектора кутового пришвидшення робочого органа механізму при гармонічних законах зміни кутів Ейлера  $\alpha, \beta, \gamma$

Пришвидження деякої точки М робочого органа при його обертанні навколо полюса визначиться як похідна вектора швидкості:

$$\vec{a}_R = \frac{d\vec{v}_M}{dt} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R}_M + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{R}_M}{dt}.$$

Враховуючи, що:  $\frac{d\vec{R}_M}{dt} = \vec{v}_M = \vec{\omega} \times \vec{R}_M$ , одержимо:  $\vec{a}_R = \vec{\varepsilon} \times \vec{R}_M + \vec{\omega} \times (\vec{\varepsilon} \times \vec{R}_M)$ .

Використовуючи відомі правила векторного числення одержимо

$$\vec{a}_R = \vec{\varepsilon} \times \vec{R}_M + \vec{\omega} \times (\vec{\varepsilon} \times \vec{R}_M) - \omega^2 \vec{R}_M.$$

Дана векторна залежність дозволяє обчислити пришвидження довільної точки робочого органа:

$$ar(r, t) := \varepsilon(t) \times u(r, t) + \omega(t) \cdot (\omega(t) \cdot u(r, t)) - \omega(t)^2 \cdot u(r, t).$$

Розрахункові значення пришвидження точки и при гармонічних законах зміни кутів Ейлера наведені на рис. 14.41.:

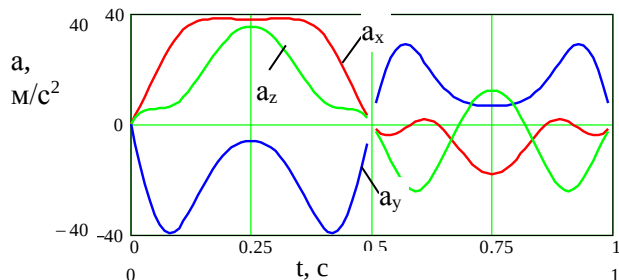


Рис. 14.41. Розрахункові значення пришвидження точки и робочого органа механізму-трипода при повороті робочого органа для випадку, коли кути Ейлера  $\alpha, \beta, \gamma$  змінюються по гармонічному закону

Пришвидшення довільної точки М робочого органа являє собою векторну суму пришвидшення полюса і пришвидшення точки при її обертанні навколо полюса  $\vec{a}_R$

$$\vec{a} = \vec{a}_p + \vec{a}_R$$

Проекції пришвидшення полюса знаходяться шляхом диференціювання відповідних проекцій швидкості полюса згідно залежностей

$$ap1(t) = \frac{d}{dt} vap1(t), ap2(t) = \frac{d}{dt} vap2(t), ap3(t) = \frac{d}{dt} vap3(t), ap(r, t) = \begin{pmatrix} ap1(t) \\ ap2(t) \\ ap3(t) \end{pmatrix}$$

Обчислені значення проекцій пришвидшення полюса при гармонічному законі його переміщення наведено на рис. 14.42.

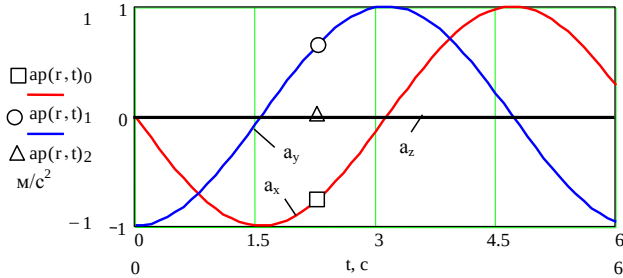


Рис. 14.42. Розрахункові значення проекцій пришвидшення полюса робочого органа при гармонічному законі його переміщення

На основі одержаних значень складових пришвидшення знайдемо пришвидження кожної точки робочого органа механізму, зокрема проекції пришвидження точки и (рис. 14.43).

$$a(r, t) := ap(r, t) + a(r, t)$$

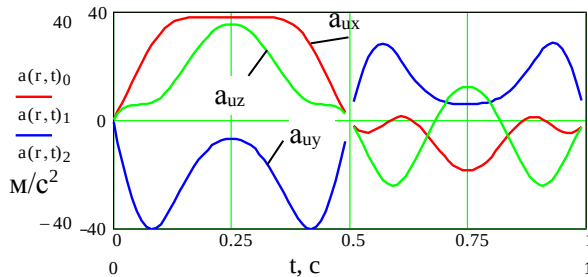


Рис. 14.43. Розрахункові значення пришвидження точки и робочого органа при гармонічних законах зміни кутів Ейлера  $\alpha, \beta, \gamma$  та гармонічному закону переміщення полюса

### 14.3. Кінематика маніпулятора-гексапода наземного роботизованого комплексу

Розроблено алгоритм і програмне забезпечення використано для дослідження різних просторових механізмів з паралельними кінематичними структурами. Одним з найбільш поширених і перспективних є механізм, що має 6 – L координат, які реалізовані у вигляді штанг змінної довжини з'єднаних по схемі платформи Стюарта. На базі даного механізму реалізовані прогресивні конструкції наземного роботизованого комплексу [80].

Математичне моделювання проведено для різних схемних рішень механізму. Характерним є механізм із суміщеними шарнірними опорами.

В даному механізмі наявні три шарнірних з'єднання на робочому органі (точки u, v, w) та три на опорній площадці U, V, W (рис. 14.44)

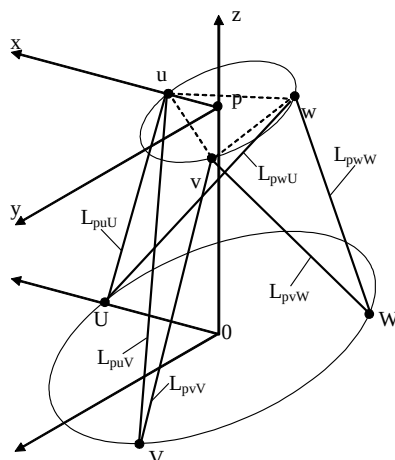


Рис.14.44. Кінематична схема гексапода (платформа Стюарта) подана в початковому положенні у вибраній системі координат

Моделювання кінематики маніпулятора гексапода здійснено в межах робочого простору.

Робочий простір механізму, що має шість ступенів вільності являє собою гіперповерхню в просторі шести вимірів [147]. Вона визначена умовою максимум вектора  $x$  – координат

$$(x_i^m) = \max \left\{ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \psi \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} \right\}.$$



Шестивимірна гіперповерхня не може бути зображена графічно просторовим графіком. Тому звичайно для характеристики робочого простору використовують лише частину вектора x-координат. При цьому робочий простір визначається умовою

$$(x_i^0) = \max \left\{ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right\}$$

Відповідна поверхня дає графічне зображення робочого простору (рис. 14.45).

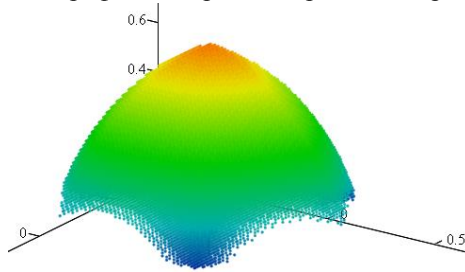


Рис. 14.45. Графічне зображення робочого простору механізму - гексапода

Поверхня в просторі трьох вимірів, що характеризує робочий простір в загальному випадку являє собою сферичний (сфероїдальний) шар (рис. 14.46).

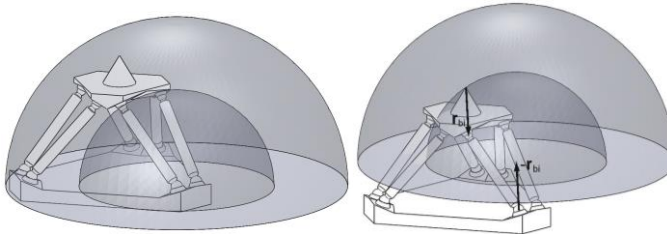


Рис. 14.46. Принцип формування робочого простору маніпулятора гексапода

Формування робочого простору у вигляді сфероїдального шару пов'язано із обмеженим діапазоном зміни довжини кожної штанги. Штанга не може бути меншою свого мінімального значення обумовленого конструкцією штанги. Зміна довжини кожної із штанг окремо змінюють конфігурацію та область розташування поверхні у вигляді сфероїдального шару (рис. 14.47).

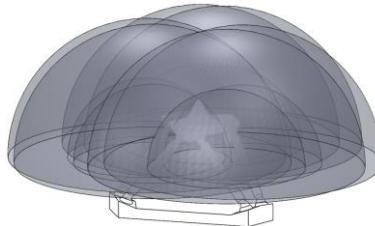


Рис. 14.47. Зміни положення поверхні, що визначає робочий простір маніпулятора при змінах довжини кожної штанги окремо

Форма робочого простору суттєво залежить від геометричних обмежень на поперечно-кутове положення штанг маніпулятора. Шарніри штанг допускають лише обмежені поперечно кутові переміщення штанг відносно початкового положення. Діапазони можливого поперечно-кутового переміщення шарнірів штанг знаходяться в межах кінчних поверхонь, які не обов'язково є круговими. Таким чином штанга маніпулятора може зміщуватись відносно платформи та нерухомої основи в межах конусів  $K_1$  та  $K_2$  (рис.14.48).

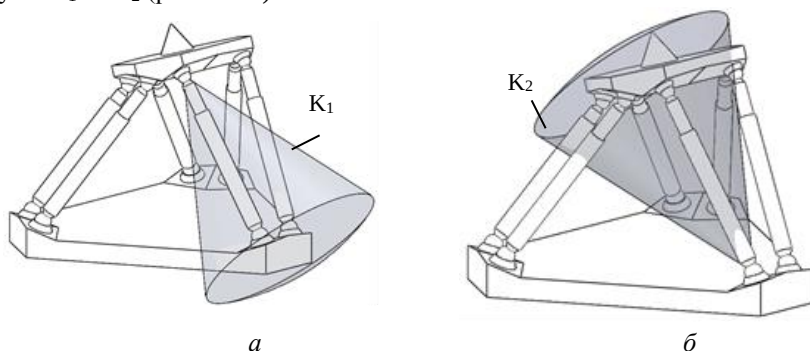


Рис. 14.48. Обмеження поперечно-кутового положення штанги діапазоном робочих кутів верхнього (а) та нижнього (б) шарнірів штанг

В реальній конструкції маніпулятора допустимі кути повороту нижніх шарнірних опор відносно нерухомої основи накладають обмеження на переміщення центра платформи. Якщо нижня опора штанги являє собою сферичний шарнір переміщення центра платформи обмежується кінчною поверхнею (рис. 14.49 а).

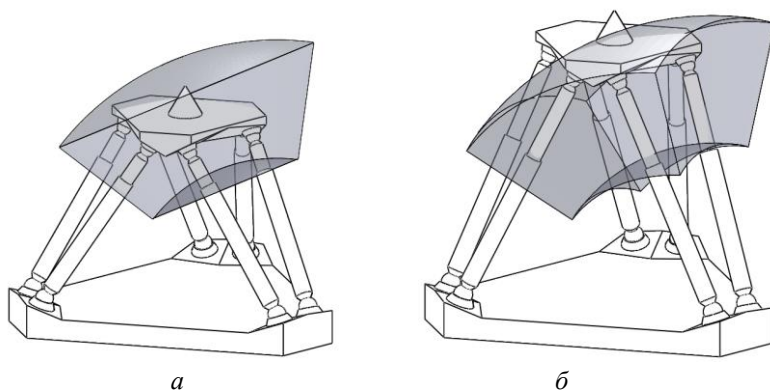


Рис. 14.49. Область зміни положення центра платформи у випадку наявності сферичних шарнірів на нижніх кінцях штанг (а) та карданих шарнірів (б)

Якщо в якості нижніх шарнірів застосовані карданні пристрої то переміщення центра платформи обмежено поверхнею пірамідального виду (див. рис. 14.49 б).

При врахуванні обмежень на поперечно-кутові переміщення як верхнього так і нижнього шарнірів область розташування центра платформи буде результатом перетину конічних поверхонь (рис. 14.50).

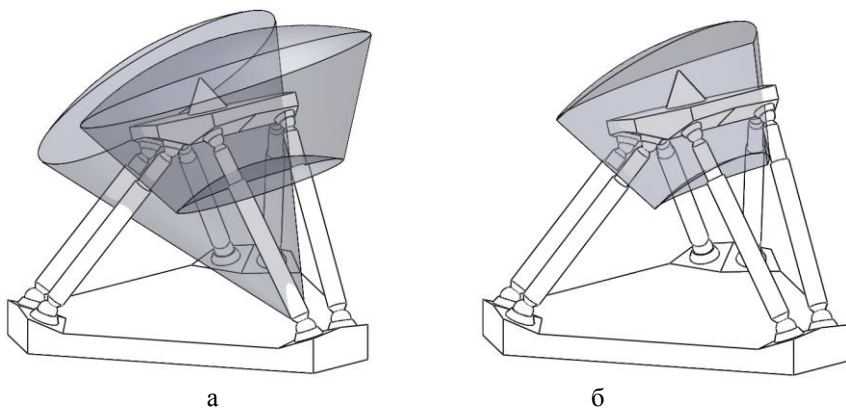


Рис. 14.50. Побудова робочого простору маніпулятора з урахуванням обмежень на поперечно-кутові переміщення верхнього і нижнього шарнірів: а – області визначені окремо для верхнього і нижнього шарнірів однієї із штанг; б – результуюча область при врахуванні взаємних обмежень

При врахуванні обмежень поперечно-кутових переміщень всіх шести штанг область переміщення центра платформи набуває вигляду компактної опуклої поверхні (рис. 14.51).

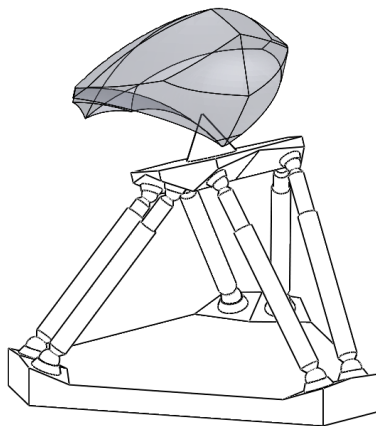


Рис. 14.51. Область розташування центра платформи яка враховує обмеження на кути повороту верхніх і нижніх шарнірів всіх шести штанг

Для встановлення робочого простору маніпулятора – гексапода, що враховує поперечно-кутові відхилення платформи маємо криволінійну область опуклої форми [13] (рис. 14.52 а).

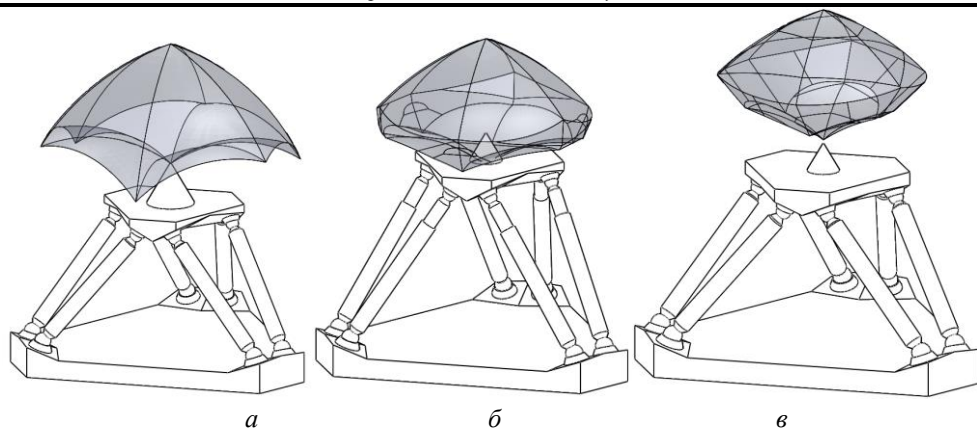


Рис. 14.52. Визначення робочого простору послідовним введенням обмежень: а – простір, що враховує поперечно-кутові відхилення платформи; б – врахування додаткових обмежень в шарнірах; в – врахування обмежень на зміни довжин штанг

Врахування додаткових обмежень в шарнірах та обмежень у вигляді зміни довжини штанг звужує робочий простір (рис. 14.52 в). Таким чином робочий простір маніпулятора-гексапода визначено у вигляді опуклої поверхні складної конфігурації. Для практичного застосування робочий простір механізму-гексапода описано набором його перетинів (рис. 14.53).

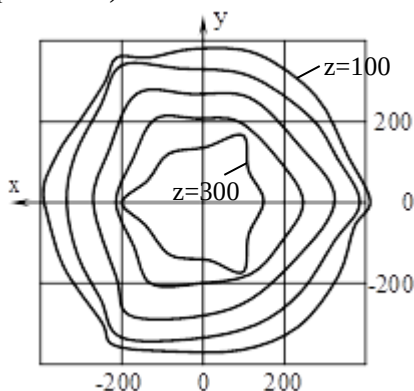


Рис. 14.53. Розрахунковий обочий простір механізму - гексапода, визначений своїми перетинами

Математичне моделювання послужило основою для аналізу кінематики механізму - гексапода при різних траєкторіях руху робочого органу. Зокрема розрахунки здійснено для спеціального закону руху робочого органу механізму, який відповідає плоско-паралельному переміщенню в площині  $Oxy$ . При цьому (полюс) робочого органу переміщення по колу відносно початку нерухомої системи координат [76].

Даний рух робочого органу механізму відповідає руху осі робочого органу  $z'$  по циліндричній поверхні (рис. 14.54).

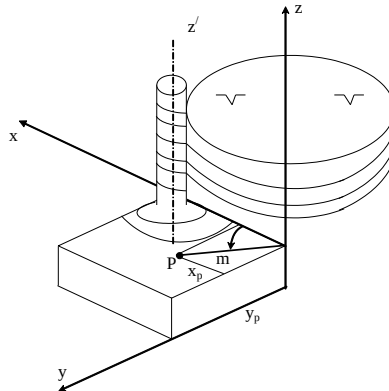


Рис.14.54. Утворення циліндричної поверхні, яка відповідає плоско-паралельному руху осі робочого органу маніпулятора у площині перпендикулярній осі

Відповідно наведеній схемі руху робочого органу задані координати переміщення полюса і кути Ейлера. Для плоско паралельного руху кути Ейлера є постійними, а переміщення полюса задано у вигляді функції часу. Прийнято синусоїдальний закон зміни координат полюса платформи маніпулятора - гексапода у вигляді:

$$x_p = m_p \cos t \quad y_p = m_p \sin t$$

де  $m_p$  – амплітудне значення зміни координат полюса

Закон зміни координат і пришвидшення полюса одержані розрахунком відповідають синусоїдальним функціям (рис.14.55).

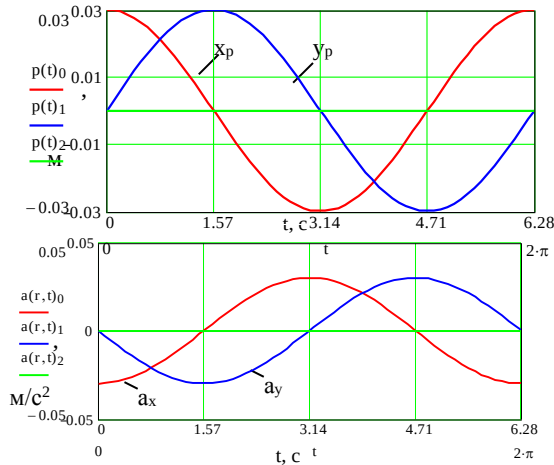


Рис.14.55. Розрахункові значення переміщення (а) та пришвидшень (б) точок робочого органу маніпулятора - гексапода при його плоско-паралельному русі у власній площині по кільцевій траєкторії

Відповідно заданому закону переміщення робочого органу знайдено зміну в часі довжини штанг (L координаті) (рис. 14.56).

Додаткові розрахунки здійснено для переміщення осі платформи по різноманітним циліндричним поверхням які відрізняються від циліндра.

В загальному випадку контур руху осі платформи по циліндричній траєкторії описується залежністю в полярних координатах:  $\rho = R_p(\Phi)$ ,

де  $\rho$  – полярний радіус,  $\Phi$  – полярний кут.

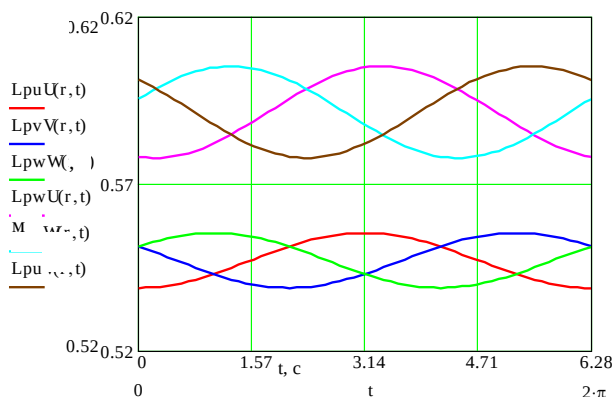


Рис.14.56. Зміна в часі довжини штанг маніпулятора - гексапода при плоско-паралельному переміщенні робочого органу у власній площині

Для даної циліндричної поверхні утворюючий рух являє собою переміщення полюса робочого органу механізму в проекціях на осі координат:

$$\begin{aligned} x &= R_p(\Phi) \cos \Phi, \\ y &= R_p(\Phi) \sin \Phi, \end{aligned}$$

де  $R(\Phi)$  – поточний радіус циліндричної поверхні;  $x, y$  – координати полюса.

Залежність радіуса  $R_p(\Phi)$  від полярного кута як періодична функція допускає розклад в ряд Фур'є виду:

$$amp := \frac{af_0}{2} + \sum_{k=1}^N (af_k \cdot \cos(k \cdot \Phi) + bf_k \cdot \sin(k \cdot \Phi)),$$

де  $af_k, bf_k$  – коефіцієнти ряду;  $N$  – число складових ряду.

Якщо контур задано рівнянням:

$$R_p = R_p(\Phi),$$

то коефіцієнти ряду знаходяться шляхом інтегрування згідно формул:

$$T := 2 \cdot \pi,$$

$$af_0 := \frac{2 \cdot \int_0^T R_p(\Phi) \cdot \cos\left(0 \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot \Phi}{T}\right) d\Phi}{T},$$

$$af_k := \frac{2 \cdot \int_0^T R_p(\Phi) \cdot \cos\left(k \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot \Phi}{T}\right) d\Phi}{T},$$

$$bf_k := \frac{2 \cdot \int_0^T R_p(\Phi) \cdot \cos\left(k \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot \Phi}{T}\right) d\Phi}{T}.$$

Як приклад розглянуто рух робочого органа маніпулятора - гексапода по контуру з плавним виступом (рис. 14.57).

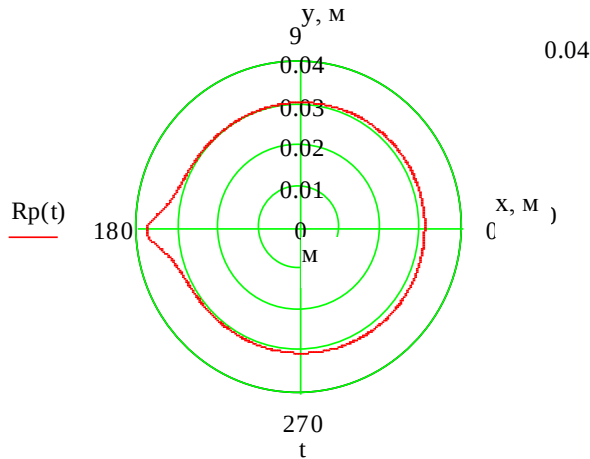


Рис. 14.57. Форма траєкторії руху осі платформи, яка відповідає контуру з плавним виступом

Прийнято в якості характерного прикладу, що даний контур описується рівнянням в полярній системі координат:

$$R_p(\Phi) := 0.03 + \frac{0.008}{1 + (10 - \Phi^2)^2}.$$

Розрахунки зміни кінематичних параметрів маніпулятора - гексапода здійснено для рівномірної зміни полярного кута по закону:

$$\Phi = \omega_\Phi t,$$

де  $\omega_\Phi$  - постійна кутова швидкість.

Шляхом інтегрування для даного контуру знайдені коефіцієнти ряду Фур'є (рис.14.58).

|    |    |                        |    |    |                        |
|----|----|------------------------|----|----|------------------------|
|    |    | 0                      |    |    | 0                      |
|    | 0  | 0                      |    | 0  | 0                      |
|    | 1  | $-1.078 \cdot 10^{-3}$ |    | 1  | $5.492 \cdot 10^{-5}$  |
|    | 2  | $9.196 \cdot 10^{-4}$  |    | 2  | $-8.298 \cdot 10^{-6}$ |
|    | 3  | $-7.857 \cdot 10^{-4}$ |    | 3  | $1.511 \cdot 10^{-5}$  |
|    | 4  | $6.699 \cdot 10^{-4}$  |    | 4  | $3.811 \cdot 10^{-5}$  |
|    | 5  | $-5.714 \cdot 10^{-4}$ |    | 5  | $-3.756 \cdot 10^{-5}$ |
|    | 6  | $4.868 \cdot 10^{-4}$  |    | 6  | $5.152 \cdot 10^{-5}$  |
|    | 7  | $-4.146 \cdot 10^{-4}$ |    | 7  | $3.218 \cdot 10^{-6}$  |
| fa | 8  | $3.528 \cdot 10^{-4}$  | fb | 8  | $5.508 \cdot 10^{-5}$  |
|    | 9  | $-3.001 \cdot 10^{-4}$ |    | 9  | $-4.961 \cdot 10^{-5}$ |
|    | 10 | $2.551 \cdot 10^{-4}$  |    | 10 | $5.296 \cdot 10^{-5}$  |
|    | 11 | $-2.167 \cdot 10^{-4}$ |    | 11 | $-4.668 \cdot 10^{-5}$ |
|    | 12 | $1.841 \cdot 10^{-4}$  |    | 12 | $4.796 \cdot 10^{-5}$  |
|    | 13 | $-1.561 \cdot 10^{-4}$ |    | 13 | $-2.422 \cdot 10^{-5}$ |
|    | 14 | $1.323 \cdot 10^{-4}$  |    | 14 | $-1.24 \cdot 10^{-6}$  |
|    | 15 | $-1.121 \cdot 10^{-4}$ |    | 15 | $-3.562 \cdot 10^{-5}$ |

Рис. 14.58. Розрахункові коефіцієнти ряду Фур'є, які відповідають контуру з плавним виступом

В результаті розрахунків одержано значення переміщення кожної точки робочого органа маніпулятора гексапода. Зокрема визначені проекції переміщення полюса платформи (рис.14.59).

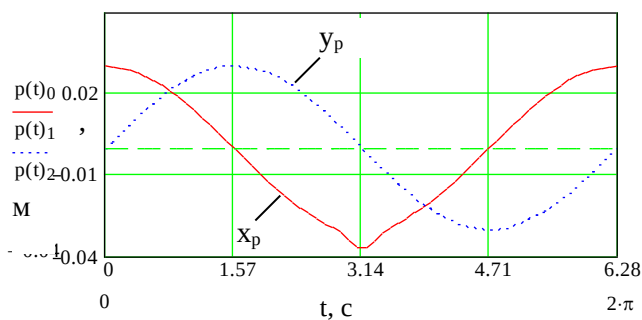


Рис. 14.59. Проекції переміщення кожної з точок робочого органа механізму при русі осі платформи по циліндричній поверхні з плавним виступом

Закон переміщення робочого органа має особливість відповідну виступу на траєкторії.



Відповідні даним переміщенням проекції швидкостей окремих точок робочого органу мають характерний вигляд (рис. 14.60).

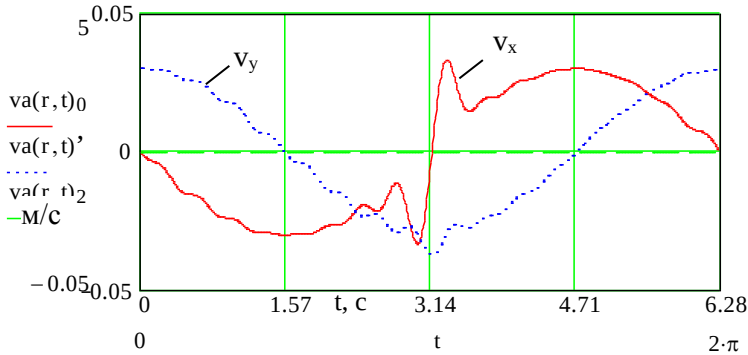


Рис. 14.60. Розрахункові значення проекцій швидкості характерної точки робочого органу маніпулятора - гексапода при русі осі його платформи по циліндричній поверхні з плавним виступом

Наявність синусоїдальних пульсацій швидкості  $v_x$  обумовлена врахуванням обмеженого числа складових ряду Фур'є в описі траєкторії руху полюса.

Відповідні прийнятому закону зміни положення робочого органу механізму розрахункові значення довжини штанг механізму - гексапода наведені на рис.14.61.

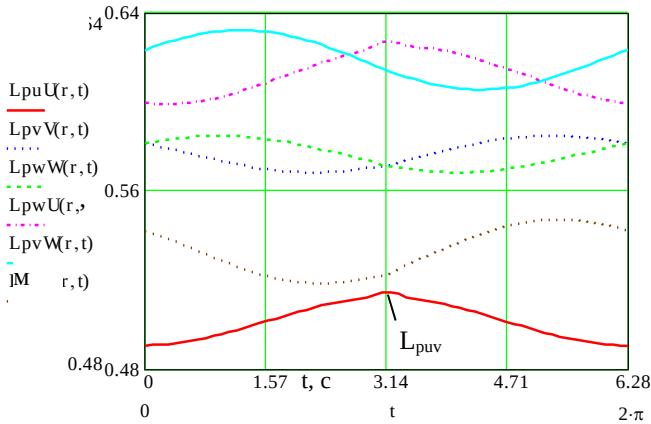


Рис. 14.61. Зміна довжини штанг маніпулятора - гексапода при русі осі платформи по циліндричній поверхні з плавним виступом

В цілому залежності зміни довжини штанг в часі являють собою плавні криві. На ділянці траєкторії де наявний виступ контура (при  $t=3.3, 2c$ ) спостерігаються відхилення законів зміни довжини штанг від плавних кривих.

Для дослідження закономірностей нелінійних змін кінематичних параметрів маніпулятора - гексапода розглянуто рух полюса платформи по циліндричній поверхні з гострим виступом (рис. 14.62).

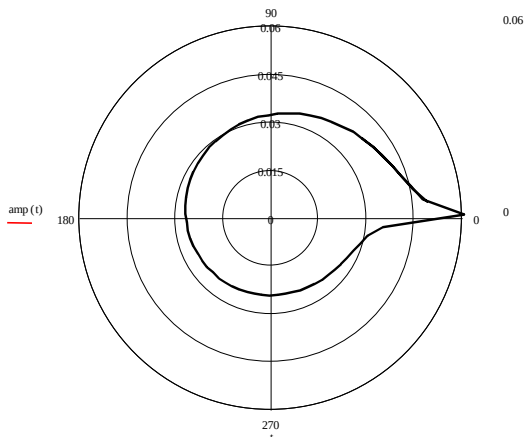


Рис. 14.62. Траєкторія переміщення осі платформи відповідна плоскій кривій із гострим виступом

Для опису траєкторії з виступом залежність поточного радіуса від кута прийнята у вигляді відрізка ряду Фур'є наступного виду:

$$R(\phi) = r_0 + \sum_{k=1}^N \frac{\delta_1}{k} \cos k\phi + \frac{\delta_2}{k} \sin k\phi,$$

де  $r_0$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – константи.

Розраховано значення кінематичних параметрів при русі полюса платформи по циліндричній поверхні з гострим виступом. Зміна в часі довжини штанг одержана розрахунком наведена на рис. 14.63.

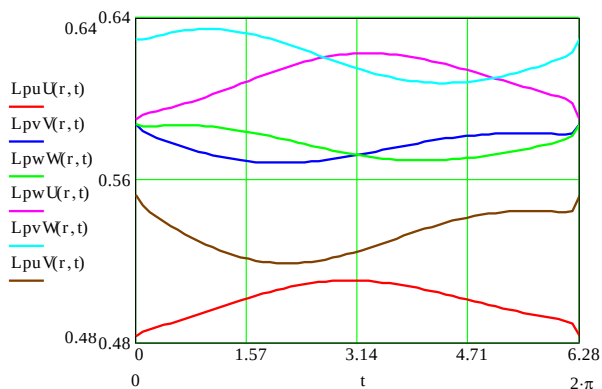


Рис.14.63. Зміна довжини штанги при русі осі платформи по циліндричній поверхні з гострим виступом

Із аналізу графіків випливає, що на ділянках, які відповідають виступу ( $t=0$ ;  $2\pi$ ), має місце різка зміна довжина штанг. Залежності зміни довжин штанг від часу при цьому є суттєво нелінійними і мають особливість типу різкого піка (викиду).

Аналогічні закономірності простежуються і на законі руху полюса платформи. Проекції переміщення полюса на ділянці, що відповідає виступу, мають особливості типу різкого піка (рис.14.64).

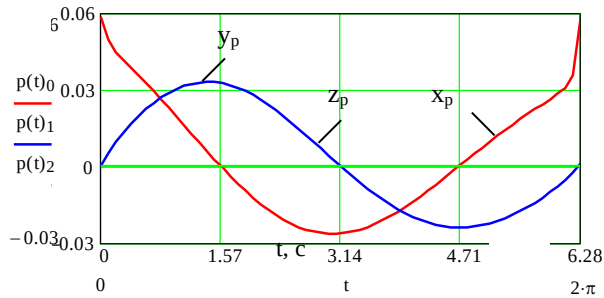


Рис. 14.64. Зміна координат полюса маніпулятора - гексапода при русі осі платформи по циліндричній поверхні з гострим виступом

Особливості траєкторії в точці, що відповідає виступу приводять до суттєвих змін кінематичних і динамічних характеристик маніпулятора - гексапода.

Зокрема, спостерігаються високочастотні зміни (пульсації) швидкості окремих точок платформи маніпулятора - гексапода (рис. 14.65).

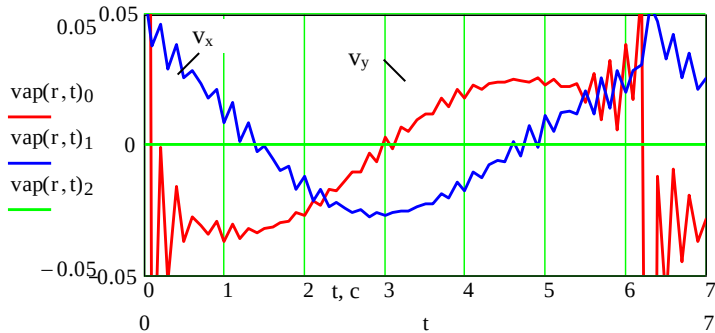


Рис. 14.65. Пульсації швидкості точок робочого органа механізму обумовлені обходом гострого виступу циліндричної поверхні

Пульсації швидкості по амплітуді відповідають максимальній швидкості робочого органа. Частота пульсацій має порядок 2..5% періоду переміщення платформи по циліндричній поверхні.

Високочастотні пульсації швидкості обумовлюють інтенсивні зміни пришвидшень окремих точок робочого органа механізму (рис. 14.66).

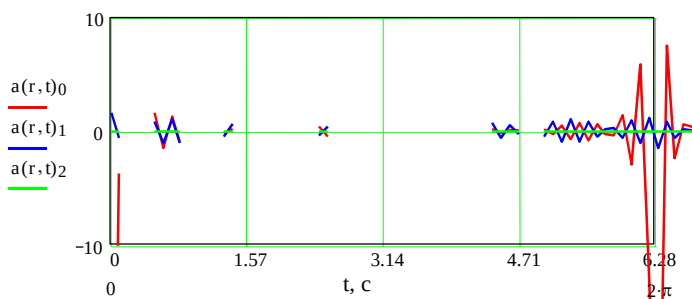


Рис. 14.66. Зміни пришвидшення окремих точок робочого органа механізму обумовлені наявністю гострого виступу на траєкторії руху робочого органа

Із наведених результатів дослідження випливає, що наявність різких змін траєкторії приводить до інтенсивних коливань робочого органу. Коли на траєкторії переміщення платформи наявні гострі виступи або впадини, то розрахункові значення кінематичних параметрів включають в себе особливості типу інтенсивних коливальних параметрів.

Дані явища підтверджені широким колом проведених експериментальних досліджень.

#### 14.4. Визначення параметрів кінематичної точності маніпуляторів з паралельними кінематичними зв'язками

Похибки кінематики які пов'язані із змінами геометрії маніпуляторів та особливостями їх руху визначають кінематичну точність маніпулятора в цілому. Кінематична точність визначається як теоретичними так і експериментальними методами. Методика математичного моделювання параметрів кінематичної точності викладена нижче.

Визначення параметрів кінематичної точності маніпулятора - гексапода здійснено на основі розв'язку прямої задачі кінематики.

Положення точки робочого органа маніпулятора визначено у вигляді вектора, що має шість компонент. Три із них являють собою координати полюса, а три – кутові величини (набір кутів Ейлера). Відповідно положення деякої точки у платформи маніпулятора характеризується вектором визначеним в просторі 6-ти вимірів:

$$(x_i)_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad \text{або} \quad (x_i)_2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \psi \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix}.$$

Вектори  $(x_i)$  та  $x_i$  визначені в просторі 6-ти вимірів. Їх застосування має певну незручність, викликану різномірністю компонент векторів. Тому доцільно використати модифіковані вектори, які відрізняються від наведених переводом кутових величин в лінійні, тоді вектори параметрів, що визначають положення кожної точки робочого органа маніпулятора запишуться у вигляді:

$$(x_i)_3 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ m_\alpha \alpha \\ m_\beta \beta \\ m_\gamma \gamma \end{bmatrix} \quad \text{або} \quad (x_i)_4 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ m_\psi \psi \\ m_\theta \theta \\ m_\phi \phi \end{bmatrix}.$$

де  $m_\alpha, m_\beta, m_\gamma, m_\psi, m_\theta, m_\phi$  - відповідно вибрані масштабні множники, що мають розмірність координат.

В загальному випадку вектор, що визначає положення точки робочого органа, запишеться у вигляді:

$$x_i = [x_i], \quad i = 1, 2, \dots, 6.$$

де  $X_i$  - відповідна компонента вектора.

Згідно зворотної задачі кінематики компоненти вектора є вхідними параметрами системи. Вони визначені у вигляді незалежних функцій часу  $t$ :

$$X_i = x_i(t).$$

В результаті розв'язку зворотної задачі кінематики знайдено в числовому вигляді набір  $L$ -координат, що відповідають вектору вхідних параметрів.

При цьому вектор вхідних параметрів визначено своїми компонентами, які є деякими функціями часу. Прийнято, що координати полюса

$$x = p1, \quad y = p2, \quad z = p3$$

змінюються згідно закону:

$$\begin{aligned} amp(t) &:= 0.01 + 0.02 \cdot \frac{t}{2\pi} \\ p1(t) &:= amp(t) \cdot \cos(t) \\ p2(t) &:= amp(t) \cdot \sin(t) \\ p3(t) &:= 0.01 + 0.01 \cdot \frac{t^2}{4\pi^2} \end{aligned}$$

Закони зміни кутів Ейлера прийнято гармонічними у вигляді:

$$\alpha(t) := \sin\left(\frac{t}{2\pi}\right), \quad \beta(t) := 1.5 \cdot \sin\left(\frac{1.2 \cdot t}{2 \cdot \pi}\right), \quad \gamma(t) := 2 \cdot \sin\left(\frac{1.4 \cdot t}{2 \cdot \pi}\right).$$

Сформовано вектор вхідних параметрів який подано у вигляді наступних однорідних компонент:

$$Xe(t) := \begin{pmatrix} p1(t) \\ p2(t) \\ p3(t) \\ 0.05 \cdot \alpha(t) \\ 0.05 \cdot \beta(t) \\ 0.05 \cdot \gamma(t) \end{pmatrix}.$$

Компоненти вектора є зростаючими функціями часу (рис. 14.67).

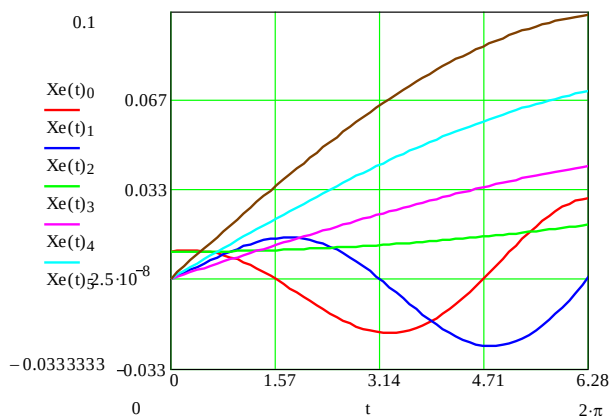


Рис. 14.67. Значення вхідних параметрів у функції часу, що відповідають прийнятому закону зміни кутів Ейлера і переміщення полюса платформи маніпулятора - гексапода

По заданим значенням  $x$  – координат знайдено вектор L-координат відповідний довжинам кожної із штанг маніпулятора - гексапода.

Одержаний в результаті розв'язку зворотної задачі вектор L-координат, що має розмірність 6, подано у вигляді:

$$L = (l_j), j = 1, 2, \dots, 6.$$

Компоненти вектора L-координат обчислені як функції часу:

$$L(r, t) := \begin{pmatrix} LpuU(r, t) \\ LpvV(r, t) \\ LpwW(r, t) \\ LpwU(r, t) \\ LpvW(r, t) \\ LpuV(r, t) \end{pmatrix}.$$

Результати обчислень подані у графічному вигляді (рис. 14.68).

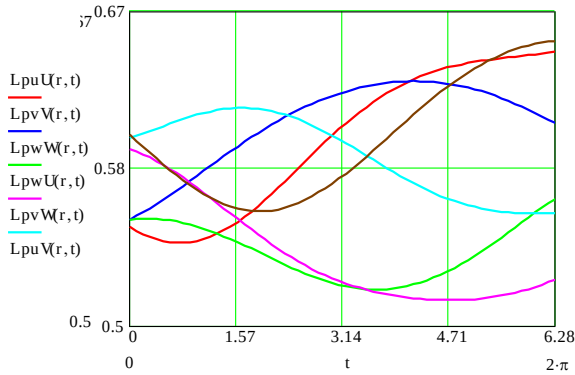


Рис. 14.68. Компоненти вектора L-координат обчислені згідно розробленої математичної моделі і подані у вигляді функцій часу

Зміни довжин штанг є плавно-змінними функціями часу, які відповідають синусоїдам змінної амплітуди.

Графічні залежності змін x-координат та змін L-координат наведені у графічному вигляді є основою для встановлення взаємного зв'язку невеликих змін (мікропереміщень) координат маніпулятора - гексапода. Шляхом математичного моделювання визначена матриця Якобі маніпулятора в різні моменти часу. Розглянемо методику знаходження матриці Якобі механізму в функції часу.

В загальному випадку Вектор L-координат є функціонально залежним від вектора вхідних параметрів в різні моменти часу. Дана залежність є нелінійною і в загальному випадку записується у вигляді:

$$L = F(X)$$

де  $F(X)$  - вектор, компоненти якого в загальному вигляді описують залежності L-координат від компонент вектора вхідних параметрів та часу:

$$F(X) = [l_j([x_i], t)], \quad j=1,2,..6$$

Визначимо взаємозв'язок між нескінченно малими змінами x - координат і L-координат. Кожна із компонент вектора L-координат являє собою функцію 6-ти змінних, що являють x - координати. По правилу диференціювання функції кількох змінних знайдемо:

$$[dl_j] = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial l_j}{\partial x_i} \cdot dx_i, \quad j=1,2,..6$$

де  $dl_j$  - диференціал j-ї L-координати.

Всі величини, які входять в дану залежність, є залежними від часу.

Запишемо дану рівність в матрично-векторному вигляді:

$$dL = M dX,$$

де матриця M своїми компонентами має частинні похідні відповідних залежностей:





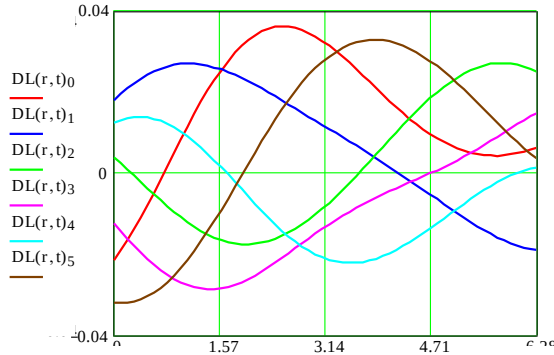


Рис. 14.69. Розрахункові значення частинних похідних компонент вектора  $L$ -координат

Проведено аналіз розрахункових значень частинних похідних компонент вектора  $L$ -координат. Із аналізу наведених графіків випливає, що похідні  $L$ -координат для даного випадку є гладкими неперервними обмеженими функціями. Тому випадки наявності нескінченних значень частинних похідних компонент вектора  $L$ -координат:

$$\frac{\partial L_i}{\partial t} = \infty \quad \text{виключаються.}$$

Аналогічно обчислені частинні похідні в часі компонент вектора вхідних параметрів ( $x$ -координат платформи). Для цього використана наступна обчислювальна процедура :

$$\begin{aligned} dXe1(t) &:= \frac{d}{dt} p1(t), \\ dXe2(t) &:= \frac{d}{dt} p2(t), \\ dXe3(t) &:= \frac{d}{dt} p3(t), \\ dXe4(t) &:= \frac{d}{dt} p4(t), \\ dXe5(t) &:= \frac{d}{dt} p5(t), \\ dXe6(t) &:= \frac{d}{dt} p6(t), \end{aligned}$$

Результати розрахунку частинних похідних  $x$ -координат показують, що всі частинні похідні є гладкими обмеженими функціональними залежностями. Основна

частина даних залежностей близька до синусоїдальних функцій, а інша частина близька до залежностей параболічного виду (рис. 14.70).

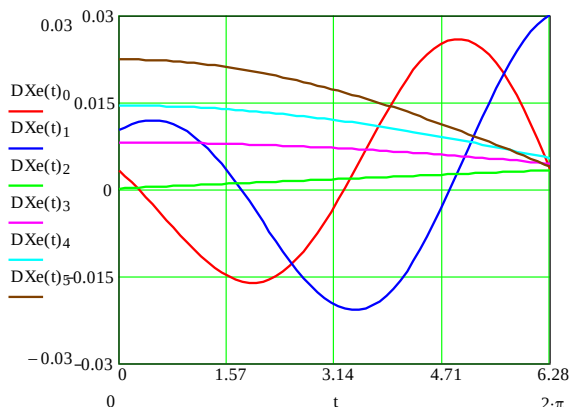


Рис. 14.70. Результати обчислення частинних похідних (швидкості зміни) компонент вектора вхідних параметрів (x-координат)

Із аналізу одержаних кривих випливає, що компоненти вектора частинних похідних вхідних параметрів  $\frac{\partial x_i}{\partial t}$  можуть набувати нульових значень. Відповідно обернені величини  $1/\frac{\partial x_i}{\partial t}$  в цих точках прямують до нескінченності. Результати обчислення величин обернених до значень частинних похідних x- координат включають області із розривами другого роду (рис. 14.71):

$$ZDXe(t) := \frac{1}{0.00000000001 + DXe(t)}$$

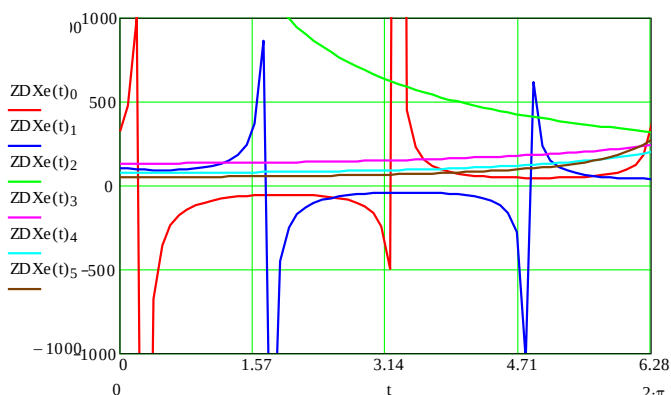


Рис. 14.71. Результати розрахунку обернених значень частинних похідних (швидкостей зміни) компонент вектора вхідних параметрів (x-координат)

На першому етапі аналізу обмежимося розглядом випадків відсутності нескінченних значень компонент матриці  $M$ . Це має місце для певних інтервалів часу зокрема в околиці точки  $t=2.8$ .

Для даного значення часу обчислено компоненти матриці  $M$ . Для цього використана наступна обчислювальна процедура:

$$\begin{aligned} tfix &:= 2.8 \\ j &:= 0..5 \\ i &:= 0..5 \\ M_{ji} &:= DL(r, tfix)_j \cdot ZDXe(tfix)_i \\ M &= \begin{pmatrix} -3.761 & -2.096 & 24.75 & 4.889 & 2.849 & 1.941 \\ -1.584 & -0.883 & 10.424 & 2.059 & 1.2 & 0.818 \\ 1.375 & 0.766 & -9.047 & -1.787 & -1.041 & -0.71 \\ 1.877 & 1.046 & -12.355 & -2.441 & -1.422 & -0.969 \\ 1.957 & 1.09 & -12.88 & -2.544 & -1.482 & -1.01 \\ -2.369 & -1.32 & 15.591 & 3.08 & 1.795 & 1.223 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Одержана матриця  $M$  є сингулярною. Її визначник дорівнює нулю, а ранг рівний одиниці:

$$\begin{aligned} rank(M) &= 1 \\ rows(M) &= 6 \\ |M| &= 6 \\ M_{1,4} &= 1.2 \end{aligned}$$

Це впливає із того, що всі параметри, які входять в математичну модель є функціями часу, тобто залежать лише від одного параметра  $t$ .

Складемо рівняння, що пов'язує диференціали  $x$  - координат із диференціалами  $L$ -координат використавши правило диференціювання функції кількох змінних.

Диференціал кожної  $x$  координати як функцію 6-ти змінних  $L$ -координат визначимо лінійною залежністю:

$$dx_i = \sum_{j=1}^6 \frac{\partial x_i}{\partial l_j} dl_j$$

Зазначимо, що :

$$\frac{\partial x_i}{\partial l_j} = \frac{\partial x_i}{\partial t} / \frac{\partial l_j}{\partial t} = \frac{1}{\frac{\partial l_j}{\partial t} / \frac{\partial x_i}{\partial t}} = \frac{1}{m_{ji}}$$

Тобто коефіцієнти залежності визначаються через компоненти матриці  $M$ , а саме є оберненими їм. при цьому:

$$dX = NdL$$

де  $N$  є матрицею компоненти якої є оберненими компонентам матриці  $M$  та над якою додатково здійснена операція транспонування.

Таким чином диференціали  $x$ -координати  $dx_i$  виражається через диференціали  $L$ -координат згідно наступних залежностей :

$$dx_i = \sum_{j=1}^6 n_{ji} dl_j, \quad \text{де } n_{ji} = \frac{1}{m_{ji}}.$$

Переходячи від диференціалів  $dx_i$  та  $dL_j$  до варіацій (кінцевих приростів) відповідних координат одержимо:

$$\delta x_i = \sum_{j=1}^6 n_{ji} \delta L_j.$$

Матриця  $N = (n_{ji})$  яка визначає матрицю Якобі в даний момент часу може мати різні значення своїх компонент. Вони залежать від моменту часу в яких обчислюються частинні похідні, що утворюють матрицю.

Компоненти матриці встановлюють зв'язок змін (варіацій) двох груп фізичних координат. Вони дозволяють встановити взаємозв'язок варіацій координат. По суті компоненти матриці  $N$  є коефіцієнтами чутливості змін  $x$  - координат по причині змін  $L$ -координат. Для аналізу всієї сукупності компонент матриці (36 параметрів). Використана її візуалізація. Компоненти матриці зображено у вигляді стовпчастої діаграми (рис. 14.72).

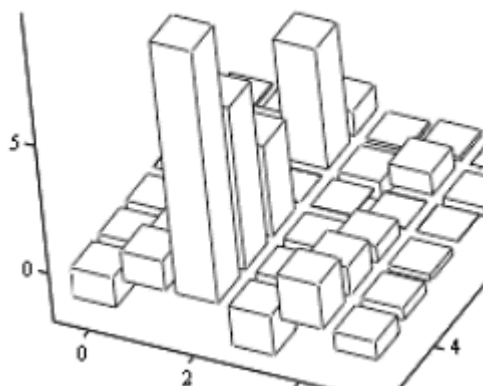


Рис. 14.72. Візуалізовані значення функцій чутливості (матриці Якобі) обчисленої в даний момент часу для визначення зміни положення платформи маніпулятора -гексапода внаслідок незалежних змін  $L$ -координат

Візуалізація матриці дозволяє виконати аналіз наявності сингулярних областей маніпулятора побудованого на основі механізму з паралельною кінематикою.

Якщо компоненти матриці  $N$ , зокрема  $n_{ji} = 0$  це значить, що будь-які зміни  $j$ -ї  $L$ -координати не приведуть до зміни  $i$ -ї  $x$ -координати, тобто при кінцевому  $\delta L_j$   $\delta x_i = 0$ .

Якщо компонента матриці  $n_{ji} \rightarrow \infty$ , то будь-які зміни  $j$ -ї  $L$ -координати приведуть до нескінченно великих змін  $x$ -координати. Фізично це відповідає сингулярній точці механізму паралельної структури. Ця сингулярна точка визначається лише геометричними параметрами, тобто визначає геометричну сингулярну точку.

Враховуючи зв'язок компонент матриць  $M$  і  $N$ , можна зробити висновок, що сингулярна точка має місце у випадку, коли якась із компонент матриці  $M$ , а саме  $m_{ji} = 0$ .

Встановлена взаємозалежність між малими змінами  $L$  та  $x$ -координат дозволяє провести аналіз випадкових змін положення робочого органа механізму випадкових змінах довжин штанг.

Зміна довжини штанги (похибка) може визиватись різними причинами. Однією із найбільш ймовірних причин похибки є поперечні коливання штанги як системи з розподіленими по довжині штанги параметрами. Іншими причинами похибок є похибки та деформації в шарнірах, люфти і деформації в приводах штанг. В результаті дії всієї сукупності факторів довжина штанги ( $L$ -координата) змінюється випадковим чином на величину похибки. Випадкові зміни довжини штанг (похибки) являють собою випадкові процеси. Вони описані своїми канонічними розкладами по системі тригонометричних функцій.

Кожна із  $L$ -координат подана у вигляді відрізка гармонічного ряду по системі взаємоортогогальних функцій  $\sin$  та  $\cos$ . Варіації довжин штанг відповідні похибкам обчислені за допомогою процедури

$$\begin{aligned} \omega 01 &:= 100, \quad \delta L_{pu}U(t) := \sum_{k=1}^{64} (us1_k \cdot \cos(k \cdot \omega 01 \cdot t) + vs1_k \cdot \sin(k \cdot \omega 01 \cdot t)) \\ \omega 02 &:= 110, \quad \delta L_{pv}V(t) := \sum_{k=1}^{64} (us2_k \cdot \cos(k \cdot \omega 02 \cdot t) + vs2_k \cdot \sin(k \cdot \omega 02 \cdot t)) \\ \omega 03 &:= 120, \quad \delta L_{pw}W(t) := \sum_{k=1}^{64} (us3_k \cdot \cos(k \cdot \omega 03 \cdot t) + vs3_k \cdot \sin(k \cdot \omega 03 \cdot t)) \\ \omega 04 &:= 130, \quad \delta L_{pw}U(t) := \sum_{k=1}^{64} (us4_k \cdot \cos(k \cdot \omega 04 \cdot t) + vs4_k \cdot \sin(k \cdot \omega 04 \cdot t)) \\ \omega 05 &:= 140, \quad \delta L_{pv}W(t) := \sum_{k=1}^{64} (us5_k \cdot \cos(k \cdot \omega 05 \cdot t) + vs5_k \cdot \sin(k \cdot \omega 05 \cdot t)) \\ \omega 06 &:= 150, \quad \delta L_{pu}V(t) := \sum_{k=1}^{64} (us6_k \cdot \cos(k \cdot \omega 06 \cdot t) + vs6_k \cdot \sin(k \cdot \omega 06 \cdot t)) \end{aligned}$$

Випадкові величини, які є коефіцієнтами канонічних розкладів випадкових процесів задані генераторами випадкових чисел з нормальним законом розподілу згідно наступної процедури:

$vs1 := rnorm(100,0,0.0000001)$

$vs2 := rnorm(100,0,0.0000001)$

Реалізації значень випадкових чисел одержані у вигляді векторів розмірності 100. Характерні значення частини компонент векторів являють собою коефіцієнти канонічного розкладу випадкових похибок L-координат (рис. 14.73).

|    |                        |    |                        |
|----|------------------------|----|------------------------|
|    | 0                      |    | 0                      |
| 0  | $-4.39 \cdot 10^{-8}$  | 0  | $-6.271 \cdot 10^{-8}$ |
| 1  | $-6.794 \cdot 10^{-8}$ | 1  | $-5.534 \cdot 10^{-8}$ |
| 2  | $-4.733 \cdot 10^{-8}$ | 2  | $-3.46 \cdot 10^{-8}$  |
| 3  | $-9.515 \cdot 10^{-8}$ | 3  | $-4.645 \cdot 10^{-8}$ |
| 4  | $-1.686 \cdot 10^{-7}$ | 4  | $2.509 \cdot 10^{-8}$  |
| 5  | $4.353 \cdot 10^{-9}$  | 5  | $-3.734 \cdot 10^{-8}$ |
| 6  | $-1.206 \cdot 10^{-8}$ | 6  | $-2.731 \cdot 10^{-8}$ |
| 7  | $5.564 \cdot 10^{-8}$  | 7  | $1.29 \cdot 10^{-7}$   |
| 8  | $2.192 \cdot 10^{-7}$  | 8  | $1.941 \cdot 10^{-8}$  |
| 9  | $8.087 \cdot 10^{-8}$  | 9  | $2.086 \cdot 10^{-7}$  |
| 10 | $9.851 \cdot 10^{-8}$  | 10 | $-1.562 \cdot 10^{-7}$ |
| 11 | $8.622 \cdot 10^{-8}$  | 11 | $7.9 \cdot 10^{-9}$    |
| 12 | $9.156 \cdot 10^{-8}$  | 12 | $4.205 \cdot 10^{-8}$  |
| 13 | $6.73 \cdot 10^{-8}$   | 13 | $1.627 \cdot 10^{-7}$  |
| 14 | $-1.044 \cdot 10^{-7}$ | 14 | $6.198 \cdot 10^{-8}$  |
| 15 | $6.908 \cdot 10^{-9}$  | 15 | $-1.717 \cdot 10^{-7}$ |

Рис. 14.73. Розрахункові вектори випадкових коефіцієнтів канонічного розкладу похибок зміни L-координат

Знайдені випадкові коефіцієнти послужили основою для обчислення випадкових змін довжини кожної із штанг механізму (рис. 14.74).

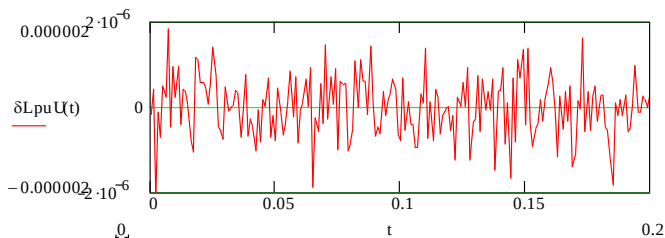


Рис. 14.74. Типовий випадковий процес зміни L-координати (зміни довжини штанги) маніпулятора-гексапода

Випадкові зміни довжини штанги включають динамічні складові різних частотних діапазонів. В цілому зміни довжини окремої штанги відповідають квазістаціонарному випадковому процесу з обмеженим діапазоном зміни. Вони описані своїми канонічними розкладами. Визначені своїми канонічними розкладами випадкові похибки всіх 6-ти L-координат сформовані у вигляді символічної векторної функції часу яка обчислюється наступною процедурою:

$$\delta L(t) := \begin{pmatrix} \delta L_{pu}U(t) \\ \delta L_{pv}V(t) \\ \delta L_{pw}W(t) \\ \delta L_{pu}U(t) \\ \delta L_{pv}V(t) \\ \delta L_{pw}W(t) \end{pmatrix}.$$

Випадкові зміни довжини кожної із шести штанг являють собою подібні випадкові процеси (рис. 14.75).

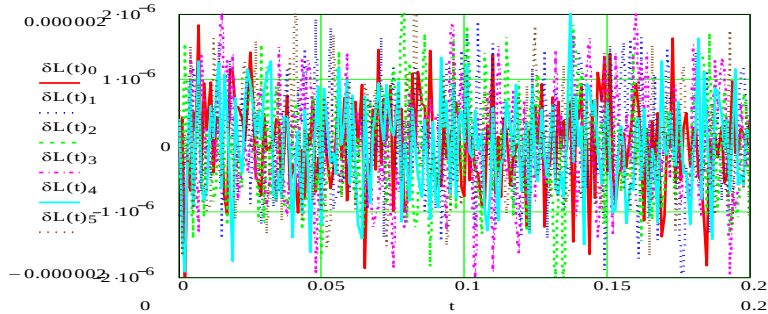


Рис. 14.75. Графічне зображення діапазонів випадкових змін довжин всіх шести штанг маніпулятора - гексапода

Із наведених результатів математичного моделювання випливає, що задані своїм канонічним розкладом випадкові зміни кожної із L-координат являють собою широкополосні випадкові процеси близької структури та діапазону змін. Тому можна вважати, що похибки залежать від значного числа факторів які незначним чином пов'язані між собою. Для математичного моделювання впливу похибок окремого привода приймається незалежним від інших приводів випадковим процесом. В даному процесі простежуються як високочастотні, так і низькочастотні складові (рис. 14.76).

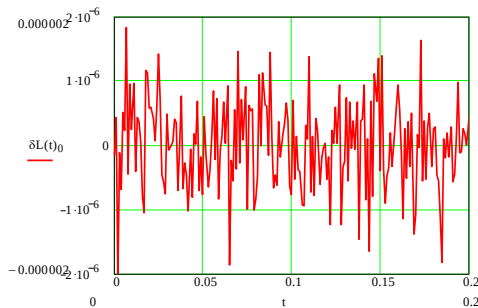


Рис. 14.76. Результати математичного моделювання похибки зміни довжини однієї із штанг маніпулятора-гексапода

Внаслідок випадкових змін довжини кожної із штанг механізму має місце результуюче просторове переміщення робочого органа маніпулятора - гексапода. Вони знаходяться з використанням матриці Якобі механізму, яка змінюється в часі.

Для розрахунку компонент вектора просторового положення полюса платформи використана процедура:

$$\delta Xe1(t) := \sum_{j=0}^5 \frac{\delta L(t)_j}{M_{j,0}}, \quad \delta Xe2(t) := \sum_{j=0}^5 \frac{\delta L(t)_j}{M_{j,1}},$$

$$\delta Xe3(t) := \sum_{j=0}^5 \frac{\delta L(t)_j}{M_{j,2}}.$$

Згідно даної процедури визначені реалізації випадкових переміщень полюса платформи (рис. 14.77).

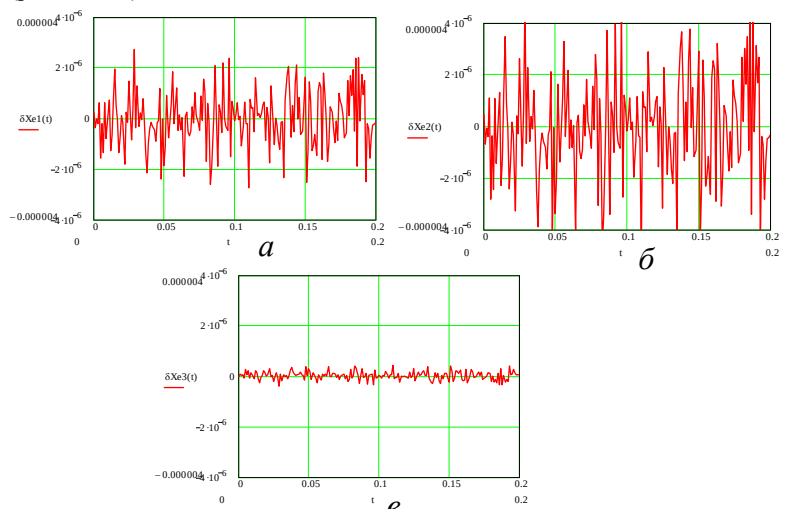


Рис. 14.77. Реалізації випадкових процесів зміщення робочого органа маніпулятора-гексапода в напрямках осей  $x$  (а),  $y$  (б) та  $z$  (в)

Наведені реалізації випадкових похибок положення робочого органу маніпулятора одержані розрахунком являють собою різномірні випадкові процеси. Процеси випадкових переміщень платформи в її площині (напрямки  $x$  і  $y$ ) є близькими по структурі і частотному складу, а процес переміщення платформи в напрямку перпендикулярному площині платформи суттєво відрізняється від переміщень платформи в її площині.

В результаті математичного моделювання встановлено, що випадкові похибки L-координат є причиною виникнення похибок переміщень робочого органа механізму в напрямку осі  $y$  в діапазоні  $-4, \dots, +4$  мкм. Випадкові похибки переміщення платформи механізму в напрямку осі  $x$  суттєво менші і знаходяться в межах  $-2, \dots, +2$  мкм. Похибки переміщення в напрямку осі  $z$  є набагато меншими і не перевищують 1 мкм.



Тому можна вважати зміщення платформи в напрямку перпендикулярному її площині несуттєвими у порівнянні із її переміщеннями в напрямках площини платформи.

Додатково проведено визначення поперечно кутових переміщень платформи. Для визначення поперечно кутових переміщень платформи маніпулятора - гексапода використана наступна процедура:

$$\delta X_{e4}(t) := \sum_{j=0}^5 \frac{\delta L(t)_j}{M_{j,3}}, \quad \delta X_{e5}(t) := \sum_{j=0}^5 \frac{\delta L(t)_j}{M_{j,4}}, \quad \delta X_{e6}(t) := \sum_{j=0}^5 \frac{\delta L(t)_j}{M_{j,5}}.$$

Згідно даної процедури визначені випадкові зміни кутів Ейлера  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  для платформи маніпулятора. Реалізації випадкових процесів зміни кутів Ейлера в цілому подібні процесам поступального переміщення робочого органу механізму (рис. 14.78).

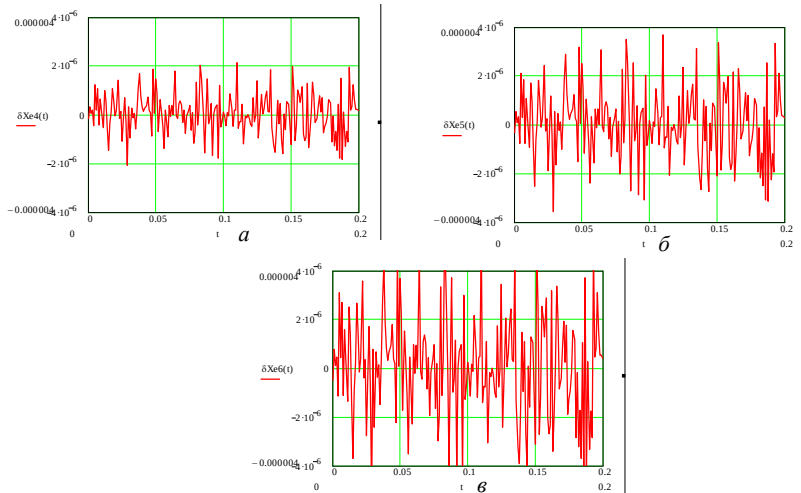


Рис. 14.78. Реалізація випадкових процесів кутового зміщення робочого органу маніпулятора-гексапода. Позиції а, б, в відповідають кутам Ейлера  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

Із результатів моделювання випливає, що поперечно кутові переміщення платформи відповідні кутам Ейлера  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  мають близьку структуру і частотний склад. Вони є рівнозначні по амплітудним параметрам та характерним частотам. Це обумовлено рівнозначним впливом випадкових змін окремих штанг на похибки поперечно-кутового положення маніпулятора-гексапода.

Наведена вище методика оцінки кінематичної точності маніпулятора-гексапода має практичне значення. Похибки положення платформи маніпулятора-гексапода визначають параметри його точності. Розглянута методика і результати дають можливість оцінити похибки положення платформи внаслідок дії всього комплексу змін  $L$  - координат. Зокрема враховуються коливання штанг, параметри точності опор штанги і приводів та інші фактори.

## РОЗДІЛ 15

### Елементи теорії проектування ходової частини наземного роботизованого комплексу

#### 15.1. Параметри випадкових навантажень гусеничного рушія наземного роботизованого комплексу

Наземні роботизовані комплекси середнього класу вантажопідйомності, як правило мають гусеничний рушій (рис. 15.1).



Рис. 15.1. Загальний вигляд наземного роботизованого комплексу з гусеничним рушієм

Робочі динамічні процеси гусеничного рушія відзначаються значною складністю. В основному це обумовлено взаємодією зірочки привода гусеничного рушія із отворами гусениці. Процес взаємодії виступа зірочки із отвором включає випадкові складові причиною яких є нерівномірність розташування отворів по довжині гусениці та невизначеність силового контакту зірочки із гусеницею. При вході виступа зірочки в отвір та виходу виступа із отвору мають місце ударні процеси. Вони аналогічні ударним процесам ланцюгової передачі [20]. Визначена якісна сторона взаємодії ведучої зірочки із гусеницею. Нехай положення виступа ведучої зірочки визначається кутом:

$$\varphi_1 = \omega_1 t,$$

де  $\omega_1$  - кутова швидкість зірочки;  $t$  – час. Відлік кута здійснюється проти годинникової стрілки (рис. 15.2).

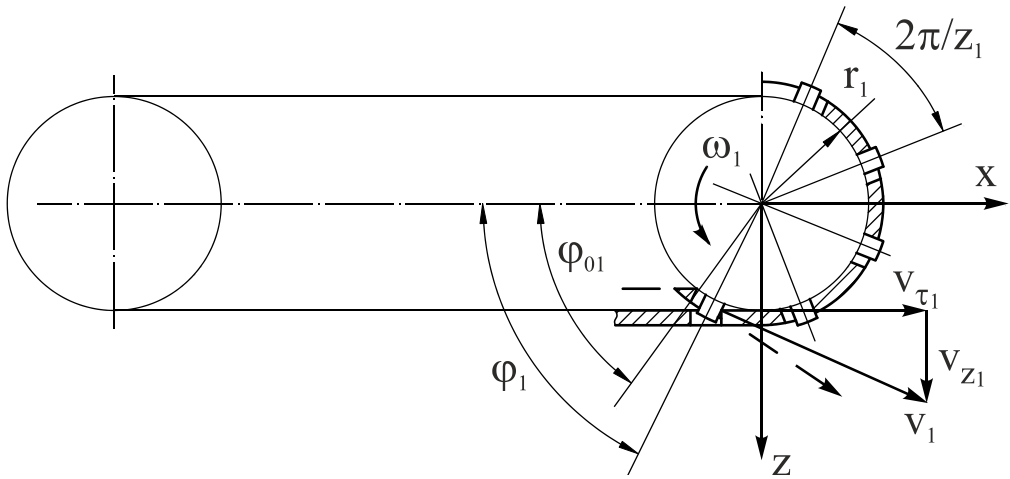


Рис. 15.2. Схема взаємодії ведучої зірочки із гусеницею наземного роботизованого комплексу

Край отвору гусениці взаємодіє із виступом зірочки в момент часу коли:

$$\varphi_1 = \varphi_{01} = \pi/2 - \pi z_1,$$

де  $z_1$  – число зубців зірочки.

При цьому проекція окружної швидкості  $V_1$  на вісь  $Z$  визначає швидкість удару виступа по краю отвору гусениці.

Окружна швидкість:

$$V_1 = r\omega_1.$$

де  $r$  – еквівалентний радіус виступа зірочки в місці його контакту із отвором гусениці.

Швидкість удару:

$$V_{z1} = r\omega_1 \sin\left(\frac{\pi}{z_1}\right) \approx \pi r\omega_1 / z_1.$$

Швидкість перетину гусениці у напрямку  $X$  складе:

$$V_{\tau 1} = r\omega_1 \sin \varphi_1.$$

У випадку, коли:

$$\varphi_1 = \varphi_{01} \quad \text{або} \quad \varphi_1 = \varphi_{01} + 2\pi / z_1.$$

Маємо мінімальну швидкість:

$$V_{\tau 1 \min} = r\omega_1 \cos(\pi / z_1) \approx r\omega_1 \left[1 - \left[\pi / (2z_1)\right]^2\right].$$

Максимальна швидкість гусениці складає:

$$V_{\tau 1 \min} = r\omega_1.$$

Зміна швидкості гусениці в часі являє собою періодичну криву складену із параболічних дуг (рис. 15.3).

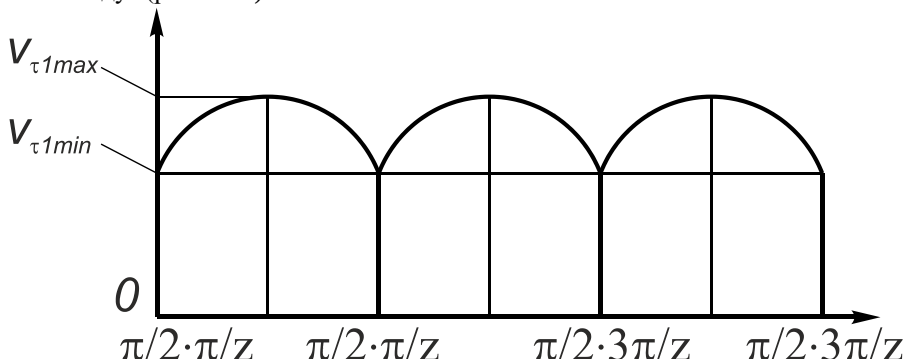


Рис. 15.3. Зміна в часі швидкості руху гусениці наземного роботизованого комплексу

Відповідно пульсаціям швидкості гусениці мають місце зміни інерційних навантажень на гусеницю та привід зірочки. Інерційні навантаження залежать від пришвидження. Пришвидження визначається шляхом диференціювання швидкості і змінюється відповідно залежності :

$$\frac{dV_{\tau 1}}{dt} = r\omega_1^2 \cos \varphi_1 = r\omega_1^2 \cos \omega t \cdot$$

Екстремуми пришвидження досягаються при  $\varphi_1 = \varphi_{01}$  та  $\varphi_1 = \frac{1}{2}\pi \pm \frac{\pi}{z_1}$ .

Експериментальні значення пришвидження складають:

$$\left( \frac{dV_{\tau 1}}{dt} \right)_{\max, \min} = \pm r\omega_1^2 \sin \frac{\pi}{z_1} \approx \frac{\pi r\omega_1^2}{z_1}$$

Екстремуми пришвидження рівні за величиною але мають протилежні знаки. Закон зміни пришвидження, а відповідно інерційні навантаження являють собою періодичний процес із різкою зміною пришвидження в окремих точках (рис. 15.4).

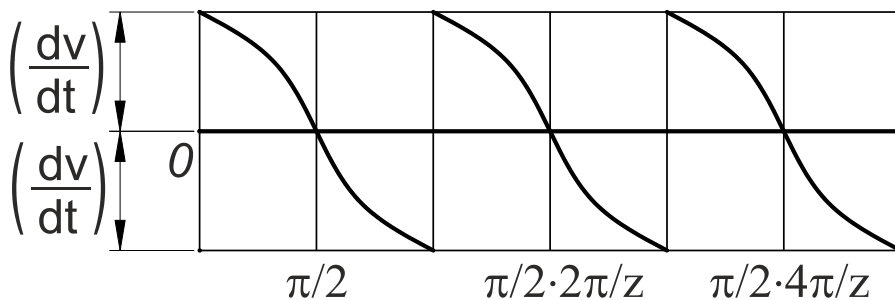


Рис. 15.4. Розрахунковий закон зміни пришвидження гусениці наземного роботизованого комплексу

Кінематичні параметри гусениці, а саме швидкість та пришвидшення мають значні відхилення. Коефіцієнт нерівномірності швидкості визначено у вигляді:

$$\varepsilon = (V_{r1\max} - V_{r1\min}) / V_{r1\max} \approx \left( \frac{\pi}{2z_1} \right)^2.$$

Із наведених залежностей випливає, що сили ударів, пульсації швидкості та пришвидшення зростають при зменшенні числа виступів на ведучій зірочці гусениці. Всі параметри, що визначають рух гусеничного рушія, а саме еквівалентний радіус виступів  $r$ , кутова швидкість  $\omega_1$ , кути  $\varphi_1$  та  $\varphi_{01}$  мають значні зміни. Вони обумовлені конструкцією гусеничного рушія, значними відмінностями в розташуванні отворів гусениці та похибок розташування виступів зірочки, а також нестабільністю частоти обертання валів приводів ходової частини мобільного робота. На зміну параметрів впливає багато факторів. Тому навантаження гусеничного рушія має випадковий характер.

Визначено параметри випадкових навантажень гусеничного рушія. Встановлена раніше залежність швидкості від кута повороту описана косинусоїдальною функцією. Графік косинусної залежності для чверть періода має вигляд :

$$qf(t) := \begin{cases} 2.3 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{2 \cdot a}\right) & \text{if } t \leq a \\ 0 & \text{if } t > a \end{cases}$$

Косинусна залежність достатньо точно описує одержану раніше зміну швидкості гусениці (рис. 15.5).

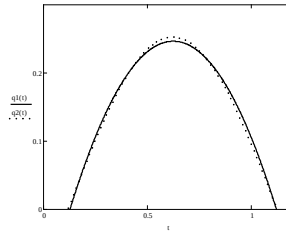


Рис.15.5. Відповідність розрахункової відносної швидкості (суцільна крива) ділянці косинусоїди (пунктирна крива)

Враховуючи відповідність розрахункової відносної швидкості ділянці косинусоїди зроблено висновок про можливість аналітичного опису швидкості ділянкою косинусоїди. Для опису зрізаної косинусоїди застосовано відрізок ряду Фур'є [28](рис. 15.6):

$$qf(t) := \frac{2}{\pi} + \sum_{k=1}^{20} \left[ \frac{-\cos(k \cdot \pi)}{\pi \cdot \left(k^2 - \frac{1}{4}\right)} \cdot \cos(k \cdot z \cdot t) \right]$$

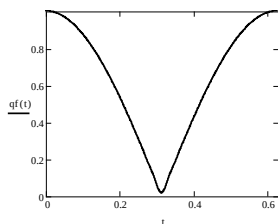


Рис. 15.6. Опис відносної швидкості гусениці відрізком ряду Фур'є

Проведено розрахунок зміни швидкості гусениці в часі (рис. 15.7).

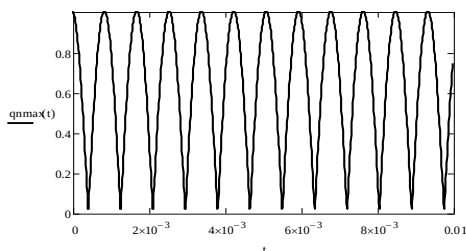


Рис. 15.7. Залежність зміни швидкості гусениці від часу

Проведено розрахунки змін в часі швидкості гусениці при різних швидкостях переміщення шасі наземного роботизованого комплексу (рис. 15.8).

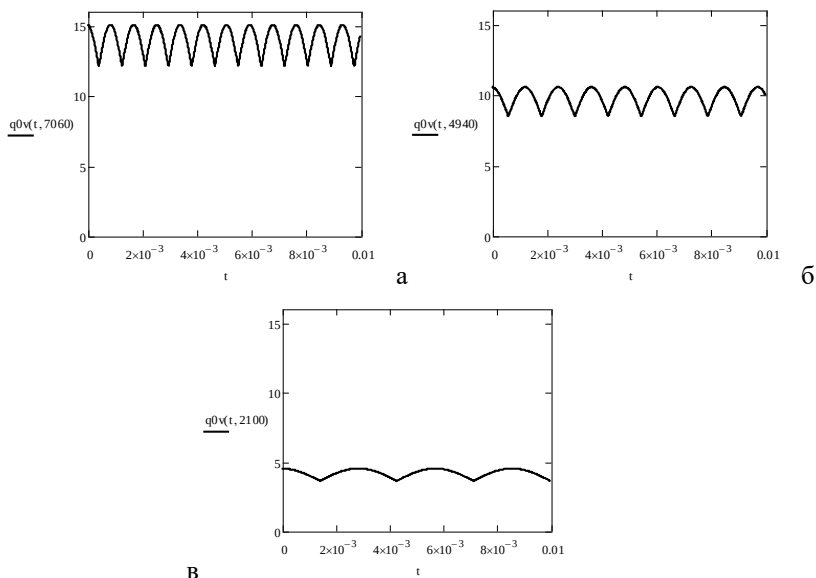


Рис. 15.8. Розрахункові залежності швидкості руху гусениці при різних значеннях середньої швидкості шасі мобільного робота: а. 7.5 км/год; б-5 км/год; в-2.5 км/год

Із результатів розрахунків випливає, що пульсації швидкості гусениці суттєво зростають із підвищенням швидкості руху шасі.

Для врахування випадкових змін параметрів навантажень гусеничного рушія використано розклад зміни швидкості в ряд Фур'є. випадкові зміни параметрів гусениці та гусеничного рушія приведуть до випадкових змін амплітуд, частот та початкових фаз окремих гармонік розкладу. Для оцінки випадкових змін параметрів застосовані методи математичного моделювання. Враховано, що процес зміни швидкості гусениці визначається масивом амплітуд, частот та початкових фаз двадцяти основних гармонік розкладу. Тому в процесі математичного моделювання задані випадкові зміни амплітуд, частот і початкових фаз гармонік по адитивній схемі. Тобто до кожного параметру розкладу додана випадкова складова. Використана запропонована ідея про розділення процесів у мобільних роботах на дві групи макропроцеси та мікропроцеси. Прийнято, що випадкові складові параметрів визначаються в основному мікропроцесами. Тому випадкові складові параметрів прийняті малими у порівнянні із детермінованими складовими параметрів. Наприклад для амплітуд гармонік випадкові зміни обмежені значенням  $\pm 5\%$  від детермінованого розрахункового значення амплітуди. Враховуючи невизначеність випадкових змін параметрів для моделювання використано генератор випадкових чисел із рівномірним законом розподілу (функція  $\text{rnd}(\Delta)$ ), де  $\Delta$  – діапазон випадкових змін параметра який прийнято  $10\%$  від номінального значення параметра. Зокрема для амплітуда гармоніки її детерміноване значення складає

$$a_{k\partial} = \frac{-\cos(k\pi)}{\pi\left(k^2 - \frac{1}{4}\right)},$$

де  $k$  – номер гармоніки

Прийняте випадкове значення амплітуди у вигляді:

$$a_{kb} = \frac{-\cos(k\pi) + \Delta \cdot \text{rnd}(1)}{\pi\left(k^2 - \frac{1}{4}\right)},$$

Діапазон випадкових змін вибрано відповідним  $10\%$  максимального значення модуля функції. Враховуючи :

$$|\cos(k\pi)|_{\max} = 1, \text{ прийнято } \Delta = 0,1.$$

Для випадкових змін частоти значення відносного параметра вибрано значно меншим ( $\Delta_{\omega} = 4\%$ ). Це обумовлено суттєво меншими значеннями пульсації швидкості приводного електродвигуна. Також враховано, що високочастотні пульсації привода ходової частини шасі як правило демпфуються в трансмісії і мало впливають на зміни динамічних навантажень гусеничного рушія. Відповідно для моделювання випадкових змін частоти окремої гармоніки використано коефіцієнт:

$$K_{\omega} = 1 - \frac{\Delta_{\omega}}{2} + \text{rnd}\left(\frac{\Delta_{\omega}}{1 + C_{\omega}t}\right).$$

Значення коефіцієнта  $C_{\omega}$  підбрано із умови нівелювання випадкових змін частоти на коливання гусениці після характерного значення часу  $t$  який перевищує час перехідного процесу приводу ходової частини гусениці.

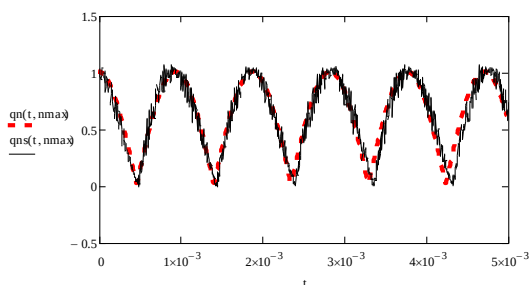
Випадкові зміни початкових фаз гармонік прийняті в межах 10% періоду проходження гусениці по робочій поверхні ведучої зірочки гусеничного рушія. Відповідно випадкова початкова фаза всіх гармонік визначена виразом:

$$\psi_0 = \text{rnd}(0, 2\pi).$$

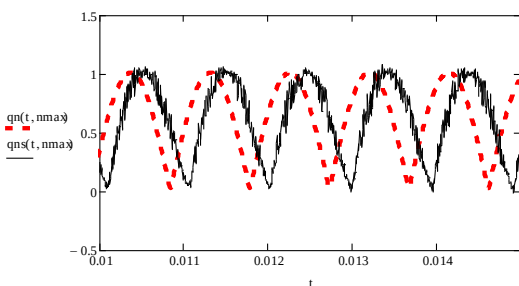
В остаточному варіанті стохастична часова залежність пульсацій швидкості гусениці від часу задана у вигляді:

$$qns(t, n) := \frac{2}{\pi} + \sum_{k=1}^{20} \left[ \frac{[-\cos(k \cdot \pi) + 0.1 \cdot (\text{md}(1))]}{\pi \cdot \left(k^2 - \frac{1}{4}\right)} \cdot \cos \left[ k \cdot z \cdot \left[ \frac{n}{60} \cdot (2 \cdot \pi) \right] \cdot \left( 0.98 + \text{md} \left( \frac{0.04}{1 + 1200t} \right) \right) \cdot t + \text{md}(0.2 \cdot \pi) \right] \right]$$

Згідно даної залежності проведено розрахунок часових реалізацій швидкості гусениці, що враховують випадкові зміни параметрів гусеничного рушія. Розрахунок проведено для достатньо протяжного часу реалізації процесу руху. При цьому має місце циклічна зміна фази пульсацій швидкості. В початковий момент розрахункова фаза пульсацій швидкості відповідає фазі детермінованого процесу, а в подальшому має місце змінна в часі різниця фаз (рис. 15.9).



а



б

Рис. 15.9. Зміни швидкості гусениці внаслідок впливу випадкових факторів гусеничного рушія та приводів ходової частини мобільного робота на першій стадії циклічної зміни середньої фази пульсацій швидкості: а-на початку циклу; б- в середній частині циклу



Встановлено, що випадкові зміни швидкості гусениці по амплітуді складають близько 10% і є близькими до регулярних. Зміни швидкості в областях максимума в 2,,3 рази більш інтенсивні ніж зміни в області мінімальних швидкостей гусениці. Це пояснюється інтенсифікацією ударних процесів при взаємодії виступа зірочки із отворами гусениці. Середня фаза випадкових коливань є близькою до фази детермінованих залежностей зміни швидкості гусениці.

В подальшому різниця фаз зростає досягаючи близько  $90^\circ$ . Це простежується на положенні мінімумів розрахункових залежностей (пунктиром) показана залежність відповідна детермінованому процесу.

Після досягнення максимальної різниці фаз близько  $150^\circ$  залежність, що враховує випадкові зміни параметрів починає зміщуватись відносно залежності відповідної детермінованому процесу (рис. 15.10).

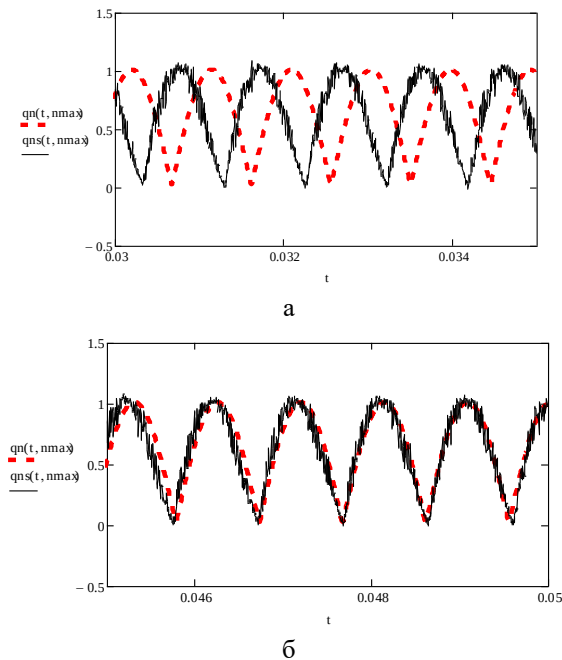


Рис. 15.10. Зміни фази процесу випадкових пульсації швидкості гусениці відносно детермінованого процесу в середині циклу (а) та на завершальній стадії циклічної зміни фази (б)

В результаті розрахунків встановлено, що циклічна зміна фази випадкових пульсацій швидкості мало змінює характер випадкових змін швидкості для періоду взаємодії гусениці із сусідніми виступами ведучої зірочки.

Тому для компенсації негативного впливу приводів ходової частини мобільного робота доцільно провести демпфування в основному короткоперіодичних випадкових коливань гусениці. Довгоперіодичні зміни параметрів впливають на пульсації швидкості гусениці незначним чином. Тому їх демпфування не є доцільним.

### 15.2. Заходи по компенсації негативного впливу ходової частини на динамічну точність переміщення наземного роботизованого комплексу

На основі проведених досліджень розроблені заходи по компенсації негативного впливу приводів ходової частини на показники динамічної точності положення шасі, а відповідно і розташованого на шасі маніпулятора мобільного робота спеціального призначення. Заходи направлені на компенсацію середнього значення пульсацій швидкості гусениці, а відповідно і шасі та на демпфування високочастотних пульсацій швидкості гусениці. Конструктивні заходи включають спеціальну трансмісію приводів ходової частини (рис. 15.11).

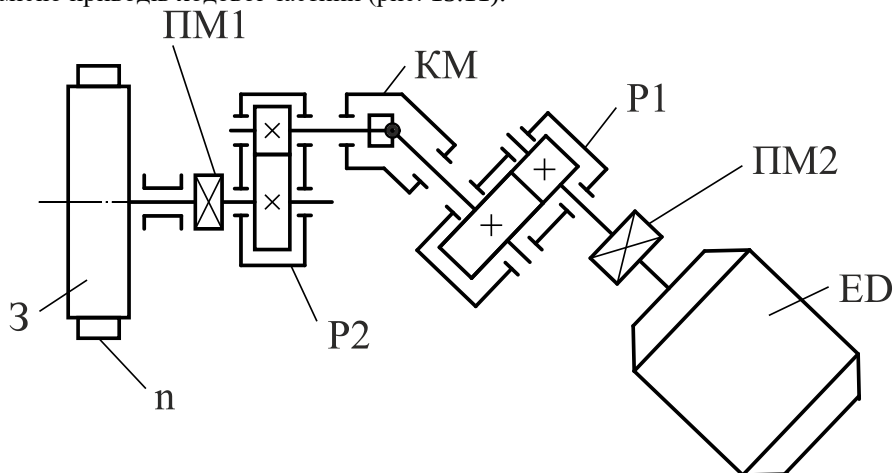


Рис. 15.11. Кінематична схема трансмісії приводу ходової частини мобільного робота яка забезпечує компенсацію динамічних пульсацій швидкості гусеничного рушія

Трансмісія служить для забезпечення обертання зірочки 3 за допомогою приводного електродвигуна ЕД. Частота обертання електродвигуна забезпечується системою керування і змінюється в залежності від необхідної швидкості переміщення гусениці.

Трансмісія включає робочий редуктор Р1 який знижує частоту обертання вала електродвигуна до необхідного значення. Для компенсації змін швидкості гусениці служить карданна муфта КМ. Редуктор Р2 має коефіцієнта редукції величина якого обернена числу виступів на зірочки 3.

Демпфування високочастотних пульсацій швидкості гусениці забезпечується пружинними муфтами ПМ1 та ПМ2.

Карданна муфта КМ реалізується з одним або двома силовими карданами. Карданна муфта із одним карданом має дві напівмуфти, що мають вилкоподібну форму А і В із проміжним елементом у вигляді хрестовини С (рис. 15.12).

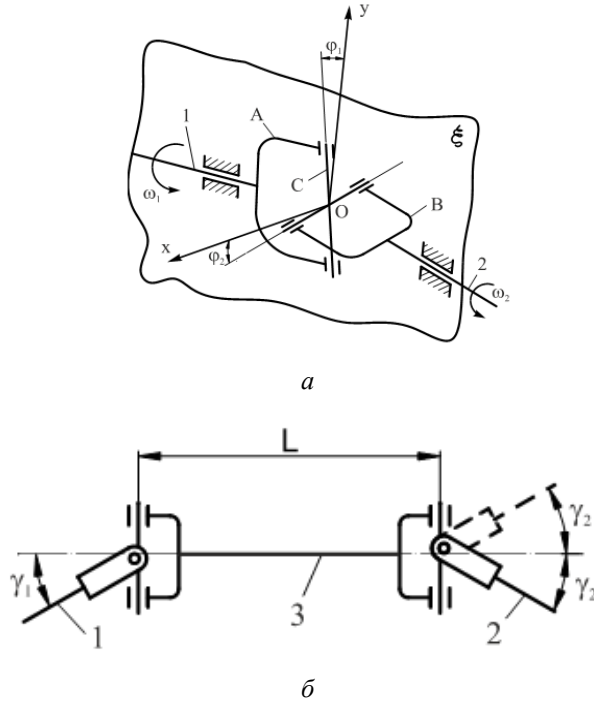


Рис. 15.12. Карданна муфта: а - із одним регульованим карданом ; б- з двома регульованими карданами

Згідно [20] кути повороту валів відносно вісей X і Y пов'язані співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} \varphi_2 \cos \gamma.$$

Із даної залежності знаходимо:

$$\frac{d\varphi_2}{dt_2} \bigg/ \frac{d\varphi_1}{dt_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \cos \gamma (1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \varphi_1).$$

Визначимо максимальні та мінімальні відношення кутових швидкостей:

$$\left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)_{\max} = \frac{1}{\cos \gamma}, \quad \text{при } \varphi_1 = 0; \pi; 2\pi, \dots$$

$$\left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)_{\min} = \cos \gamma, \quad \text{при } \varphi_1 = \frac{\pi}{2}; \frac{3}{2}\pi, \dots$$

Якщо  $\omega_1 = \text{const}$ , то  $\omega_{2\min} / \omega_{2\max} = \cos^2 \gamma$ .

Амплітуда змін кутової швидкості вихідного вала складає:

$$\frac{1}{2}(\omega_{2\max} - \omega_{2\min}) = \frac{1}{2}\omega_1 \sin \gamma \operatorname{tg} \gamma.$$

При виборі значення кута  $\gamma$  досягається амплітуда кутової швидкості яка дорівнює амплітуді зміни швидкості гусениці. При цьому має місце практично повна компенсація нерівномірності швидкості гусениці шасі мобільного робота.

Застосування муфти із двома силовими карданами дає можливість знизити динамічні навантаження в трансмісії та підвищити плавність ходу гусеничного рушія.

Конструктивна виконання карданих муфт може бути самим різноманітним. Рациональним конструктивним виконанням є пристрій із фрикційними елементами (рис. 15.13).

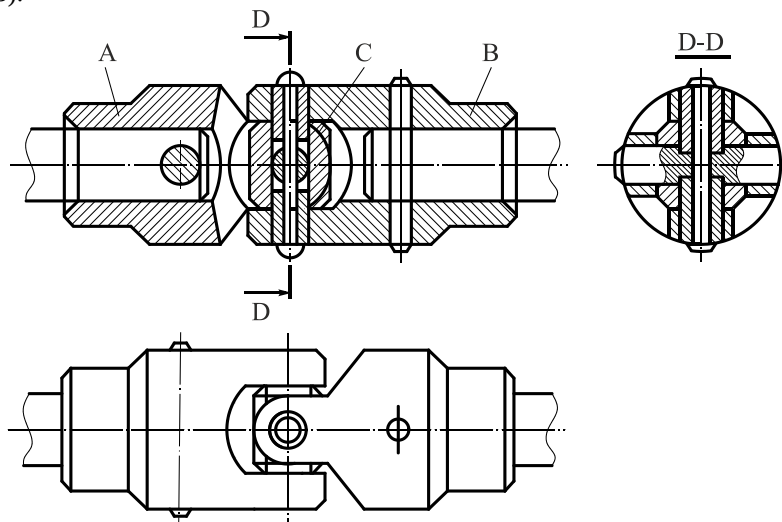


Рис. 15.13. Конструктивна схема карданної муфти із фрикційними елементами

Даний пристрій має незначну масу і габарити. Його можна встановити в трансмісії без ускладнення її конструкції. Наявність фрикційного елемента забезпечує ефективне демпфування високочастотних коливань гусениці. Даний пристрій доцільно поєднати із пружними муфтами трансмісії, які мають фасонні еластомерні вставки між металевими деталями муфти (рис. 15.14).

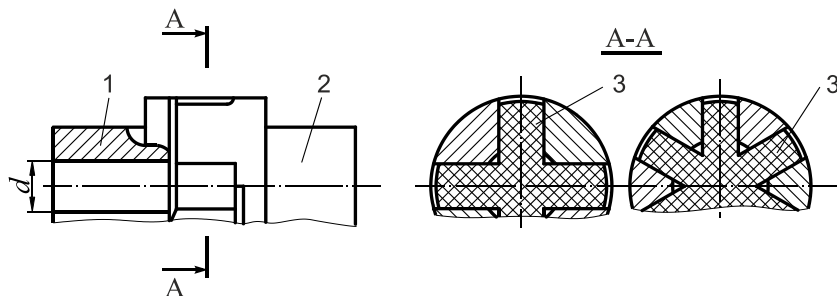


Рис. 15.14. Конструктивна реалізація рекомендованих для застосування в трансмісіях мобільних роботів пружних муфт із еластомерними вставками

В даних муфтах пружний елемент має зірчасту форму. Дана конструкція пружних муфт є раціональною, але вони потребують достатньо точного суміщення вісей валів напівмуфт.

Рациональним є використання в муфті еластичної гумо-тканинної оболонки 3. Це поліпшує конструктивне виконання муфти (рис. 15.15).

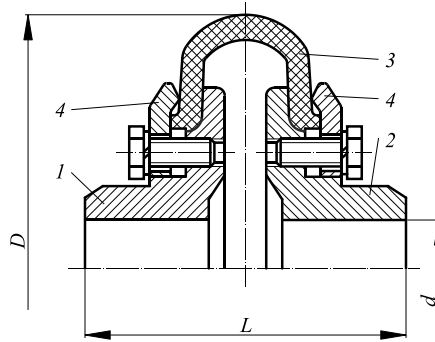


Рис. 15.15. Еластична муфта трансмісії шасі наземного роботизованого комплексу

Запропоновані заходи забезпечують ефективну компенсацію негативного впливу ходової частини на динамічні характеристики шасі наземного роботизованого комплексу.

В результаті проведених досліджень встановлено, що негативним фактором роботи гусеничного рушія є періодичний контакт виступів привідної зірочки із отворами в гусениці. Це обумовлює суттєвий максимум спектральної щільності випадкових навантажень на гусеницю. Для компенсації динамічних навантажень рекомендується встановлення карданної муфти в трансмісії привода гусеничного рушія та додаткових пружно-демпфуючих муфт. При цьому інтенсивність резонансних випадкових навантажень зменшується в 2...3 рази. Це суттєво підвищує стійкість і довговічність гусеничного рушія, плавність руху наземного роботизованого комплексу та динамічну точність маніпулятора.

При вирішенні завдань проектування наземних роботизованих комплексів спеціального призначення застосований принципово новий підхід. Він базується на синергетичному об'єднанні приводів швидких переміщень та прецизійних просторових приводів мікропереміщень, поєднання яких реалізується введенням паралельних прямих та зворотніх кінематичних зв'язків. Запропонований підхід є принципово новим і в світових інформаційних джерелах не виявлений. Обґрунтованістю його новизни також служить відсутність прикладів технічної реалізації даного підходу в наземних роботизованих комплексах спеціального призначення, які в даний час виготовляються в передових у технічному відношенні країнах.

---

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Аналитический обзор мирового рынка робототехники. РФ. 2019. 272 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: [http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank\\_robotics\\_review\\_2019\\_17.07.2019\\_m.pdf](http://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf).
2. Аржаев Г.О. Визначення параметрів реологічних моделей опорних поверхонь руху позашляхових транспортно-технологічних засобів /Г.О. Аржаєв, Л.Є. Пелевін, М.М. Балака// Машинознавство, 2008, №10 (136). – с. 22-24.
3. Аржаев Г.О. Визначення складової сили тяги рушія, що обумовлена зовнішнім тертям виступів рисунка протектора пневматичної шини /Г.О. Аржаєв, Л.Є. Пелевін, М.М. Балака// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Вип. 5/2008(52), ч. 2. – 2008. – с. 75-79.
4. Аржаев Г.О. Вплив параметрів протектора шини на тягово-зчіпні властивості пневмоколісного рушія /Г.О. Аржаєв, Л.Є. Пелевін, М.М. Балака// Гірнічі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, вип. 72 – 2008. – с. 12-16.
5. Балака М.М. Експериментальні дослідження роботи колеса з пневматичною шиною на опорній поверхні, що деформується /М.М. Балака, Л.Є. Пелевін, Г.О. Аржаєв, А.В. Василенко// Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013, №1 (8). – с. 132-139.
6. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А.Бесекерский, Е.П.Попов – М.: Наука, 1972. – 767 с.
7. Беляник П.Н. Промышленные роботы. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
8. Бойова роботизована платформа «Ласка» [Електронний ресурс] // <https://defence-ua.com/index.php/home-page/3065-v-ukrajini-viprobuvali-bojovu-robotizovanu-platformu-laska-video>
9. Волосников С.А. Методика определения критической скорости движения гусеницы платформы по заносу /С.А. Волосников/ Механіка та машинобудування. - Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. - №1. – с. 36-44.
10. Герасун В.М. Исследование оптимальных конфигураций манипулятора трипода с поворотным основанием/В.М.Герасун, В.В.Жога, И.А.Несмиянов, Н.С.Воробьева, В.С. Дяшкин, Титов В.В.// Мехатроника, автоматизация, управление - К.: 2013. - №6. - С.21-26.
11. Гуржій А.А. Формоутворення криволінійних поверхонь на верстатах з паралельними кінематичними структурами: дис. канд. наук: 05.03.01 / Гуржій Андрій Андрійович; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». - Київ, 2015.
12. Дем'яненко А.С. Система контролю просторового положення інструменту верстата з механізмами паралельної структури: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Дем'яненко Анатолій Сергійович; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – Київ, 2015.

- 
13. Журавлев Ю.Н. Кинематическое и динамическое исследование промышленного робота / Ю.Н. Журавлев / – Псков : Издательство ППИ, 2008. – 121 с. – ISBN 978-5-91116-036-4.
14. Исакова Т.О. Проблеми формування стратегічних пріоритетів державної політики щодо розвитку робототехніки: перспективи для України. /Т.О. Исакова/ Офіційний сайт Нац. Ін-ту стратегічних досліджень від 13.09.2019 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/informaciyni-strategii/problemi-formuvannya-strategichnikh-prioritetiv-derzhavnoi>.
15. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы / Ю.Г. Козырев / Справочник. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1988 – 392с.
16. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 376 с.
17. Конюх В.Л. Основы робототехники / В.Л. Конюх / – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 281 с. – ISBN 978-5-222-12575-5.
18. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. /А.И. Корендясев / – Москва: Наука, 2006. – 383 с. – ISBN 5-02-033952-0.
19. Костюк В.И. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация / В.И. Костюк, А.П. Гавриш, Л. С. Ямпольский, А. Г. Карлов / Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. - К.: Вища школа, 1985. – 359с.
20. Кудрявцев В.Н. Детали машин. – Л.: Машиностроение, 1980. – 464 с.
21. Кучеров Д.П. Перспективи розвитку роботизованих систем військового призначення /Д.П. Кучеров, З.М. Копилова, Ю.В. М'якухін// Системи озброєння і військова техніка. – 2007. – Випуск 1 (9). – С. 44-46.
22. Левков О. Українським саперам допоможуть роботизовані системи/О.Левков/ [Електронний ресурс] // Defense Express. 2018. 23 січня. URL: <https://defence-ua.com/index.php/statti/4044-ukrayinskym-saperam-dopomozhut-robotyzovani-sistemy>.
23. 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>.
24. Лойцянский Л.Г. Курс теоретической механики /Л.Г. Лойцянский//. – Москва: Наука, 1985. – 420 с.
25. Лойцянский Л.Г. Курс теоретической механики в 2-х томах. Т. II. Динамика. 6-е изд. перераб. и доп. /Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – Москва: Наука, 1983. – 640 с.
26. Мартыненко А.В. Компьютерное моделирование динамики и напряженно-деформированного состояния элементов объектов бронетанковой техники, подвергающихся воздействию гидрогазодинамических нагрузок /А.В. Мартыненко, А.Ю. Танченко, С.Г. Бруль, А.Ю. Васильев, О.В. Веретельник// Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск «Машинознавство та САПР» - Харьков: НТУ «ХПИ», 20104. - № 29. – С. 289-294.

- 
27. Маслова О.О. Применение методов синтеза и математического моделирования для исследования движущих систем наземных роботов / О.О.Маслова, К.Е.Куванова // «САПР и графика», Москва, - №4, 2006, с.12-15.
28. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний / Р.Мэнли – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
29. Основи внутрішньої балістики [Електронний ресурс] // [http://ukrlegion.com/disciplini/vogneva\\_pidgotovka/osnovi\\_vnutrishnoji\\_balistiki.html#XQUC2BYzY2w](http://ukrlegion.com/disciplini/vogneva_pidgotovka/osnovi_vnutrishnoji_balistiki.html#XQUC2BYzY2w).
30. Офіційний сайт компанії ТОВ “Limpid Armor” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://limpidarmor.com/>.
31. Офіційний сайт компанії ТОВ “Інфоком ЛТД”. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ia.ua/uk/resheniya/bezpilotni-tekhnohiiyi/>.
32. Офіційний сайт компанії ТОВ “КБ “Роботікс” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.robotics.run/>.
33. Офіційний сайт компанії ТОВ “А. Drones” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://adrones.com.ua/ru/robots/>.
34. Павленко І.І. Промислові роботи: Основи розрахунку та проектування / І.І. Павленко–Кіровоград: КНТУ, 2007. – 420 с.
35. Павловський М.А. Теоретична механіка / М.А.Павловський. - Київ: «Техніка», 2002. – 510 с.
36. Пат. 111381 України на винахід. Верстат паралельної кінематики з мехатронною системою активного контролю" / Дем'яненко А.С., Струтинський В.Б. / №а201404648 заяв. 30.04.2014, опубл. 25.04.2016.
37. Патент № 2356775, МПК В62D 57/032. Шагающий вездеход / Алиев А.С., Алиев С.А., заявка №2007118031/11 від 14.05.2007, Опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15.
38. Патент № 2642020, МПК В62D 57/032. Шагающее устройство / Артамонов Ю. П., Близнец Д. П., Близнец М. П., Близнец П. М., Бошляков И. А., Коновалов К.В., Лапшов В.С., Метасов И.Е., заявка №2016125318 від 24.06.2016, Опубл. 23.01.2018 Бюл. № 3.
39. Патент № 75991, МПК В25J 11/00, В62D 57/00. Крокующий рушій малогабаритного робота / Шевченко А. І., Полівцев С. О., заявка №20040604331 від 04.06.2004, Опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6.
40. Патент України на корисну модель №73308. МПК (2006) F16H25/22/ Привід точних лінійних переміщень для механізму паралельної кінематики / Струтинський С.В., Юрчишин О.Я. (UA). – №u201115661; заявл.30.12.2011; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18. – 3с.
41. Патент України на корисну модель №73729. МПК (2012) В21D5/00/ Механізм-гексапод / Струтинський С.В., Гуржій А.А. (UA). – №u201202093; заявл. 23.02.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл. №19. – 3с.
42. Патент України Машина інженерної розвідки та розмінування / Дачковський Володимир Олександрович, Кізяк Ярослав Олексійович / Патент України №84430



---

№ заявки u2013 03522 22.03.2013 МПК (2011.01) F41H 11/12 опубл. 25.10.2013, бюл. №20.

43. Патент України Модульно структурований військовий наземний робот для бойових і спеціальних операцій / Беліков В.Т., Васильєв В.В., Лещенко О.І., Поповиченко О.В., Толстой О. В. / Патент України №88585 № заявки а 200812547 27.10.2008 МПК (2009) F41H 13/00 опубл. 26.10.2009, бюл. №20.

44. Патент України Наземна допоміжна бойова робототехнічна машина модульного типу для супроводження бронетанкового озброєння і техніки / Беліков В.Т., Борисюк М.Д., Дяченко О.Ф., Клименко В.М., КовальА.А., Лещенко О.І., Магерамов Л.К-А. / Патент України №101993 № заявки а 2011 06651 27.05.2011 МПК F41H 7/00 опубл. 10.08.2011, бюл. №15.

45. Патент України Бойова модульна наземна робототехнічна машина постійного моніторингу і охорони (захисту) стратегічних об'єктів та кордонів держави / Толстой О.В., Клименко В.М., КовальА.А., Беліков В.Т., Грачов М.М. / Патент України №99214 № заявки а2011 05289 26.04.2011 МПК F41H 7/00 опубл. 10.08.2011, бюл. №15.

46. Патент України Наземний контр робот з підривними елементами ройової протидії / Григорєв А.П., Даник Ю.Г., Чепков І.Б., Кравчук О.І., Ковалішин С.С., Клименко В.М., Беліков В.Т. / Патент України №103716 № заявки а2014 03135 28.03.2014 МПК F41H 7/00 опубл. 25.09.2014, бюл. №18.

47. Патент на корисну модель 140446 [Мобільний робототехнічний комплекс з дистанційним керуванням](#), МПК B25J 5/00, F41H 13/00 / Струтинський В. Б., Гуржій А. М., Вакуленко С. Ю., Новак В.В., заявл. 18.07.2019, опубл. 25.02.2020, бюл. № 4.

48. Патент России № 2241594. Мобильный робототехнический комплекс // 2004. Бюл. №34 / Лукьянчиков В.В.

49. Патент России № 2487007. Мобильный робот // 2013. Бюл. №19 / Алешин А.А.

50. Патент России Сборный мобильный робот // Патент России № 174140. 2017. Бюл. №28 / Прокопович Г.А.

51. Патент РФ на изобретение 2431561 С2. Вакуумный захватный корректирующий модуль. МПК B25I 15/06. Сысоев С.Н., Кузнецов Р.В., Пронин А.В., Александров И.В., Пасечник М.А., заявл. 07.12.2009, опубл. 20.10.2011, бюл. № 29.

52. Патент РФ на изобретение 2680172 С2. Насадка для имитации боевой стрельбы. МПК F41G 3/26, F41G 3/2616. Чуркин М.Д., Белов О.П. заявл. 13.11.2018, опубл. 18.02.2019, бюл. № 5.

53. Патент України 146447 [Мобільний робототехнічний комплекс з дистанційним керуванням](#), МПК B25J 5/00, F41H 13/00 / Струтинський В. Б., Гуржій А.М., Вакуленко С. Ю., Новак В.В., заявл. 18.07.2019, опубл. 2.02.2023, бюл. № 4.

54. Патент України на винахід № 105565. МПК (2014.01) B25J11/00/ Маніпулятор для просторових переміщень / Струтинський С.В. (UA). - №a201211479; заявл. 04.10.2012; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10.

55. Патент України на винахід № 120668 [Крокуючий пристрій мобільного робота](#), МПК B62D 57/032 / Струтинський В.Б.; Юрчишин О.Я.; Бондаренко Н.Б.; Келавець Ю.Р. / заявл. 20.06.2018, опубл. 10.01.2020, бюл. № 1.

56. Патент України на корисну модель 109927 Електронний модульний тренажер стрілецький. МПК F41G 3/26, F41J 5/10. Семиглазов В.В., Рибченко С.М., Удачин А.А., заявл. 22.06.2016, опубл. 12.09.2016, бюл. № 17. [LA2]

57. Патент України на корисну модель 45224 Захватний пристрій для крихких деталей. МПК B25J 15/00, Кузнецов Ю.М., Кузьміч І.М., Засць В.С., опубл. 16.06.2009, заявл. 26.10.2009, бюл. № 20.

58. Патент України на корисну модель № 130526 "Крокуючий пристрій мобільного робота" / Струтинський В.Б., Юрчишин О.Я., Келавець Ю.Р., Бондаренко Н.С., бюл. №23/2018, 10.12.2018.

59. Патент України на корисну модель №73308. МПК (2006) F16H25/22/ Привід точних лінійних переміщень для механізму паралельної кінематики / Струтинський С.В., Юрчишин О.Я. (UA). – №u201115661; заявл.30.12.2011; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18. – 3 с.

60. Патент України Пристрій імітації віддачі при пострілі / Струтинський Василь Борисович, Гуржій Андрій Миколайович, Юрчишин Оксана Ярославівна. Заявка на винахід a202104726 від 18.08.21, заявник – КПП ім. Ігоря Сікорського.

61. Пелевин Л.Е. Определение равновесной формы продольной линии контакта колеса с пневматической шиной при взаимодействии с деформирующейся опорной поверхностью / Л.Е. Пелевин, Г.А. Аржаев, М.Н. Балака // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2004, вип. 70. – С. 44-48.

62. Пелевін Л.Є. Кінематика, кочення колеса з пневматичною шиною по опорній поверхні, що деформується / Л.Є. Пелевін, Г.О. Аржаєв, М.М. Балака // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2004, вип. 70. – С. 10-15.

63. Пелевін Л.Є. Теоретичні основи взаємодії пружно-деформованих виконавчих елементів будівельної техніки і робочого середовища з врахуванням термореологічних процесів: монографія /Л.Є. Пелевін, М.М. Балака, М.О. Пристайко, Г.М. Мачишин, Г.О. Аржаєв// - К.: Інтерсервіс. – 2015. – 232 с.

64. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей / В.С.Пугачев – Москва: Наука, 1968. – 368 с.

65. Сердюк О. Залізні воїни майбутнього. Тренди ринку бойових роботів /Олексій Сердюк/ [https://zbroya.info/uk/blog/11902\\_zalizni-voyini-maibutnogo-trendi-rinku-boiovikh-robotiv//](https://zbroya.info/uk/blog/11902_zalizni-voyini-maibutnogo-trendi-rinku-boiovikh-robotiv//).

66. Слюсар В.І. Ключові суб'єкти НАТО з розвитку наземних роботизованих комплексів /В.І. Слюсар // Науково-практична конференція «Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності». –

---

14-15 листопада 2019 р. – Львів: Національна академія Сухопутних військ ім. Гетьмана Петра Сагайдачного, 2019. С. 70.

67. Слюсар В.І. Мінімальні вимоги до спроможностей як складова концепції розвитку наземних роботизованих комплексів /В.І. Слюсар // Науково-практична конференція «Актуальні проблеми застосування Збройних Сил України, управління ними, їх оперативного та матеріально технічного забезпечення». – 17-18 вересня 2019 р., ЦНДІ ЗСУ. [https://slyusar.kiev.ua/CNDI\\_2019\\_1.pdf](https://slyusar.kiev.ua/CNDI_2019_1.pdf)

68. Слюсар В.І. Нова система досліджень і розробок сухопутних військ США /В.І. Слюсар // Озброєння та військова техніка. - №3. – 2019. С. 123-128.

69. Спину Г. О. Робототехника: Монографія. / Г.О. Спину, В. Е.Юмашев // ЖДТУ – Житомир, 2007. – 332 с.

70. Струтинський В. Методологія розроблення схемних рішень маніпуляторів наземних роботизованих комплексів для виконання спеціальних операцій /В. Струтинський, О. Юрчишин/ Матеріали XXIV міжнародної науково-технічної конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”; м. Київ; 29.05.2019.

71. Струтинський В. [Розвиток основних положень проектування маніпуляторів мобільних роботів спеціального призначення адаптованих для роботи з небезпечними об'єктами](#) /В. Струтинський, О. Юрчишин, О. Кравець/ Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, що проходила в рамках ФОРУМУ ІНЖЕНЕРІВ-МЕХАНІКІВ, м. Київ – м. Херсон, 7 - 10 вересня 2021 року.

72. Струтинський В.Б. Визначення динамічних стохастичних сил різання, які виникають при обробці об'єктів на мобільних верстатах роботах шляхом розкладу сил та переміщень по кусково-постійним ортогональним функціям Уолша /Струтинський В.Б., Юрчишин О.Я., Гаврушкевич А.Ю., Полунічев В.Е./ Вісник Херсонського національного технічного університету. №4. – 2017. С. 111-120.

73. Струтинський В.Б. Вібраційні процеси механічної обробки /Струтинський В.Б., Перфілов І.В./ К.: Хімджест. - 2015. - 550 с.

74. Струтинський В.Б. Головні аспекти проектування маніпуляторів мобільних роботів спеціального призначення /В.Б. Струтинський, О.Я. Юрчишин, О.М. Кравець/ Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» - 2020”, 6-9 жовтня 2020 року, м. Київ.

75. Струтинський В.Б. Застосування енергетичних методів для визначення динамічних навантажень на наземний роботизований комплекс спеціального призначення /В.Б. Струтинський, А.М. Гуржій, О.Я. Юрчишин/ Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті», Харків, 18-20 листопада 2020 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – 162-164.

76. Струтинський С.В. Просторові системи приводів: Монографія /Струтинський С.В., Гуржій А.А. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с.

77. Струтинський В.Б. Застосування пневмопривода імпульсного руху для імітації дії віддачі на роботизований комплекс оснащений стрілецьким озброєнням

---

/В.Б. Струтинський, О.М. Гусляков, О.Я. Юрчишин/ Інтернет конференція «Гідропневмоприводи машин». – Вінниця: ВНТУ, травень, 2020 р.

78. Струтинський В.Б. Математичне моделювання динамічних характеристик багатокоординатних верстатів з використанням теорії нечітких множин / В.Б. Струтинський, Н.В. Гаврушкевич, В.Е. Полунічев// Технологічні комплекси, №1(9). – 2014. – С. 74-86.

79. Струтинський В.Б. Методологія наукових досліджень /Струтинський В.Б., Гуржій А.М./ Житомир: ПП «Рута», 2018 – 581с.

80. Струтинський В.Б. Мобільні промислові роботи /Струтинський В.Б., Гуржій А.М./ Житомир: ПП «Рута», 2018 – 542 с.

81. Струтинський В.Б. Моделювання впливу дорожніх умов на функціонування наземного роботизованого комплексу /В.Б. Струтинський, О.М. Гусляков, О.Я. Юрчишин/ Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта», м. Херсон, 10-13 вересня 2019 р., с. 346-349.

82. Струтинський В.Б. Наземні роботизовані комплекси, оснащені системою повітряної підтримки /В.Б. Струтинський, О.М. Кравець, О.Я. Юрчишин, С.М. Костриця/ Матеріали VIII МНПК «Проблеми координації військово-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», 13-16.10.2020, м. Київ.

83. Струтинський В.Б. Обґрунтування використання штучних нейронних мереж для компенсації кінематичних та динамічних похибок верстата паралельної кінематики /В.Б. Струтинський, А.С. Дем'яненко // Журнал інженерних наук. Технологія машинобудування, верстати та інструменти. – 2014. - №1. – С.6-11.

84. Струтинський В.Б. Обладнання для вібраційної обробки / Струтинський В.Б., Симонюк В.П., Денисюк В.Ю./ Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади», випуск №10(червень 2017), Луцьк, с.176-185.

85. Струтинський В.Б. Особливості конструювання наземних роботизованих комплексів для роботи з небезпечними об'єктами /В.Б. Струтинський, О.Я. Юрчишин/ Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2019), м. Чернігів; 14.05.2019.

86. Струтинський С.В. Визначення стохастичних динамічних навантажень, які виникають на особливих ділянках траєкторії руху виконавчого органу просторової системи приводів / С.В. Струтинський, А.А. Гуржій // Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут», серія Машинобудування. – Київ, 2012. – № 66. Т. 1.– С.38-45.

87. Струтинський В.Б. Проблеми розроблення наземних роботизованих комплексів спеціального призначення /В.Б. Струтинський, А.М. Гуржій, О.Я. Юрчишин/ Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції Сучасні технології промислового комплексу – 8-9 вересня 2020, м. Херсон, ХНТУ.

88. Струтинський В.Б. Функціонально-орієнтовані мехатронні модулі для наземних робототехнічних комплексів військового призначення /В.Б. Струтинський,

---

А.С. Довгополий, О.М. Гусяков/ Матеріали конференції “Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”, Чернігів, 3-4 вересня 2020.

89. Сырякин В.И. Интеллектуальные робототехнические и мехатронные системы. / В.И. Сырякин / – Томск, 2017. – 256 с. – ISBN 978-5-93629-586-7.

90. Сяньвен Кун Структурный синтез параллельных механизмов /Кун Сявень, Климент Гросселин// - Москва: ФИЗМАТЛИТ. – 2012. – 275 с.

91. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Пер. с англ. Л.Г.Корнейчука / С.П.Тимошенко, Д.Х.Янг, У.Уивер-М.: Машиностроение, 1985.-472 с.

92. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов / С.П.Тимошенко – Москва: Наука, 1960. – 379 с.

93. Чуприна В. М. Наукові основи оцінки динамічної якості верстатів і їх вузлів при агрегатно-модульному проектуванні: дис. д-ра наук: 05.03.01 / Чуприна Володимир Михайлович; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2017.

94. Универсальный робот для разминирования AVENGER ROV [Електронний ресурс] // Інтертрейд-Україна. URL: <http://intertrade-ukraine.com/oborudovanie/robototekhnicheskie-kompleksy/universalnyj-robot-dlya-razminirovaniya-avenger-rov>.

95. Циклоидальный редуктор [Електронний ресурс] // ТОРГОВО-ТЕХНИЧЕСКИЙ АЛЬЯНС «АРС». 2017. 17 травня. URL: <https://www.ttaars.ru/about/stati/tsikloidalnyy-reduktor>.

96. Чепков І. Б. Концептуальні засади створення вітчизняних ударнорозвідувальних наземних роботизованих комплексів важкого класу /І.Б. Чепков, А.С. Довгополий, О.М. Гусяков // Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ. 2019. № 3 (23). С. 16–25.

97. Шугуров О. С. Розвиток військових наземних роботизованих систем в контексті нових концепцій управління: перспективи України /Шугуров Олександр Сергійович/ <http://sp.niss.gov.ua/content/articles/files/27-1445867323.pdf>.

98. Юревич Е.И. Устройство промышленных роботов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 333 с.

99. Ямпольский Л.С. Промышленная робототехника. – К.: Техніка, 1984 – 204 с.

100. Andros MarkV-A1 [Електронний ресурс] // Army Guide. URL: <http://www.army-guide.com/rus/product.php?prodID=5960&printmode=1>.

101. Artur Kuptel, Andrew Williams. Multinational Capability Development Campaign (MCDC) 2015-2016. Product 1: Study Report: Unmanned Autonomous System (UAxS) in the Future – Evolving Technology, Operational Implications and Opportunities. // NATO, Allied Command Transformation (ACT). – 2016. – 244 p.

102. Autonomous Military Robotics: Risk, Ethics and Design [Електронний ресурс]. US Department of Navy, Office of Naval Research. December, 20. 2008. 112 p. Available at: [https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=phil\\_fac](https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=phil_fac).

103. Baoquan Li ; Yongchun Fang ; Guoqiang Hu ; Xuebo Zhang Model-Free Unified Tracking and Regulation Visual Servoing of Wheeled Mobile Robots/

---

Baoquan Li ; Yongchun Fang ; Guoqiang Hu ; Xuebo Zhang /Journal Sensors and Actuators A: Physical, IEEE Transactions on Control Systems Technology (Volume 24, Issue: 4 ), 2016 pp. 1328 – 1339.

104.Botvinovska S. General procedure for determining the geometric parameters of tools in the technological systems involving machining by cutting /S. Botvinovska, G. Getun, A. Zolotova, I. Korbut, T. Nikolaenko, V. Parnenko, R. Rodin/ [Engineering technological systems. Vol. 1 No. 1 \(109\) \(2021\)](#). pp. 6-12.

105.Burennikov, Y., Kozlov, L., Pyliavets, V., & Piontkevych, O. (2017, June). Mechatronic Hydraulic Drive with Regulator, Based on Artificial Neural Network. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 209, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.

106.Cycloidal drive [Електронний ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cycloidal\\_drive](https://en.wikipedia.org/wiki/Cycloidal_drive).

107.Digital Infantry Battlefield Solution. Research and Innovation. DIBS project. Part III [Електронний ресурс]. Editors Ugis Romanovs Maris Andzans. MILREM ROBOTICS. March 2019. Available at: [https://www.academia.edu/38625208/Digital\\_Infantry\\_Battlefield\\_Solution.\\_Research\\_and\\_Innovation.\\_DIBS\\_project.\\_Part\\_Three](https://www.academia.edu/38625208/Digital_Infantry_Battlefield_Solution._Research_and_Innovation._DIBS_project._Part_Three).

108.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>.

109.Dragon Runner – ультракомпактный разведывательный робот [Електронний ресурс] // OHRANA.RU - електронне видання. URL: <http://ohrana.ru/equipment/technique/3134/>.

110.Final Report of Task Group SAS-097 (STO-TR-SAS-097) “Robots Underpinning Future NATO Operations”. – NATO Science and Technology Organization, AC/323(SAS-097)TR/776. – May 2018. – 188 p.

111.Francesco Meoni and Marco Carricato. Design of Nonovercon strained Energy-Efficient Multi-Axis Servo Presses for Deep-Drawing Applications / Journal of Mechanical Design , Volume 138, (6), 2016, (9 pages).

112.Georg Nawratil and Josef Schicho Self-motions of pentapods with linear platform // Robotica , First View Article Copyright © Cambridge University Press 2015 DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574715000843> (About DOI), 29 pages. Published online: 02 December 2015.

113.Goris Kristof Autonomous mobile robot mechanical design / Kristof Goris / Wheeled mobile robots.

114.Ho-Seung Jeong, Jong-Rae Cho Optimal design of head expander for a lightweight and high frequency vibration shaker / Ho-Seung Jeong, Jong-Rae Cho / [International Journal of Precision Engineering and Manufacturing](#), July 2016, Volume 17, Issue 7, pp. 909-916.

115.Hui Cheng. Dynamics and control of parallel manipulators with actuation redundancy// Department of Electrical and Electronic Engineering, The Hong Kong

---

University of Science and Technology, May, 2001. <http://www.ee.ust.hk/~atc/pubs/mthesis4.pdf>.

116. Hyun-Min Joe Jun-Ho Oh Balance recovery through model predictive control based on capture point dynamics for biped walking robot / Hyun-Min Joe Jun-Ho Oh / Robotics and Autonomous Systems Volume 105, July 2018, Pages 1-10.

117. International Patent Classification (IPC) [Электронный ресурс] // World Intellectual Property Organization. URL: <https://www.wipo.int/classifications/ipc>.

118. Jing-Shan Zhao, Zheng-Fang Yan, Li Ye Design of planar four-bar linkage with n specified positions for a flapping wing robot // Mechanism and Machine Theory Volume 82, December 2014, Pages 33–55.

119. Jun Qian, Bin Zi, Daoming Wang, Yangang Ma, Dan Zhang The design and development of an omni-directional mobile robot oriented to an intelligent manufacturing system / Jun Qian, Bin Zi, Daoming Wang, Yangang Ma, Dan Zhang/ Sensors 2017, 17.

120. KAPLAN [Электронный ресурс] // Army Guide. URL: <http://www.army-guide.com/rus/product5044.html>.

121. KAPLAN Explosive Ordnance Disposal Robot [Электронный ресурс] // Aselsan. URL: <https://www.aselsan.com.tr/en-us/capabilities/unmanned-systems/unmanned-vehicles/kaplan-explosive-ordnance-disposal-robot>.

122. Korayem M.H., Dehkordi S.F. Derivation of motion equation for mobile manipulator with viscoelastic links and revolute–prismatic flexible joints via recursive Gibbs–Appell formulations / Robotics and Autonomous Systems, Volume 103, May 2018, Pages 175-198.

123. Kot Tomas, Novak Petr Application of virtual reality in teleoperation of the military mobile robotic system TAROS / Kot Tomas, Novak Petr / International journal of advanced robotic systems, January-February 2018, pp. 1-6.

124. Kristan Marlow, Mats Isaksson, Jian S. Dai and Saeid Nahavandi Motion Force Transmission Analysis of Parallel Mechanisms With Planar Closed-Loop Subchains / Kristan Marlow, Mats Isaksson, Jian S. Dai and Saeid Nahavandi / Journal of Mechanical Design, Volume 138,(6), 2016, p. 21-32.

125. Luo Zirong Mobile-based structure design of wheeled mobile robot / Zirong Luo, Jianzhong Shang, Guowu Wei, Lei Ren / Mechanical Sciences Vol. 9, 2018, pp. 103-121.

126. Mansoor Alghooneh; Christine Qiong Wu; Masoumeh Esfandiari A Passive-Based Physical Bipedal Robot With a Dynamic and Energy-Efficient Gait on the Flat Ground // Journal Transactions on Mechatronics (Volume:21, Issue:4 ). 2016. Page(s):1977 – 1984.

127. Maris Andzans, Ugis Romanovs. Digital Infantry Battlefield Solution. Concept of Operations. Part Two. – Riga Stradins University. – 2017. [[https://www.researchgate.net/publication/318792490\\_Digital\\_Infantry\\_Battlefield\\_Solution\\_Concept\\_of\\_Operations\\_Part\\_Two](https://www.researchgate.net/publication/318792490_Digital_Infantry_Battlefield_Solution_Concept_of_Operations_Part_Two)].

128. MarkV-A1 [Электронный ресурс] // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/MarkV-A1> (дата звернення: 01.06.2019).

129. Min Wang, Tao Zan, Xiangsheng Gao, Songwei Li. Suppression of the time-varying vibration of ball screws induced from the continuous movement of the nut using

---

multiple tuned mass dampers /[Min Wang](#), [Tao Zan](#), [Xiangsheng Gao](#), [Songwei Li](#)/ [International Journal of Machine Tools and Manufacture](#), [Volume 107](#), August 2016, Pages 41-49.

130.Minh-Duc Tran, Hee-Jun Kang. A novel adaptive finite-time tracking control for robotic manipulators using nonsingular terminal sliding mode and RBF neural networks / [International Journal of Precision Engineering and Manufacture](#), Volume 17, Issue 7, pp. 863-870.

131.Nina Robson and Shramana Ghosh. Geometric design of planar mechanisms based on virtual guides for manipulation // [Robotica](#) / First View Article Copyright © Cambridge University Press 2015 DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0263574715000272> (About DOI), 16 pages. Publishedonline: 29 April 2015.

132.Patent CN203837578U [Chinese](#). Shooting recoil force similar for light weapon. Yu Kaiping, Tang Bing, Hu Liming, Zhou Chen Xiangchun, Wang Feng, Zhang Weizh. Current Assignee PLA MILITARY ACADEMY Worldwide applications 2014 [CN](#) Application CN201420236146.1U events 2014-05-09 [Application filed by PLA MILITARY ACADEMY](#) 2014-05-09 [Priority to CN201420236146.1U](#) 2014-09-17 Application granted 2014-09-17 [Publication of CN203837578U](#) Status Expired - Fee Related 2024-05-09 Anticipated expiration.

133.Patent CN2643268 [Chinese](#) Inventor [梁宝来](#) [张大捷](#) [李玉森](#) Worldwide applications 2003 [CN](#) Application CN 200320112239 events 2003-11-19 [Application filed by 梁宝来](#) 2003-11-19 [Priority to CN 200320112239](#) 2004-09-22 Application granted 2004-09-22 [Publication of CN2643268Y](#) 2013-11-19 Anticipated expiration Status Expired - Fee Related/ [LA4]

134.Patent TW201500715 (A) [Chinese](#). Recoil simulation device. Kung Shu-Ming, Tseng Tsung-Ying, Kuo Feng-Hung, Huang Chih-Yuen. CPC F41A33/06, F41B11/60. TW20130122666 20130626. TW1540304 (B). [LA6]

135.Paul Ritzen, Erik Roebroek, Nathan van de Wouw, Zhong-Ping Jiang.Trailer Steering Control of a Tractor–Trailer Robot / [IEEE Transactions on Control Systems Technology](#) (Volume:24, Issue:4 ), 2016.pp. 1240 – 1252.

136.Peng Qi, Chen Qiu, Hongbin Liu, Jian S. Dai. A Novel Continuum Manipulator Design Using Serially Connected Double-Layer Planar Springs/ [Journal Transactions on Mechatronics](#) (Volume:21 , Issue: 3 )2015. Page(s):1281-1292.

137.Pouya Tavousi, Kazem Kazerounianand Horea Ilies Synthesizing Functional Mechanisms From a Link Soup / [Journal of Mechanical Design](#), Volume 138 (6), 2016, (13 pages).

138.Qian Jun The design and development of an omni-directional mobile robot oriennnted to an intelligent manufacturing system / Jun Qian, Bin Zi, Daoming Wang, Yangang Ma, Dan Zhang / [Sensors](#) 2017, 17, 2073.

139.Ricerca Tecnologia c Innovazione [Електронний ресурс]. Stato dell'Arte 2016. Ministero Della Difensa. Segretariato Generale della Difensa e Direttore Nazionale degli Armamenti (Technology Research and Innovation. State of the Art 2016. Secretary General of Defence and National Armaments Director). 383 p.



- 
140. Robert C.P. Monte Carlo Statistical Methods./ C.P. Robert, G.Casella. – 2nd edition, Springer, 2004. – 683 p.
141. Rubinstein R. Y. Simulation and the Monte Carlo Method. /R.Y. Rubinstein, D.P. Kroese – 2nd edition, Wiley, 2007. – 345 p.
142. Rybak L. Computer-Aided Modeling of Dynamics of Manipulator-Tripod with Six Degree of Freedom /L.Rybak, E. Gaponenko, A. Chichvarin, V. Strutinsky, R. Sidorenko / World Applied Sciences Journal. – N 25(2). - 2013. - P.341-346.
143. Sebastien Briot, Wisama Khalil. Dynamics of Parallel Robots: From Rigid Bodies to Flexible Elements. - Springer International Publishing Switzerland, 2015. - 341p.
144. Strutinsky V. Application of hydraulic automation equipment for the efficiency enhancement of the operation elements of the mobile machinery/V. Strutinsky, L. Polishchuk, L. Kozlov, Yu. Burennikov, V. Kravchuk/ Publisher Politechnika Lubelska, Journal: Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 2019, Volume 9, nr 2, p. 72-78 DOI: 10.5604/01.3001.0013.2553.
145. Strutinsky V. Determination of static equilibrium conditions of a mobile terrestrial robotic complex /V. Strutinsky, A. Hurzhii, L. Kozlov/ Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019, № 5, pp. 119-126. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362.
146. Strutinsky V. Regularities in the occurrence and propagation of wave processes in the kinematic chains of a mobile robotic machine tool /V. Strutinsky, Yu. Burennikov, L. Kozlov/ Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy. Published by "Gheorghe Asachi" Technical University of Iași. 2017.
147. Strutinsky V. The development of mechatronic active control system of tool spatial position in parallel kinematics machine tool /Strutinsky Vasil, Anatoliy Demyanenko/ Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol.54, №3 (2016), pp. 757-768.
148. Strutinsky V.B. Determination of development grounds and characteristics of mobile multi-coordinate robotic machines for materials machining in field conditions /V.B. Strutinsky, A.A.Hurzhii, O.V. Kolot, V.E.Polunichiev/ Науковий вісник Національного гірничого університету / Науково-технічний журнал №5 (155), 2016 (Дніпро), с.43-51.
149. Strutinsky V.B. Dynamic characteristics of a mobile robot manipulator built on the basis of a mechanism with parallel kinematic couplings /V.B. Strutinsky/ Зб.наук.праць «Сучасні технології в машинобудуванні», Харків, НТУ «ХПІ», 2018.– Вип.1 (13), с. 192-206.
150. Strutinsky V.B. Mathematical modeling of dynamic loads on the ground robotic complex of special purpose /V.B. Strutinsky, A.M. Gurzhii and O. Y. Yurchyshyn/ [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1021, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport \(EET 2020\) 18th-20th November, Kharkiv, Ukraine](#), 7 pages.
151. Strutinsky V.B. Substantiating the requirements to functional indicators for the manipulators of mobile robotic demining complexes /V.B. Strutinsky, Kotsiuruba V., Dovhopoliy A., Husliakov O., Budianu R., Kolos O., Hrechka I. / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774 (№5/7(101) 2019/ p.42-50.

- 
152. Strutinsky V.B., Demyanenko A.S. The development of mechatronic active control system of tools patial position in parallel kinematics machine tool / Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 54 (3), 2016, hh/ 757-768.
153. Strutynskiy S. Determination of the influence of soil irregularities on dynamic processes in caterpillar engines of a terrestrial robotic complex /S. Strutynskiy, R. Semenchuk/ IOP Conference Series Materials Science and Engineering/ Volume 1021, Issue 1, pp. 012050 DOI:[10.1088/1757-899X/1021/1/012050](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012050).
154. Strutynskiy S. Investigation of the accuracy of the manipulator of the robotic complex constructed on the basis of cycloidal transmission /S. Strutynskiy, R. Semenchuk/ Technology audit and production reserves /Vol. 4 No. 1(60) (2021): Industrial and technology systems <http://journals.uran.ua/tarp/issue/view/14355>.
155. Strutynskiy V.B. Determination of development groundsand characteristics of mobile multi-coordinate robotic machines for materials machining in field conditions / V.B. Strutynskiy, A.A. Hurzhiy, O.V. Kolot, V.E. Polunichev// Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2016. - №5. – С. 43-51.
156. Strutynsky V.B. Triangular optical system of precise positioning of the ground robotic / V.B. Strutynsky, T.Yu. Kyrychok, V.G. Oliynyk / Fifteenth International Conference on Correlation Optics, Volume 11369, 16-19 September 2021 Chernivtsi, Ukraine. pp. 212-219.
157. Strutynskiy S. Mathematical Modeling Of Dynamic Processes Of The Terrestrial Robotic Complex Manipulator /S. Strutynskiy, R. Semenchuk/ Journal of the Technical University of Gabrovo, 60 (2021). Gabrovo, Bulgaria, pp. 65 –68. <http://izvestia.tugab.bg/index.php?m=20&tom=19>
158. Strutynskiy, S. Design of parallel link mobile robot manipulator mechanisms based on functionoriented element bas /S. Strutynskiy, I. Nochnichenko, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, 4 (7-100), pp. 54–64. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/174613>.
159. Sumitomo Cyclo Drive 6000 [Електронний ресурс] // ТД ИРБИС. URL: <https://www.irbis.ua/ru/produktsiya-i-uslugi/motor-reduktory/sumitomo.html> (дата звернення: 01.06.2019).
160. TALON Tracked Military Robot [Електронний ресурс] // Army Technology. URL: <https://www.army-technology.com/projects/talon-tracked-military-robot/>.
161. Tao Liang, Dun Lu, Xiaojun Yang, Jun Zhang, Xiaobo Ma, Wanhua Zhao, Feed fluctuation of ball screw feed systems and its effects on partsur face quality / [International Journal of Machine Tools and Manufacture](https://doi.org/10.1016/j.jmatsci.2016.02.011), Volume 101, February 2016, Pages 1-9.
162. The U.S. Army Robotic and Autonomous Systems Strategy [Електронний ресурс]. Maneuver, Aviation, and Soldier Division Army Capabilities Integration Center. March, 2017. 31 p. Available at: [https://www.tradoc.army.mil/Portals/14/Documents/RAS\\_Strategy.pdf](https://www.tradoc.army.mil/Portals/14/Documents/RAS_Strategy.pdf).
163. The UDC Summary (UDCS) [Електронний ресурс] // UDC Consortium. URL: <http://www.udcsummary.info/php/index.php?tag=6&lang=uk>.

- 
164. Tomas Kot and Petr Novak Application of virtual reality in teleoperation of the military mobile robotic system TAROS / International Journal of Advanced Robotic Systems January-February 2018, pp. 1-6.
165. Volos Ch.K. Chaotic autonomous mobile robot for military missions / Ch.K. Volos, N. Doukas, I.M. Kyprianidis, I.N. Stouboulos, T.G. Kostis // Recent Advances in telecoimmunications and circuit design/ p.197-202
166. Volos Ch.K., Motion Direction control of a robot based on chaotic synchronization phenomena / Ch.K.Volos // Journal of automation, Mobile Robotics and intelligent systems, Vol 7(2), 2013, pp. 64-69
167. What is a Cycloidal Speed Reducer? [Электронный ресурс] // Darali Drives. URL: <http://www.darali.com/page17.html>.
168. Xiaogeng Jiang, Robert J. Cripps A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar /International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 89, February 2015, Pages 151–158.
169. Xiaoqiu Xu,<sup>1,2</sup> Han Tao,<sup>1</sup> and Junwei Han<sup>1</sup> . Shock Mechanism Analysis and Simulation of High-Power Hydraulic Shock Wave Simulator. Research Article. Open Access. Volume 2017. Article ID 4361256 [LA1] <https://doi.org/10.1155/2017/4361256>
170. Yongjie Zhao, Ke Qiu, Shuangxi Wang, Ziqiang Zhang. Inverse Kinematics and rigid-body dynamics for a three rotational degrees of freedom parallel manipulator/ Yongjie Zhao, Ke Qiu, Shuangxi Wang, Ziqiang Zhang / Robotics and Computer-Integrated Manufacturing No31 (2015). 40-50 pp.
171. Zirong Luo, Jianzhong Shang, Guowu Wei, and Lei Ren Module-based structure design of wheeled mobile robot / Mechanical Sciences No9 (2018), pp. 103 121.
172. Zoran, M.; Marko, M.; Mihailo, L.; Bojan, B. Neural network reinforcement learning for visual control of robot manipulators. Exp. Syst. Appl.2013, 40, 1721-1736.

---

## Зміст

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Вступ.....                                                                                                                  |     |
| Частина I. Особливості конструкції та технічні характеристики наземних роботизованих комплексів                             | 5   |
| Розділ 1. Мобільні наземні роботизовані комплекси відомі в світовій практиці                                                | 5   |
| 1.1. Загальна характеристика наземних роботизованих комплексів та напрямки їх інноваційного розвитку                        | 5   |
| 1.2. Найбільш поширені конструкції наземних роботизованих комплексів                                                        | 29  |
| 1.3. Наземні роботизовані комплекси оригінальної конструкції та міні-роботи                                                 | 49  |
| 1.4. Класифікаційні принципи та класифікація по геометричному принципу                                                      | 70  |
| 1.5. Класифікація комплексів по масо-габаритним параметрам                                                                  | 72  |
| 1.6. Функціональне призначення наземних роботизованих комплексів                                                            | 75  |
| Розділ 2. Маніпулятори наземних роботизованих комплексів                                                                    | 82  |
| 2.1. Загальна характеристика систем маніпулювання                                                                           | 82  |
| 2.2. Технічні характеристики маніпуляторів важільного типу                                                                  | 90  |
| 2.3. Маніпулятори на основі механізмів із паралельними кінематичними структурами                                            | 107 |
| 2.4. Відомі захватні механізми маніпуляторів                                                                                | 123 |
| Частина II. Проблеми орієнтації та навігації наземних роботизованих комплексів                                              | 138 |
| Розділ 3. Теоретичні моделі дії дорожніх умов на рухомі наземні роботизовані комплекси                                      | 138 |
| 3.1. Математичний опис детермінованих плавно та різко змінних нерівностей дорожнього полотна                                | 138 |
| 3.2. Особливості опису стохастичних змін нерівностей дорожнього полотна і бездоріжжя                                        | 151 |
| 3.3. Теоретичні моделі дії двох сусідніх колій на переміщення наземного роботизованого комплексу                            | 157 |
| 3.4. Опис дії нерівностей дороги на платформу та маніпулятор мобільного робота                                              | 164 |
| Розділ 4. Процеси обумовлені ступінчастими, імпульсними та вібраційними впливами на шасі наземного роботизованого комплексу | 169 |
| 4.1. Моделювання положення шасі при різко-змінній просадці ґрунту                                                           | 169 |
| 4.2. Моделювання положення шасі при ударних навантаженнях                                                                   | 174 |
| 4.3. Моделювання переміщення маніпулятора наземного роботизованого комплексу при дії імпульсу пришвидшення на шасі          | 182 |
| 4.4. Математичне моделювання динамічних переміщень наземного роботизованого комплексу при вібраційних впливах               | 188 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Розділ 5. Підвищення точності позиціонування та стабільності положення шасі мобільних роботів                                                        | 193 |
| 5.1. Оптичні методи точної орієнтації шасі                                                                                                           | 193 |
| 5.2. Оптичні пристрої та методи точної орієнтації                                                                                                    | 198 |
| Розділ 6. Навігація та керування наземних роботизованих комплексів із застосування елементів штучного інтелекту                                      | 207 |
| 6.1. Задачі орієнтації та навігації наземних роботизованих комплексів                                                                                | 207 |
| 6.2. Елементи штучного інтелекту реалізовані в системах керування наземних роботизованих комплексів, штучні нейронні мережі                          | 213 |
| 6.3. Окремі штучні нейронні мережі, які застосовуються в системах керування наземними роботизованими комплексами та їх функції                       | 217 |
| 6.4. Системи зв'язку, керування та моніторингу наземних роботизованих комплексів                                                                     | 222 |
| ЧАСТИНА III. Визначення характеристик наземних роботизованих комплексів                                                                              | 231 |
| Розділ 7. Розвиток методів теорії гвинтів для визначення характеристик наземних роботизованих комплексів                                             | 231 |
| 7.1 Математичні об'єкти відповідні нормалізованому гвинту                                                                                            | 231 |
| 7.2. Групи гвинтів та їх властивості                                                                                                                 | 234 |
| 7.3. Параметри наземних роботизованих комплексів відповідні нормалізованому гвинту                                                                   | 239 |
| Розділ 8. Геометрія та кінематика маніпуляторів із розімкненим кінематичним ланцюгом                                                                 | 247 |
| 8.1. Математичне моделювання важільного маніпулятора планарного виду                                                                                 | 247 |
| 8.2. Випадкові похибки позиціонування виконавчого органу маніпулятора                                                                                | 265 |
| 8.3. Визначення кінематичних характеристик маніпулятора із застосуванням гвинтової вісі та гвинтових аксоїдів відповідно апарату гвинтового числення | 287 |
| Розділ 9. Статика наземних роботизованих комплексів                                                                                                  | 292 |
| 9.1. Статичні навантаження переміщення шасі наземних роботизованих комплексів                                                                        | 292 |
| 9.2. Статична стійкість шасі наземних роботизованих комплексів                                                                                       | 305 |
| 9.3. Матричні характеристики жорсткості маніпуляторів наземних роботизованих комплексів                                                              | 318 |
| 9.4. Визначення статичних деформацій в маніпуляторах мобільних роботів                                                                               | 331 |
| 9.5. Визначення деформативності мобільного робота з маніпулятором на основі механізма-гексапода                                                      | 336 |
| Розділ 10. Енергетичні та динамічні процеси в наземних роботизованих комплексах                                                                      | 345 |
|                                                                                                                                                      | 523 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.1. Нелінійні гістерезисні характеристики жорсткості елементів наземних роботизованих комплексів                                  | 345 |
| 10.2. Динамічні характеристики наземних роботизованих комплексів                                                                    | 355 |
| 10.3. Математичне моделювання сферичних рухів у просторових динамічних системах маніпуляторів мобільних роботів                     | 362 |
| 10.4. Математичного моделювання динаміки маніпуляторів з використанням кусково-постійних ортогональних функцій                      | 368 |
| 10.5. Дослідження динамічних характеристик маніпулятора з використанням теорії нечітких множин                                      | 375 |
| Частина IV. Елементи теорії проектування наземних роботизованих комплексів                                                          | 386 |
| Розділ 11. Концепція теорії проектування наземних роботизованих комплексів                                                          | 386 |
| 11.1. Загальні принципи проектування                                                                                                | 386 |
| 11.2. Алгоритми і методи проектування                                                                                               | 393 |
| Розділ 12. Розроблення схемних і конструктивних рішень наземних роботизованих комплексів                                            | 400 |
| 12.1. Традиційні схемні рішення маніпуляторів наземних роботизованих комплексів                                                     | 400 |
| 12.2. Інноваційні схемні рішення наземних роботизованих комплексів                                                                  | 412 |
| Розділ 13. Маніпулятор наземного роботизованого комплексу виготовлений із композитних матеріалів                                    | 419 |
| 13.1. Компоновка маніпулятора наземного роботизованого комплексу виготовленого із композитних матеріалів                            | 419 |
| 13.2. Вузли і деталі маніпулятора наземного роботизованого комплексу виготовленого із композитних матеріалів                        | 425 |
| Розділ 14. Проектування виготовлення та апробація експериментального зразка наземного роботизованого комплексу                      | 438 |
| 14.1. Основні конструктивні параметри наземного роботизованого комплексу із паралельними кінематичними структурами                  | 438 |
| 14.2. Моделювання просторового руху платформи наземного роботизованого комплексу із паралельними кінематичними структурами          | 452 |
| 14.3. Кінематика маніпулятора-гексапода наземного роботизованого комплексу                                                          | 470 |
| 14.4. Визначення параметрів кінематичної точності маніпуляторів з паралельними кінематичними зв'язками                              | 482 |
| Розділ 15. Елементи теорії проектування ходової частини наземного роботизованого комплексу                                          | 496 |
| 15.1. Параметри випадкових навантажень гусеничного рушія наземного роботизованого комплексу                                         | 496 |
| 15.2. Заходи по компенсації негативного впливу ходової частини на динамічну точність переміщення наземного роботизованого комплексу | 504 |
| Перелік джерел інформації                                                                                                           | 508 |
| Зміст                                                                                                                               | 522 |