

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПОЛІЩУК МИХАЙЛО МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.865.8

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ
ДОВІЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОСТОРИ**

Спеціальність: 05.02.02 – Машинознавство

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Кузнєцов Юрій Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри конструювання
машин

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Козлов Леонід Геннадійович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри технологій та автоматизації
машинобудування

доктор технічних наук, професор
Яглінський Віктор Петрович,
Державний університет "Одеська політехніка",
професор кафедри підйомно-транспортного
і роботизованого обладнання

доктор технічних наук, доцент
Кирилович Валерій Анатолійович,
Державний університет «Житомирська
політехніка», професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Захист відбудеться « 22 » грудня 2021 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, навчальний корпус № 1, аудиторія 214.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано « 19 » листопада 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11



О.С. Ганпанцурова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Мобільні роботи довільної орієнтації (РДО) у просторі є модифікацією мобільних роботів, оснащених засобами пересування та втримання їх на поверхні довільної орієнтації відповідно до заданого технологічного простору. Створення даного виду робототехніки є достатньо складною задачею і перебуває на початковій стадії. Теоретичні й експериментальні дослідження зі створення мобільних роботів, здатних переміщатися по поверхнях, розташованих під довільними кутами до обрію, почалися в країнах Західної Європи, США, Японії, Південній Кореї, Китаї, Росії й Україні. Однак слід зазначити, що науково-технічні роботи відомих закордонних розробників і окремих лабораторій позбавлені загальнометодологічного підходу до синтезу мобільних РДО, і носять, в значному ступені, пошуковий і експериментальний характер, що суттєво звужує можливості їх промислового виробництва і застосування. Додаткову актуальність експлуатація означеного класу мобільних роботів здобуває в екстремальних умовах техногенних катастроф, небезпечних і навіть неприйнятних для перебування і втручання людини.

Відомі системи автоматизованого проектування інших класів мобільних та виробничих роботів і їх елементів, але вони не дозволяють враховувати такі особливості роботів довільної орієнтації, як жорстке обмеження вагових характеристик, зміна кутів нахилу поверхні в процесі експлуатації до 180° , технічні варіанти зчеплення із поверхнею, зміни кутів дії реакції поверхні і ваги по відношенню до напрямку пересування. Актуальною проблемою є створення методологічного підходу, який враховує особливості класу мобільних роботів довільної орієнтації, та реалізація підходу в інженерних методиках і засобах автоматизованого проектування, що звужує сегмент пошукових розробок і ослаблює фактор людського впливу при проектуванні роботів відповідно до заданих виконуваних функцій, обмежень, умов і режимів експлуатації.

Дисертаційні дослідження присвячені вирішенню важливої науково-технічної проблеми створення інструментальних засобів синтезу мобільних роботів довільної орієнтації у технологічному просторі. Запропонований методологічний підхід синтезу мобільних РДО, заснований на трьох принципах: 1 - накопичення та перетворення енергії руху роботів, 2 - інтеграції їх приводів, 3 - застосування засобів компенсації гравітаційного навантаження. Реалізація зазначених принципів синтезу РДО надає можливість створення інструментальних засобів автоматизованого проектування означеного класу мобільних роботів, відповідно до необхідного спектру виконуваних функцій та заданих умов і режимів експлуатації в різноманітних галузях промисловості, що визначає актуальність проблеми.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у рамках науково-дослідних тем: «Синтез технологічних роботів довільної орієнтації» (Д/р № 01117U004912, Державна реєстрація № 017u004912, терміни виконання: 01.03.2017р.–30.12.2019р.); «Антропоморфний роботизований транспортний засіб для розвантаження людини в умовах підвищеного ризику та невизначеності рельєфу місцевості» (Тема № 2023-п, терміни виконання: 01.03.2016р.–30.12.2018р.).

Мета роботи і задачі досліджень. Метою досліджень є створення інструментальних засобів автоматизованого синтезу мобільних РДО в технологічному просторі на основі принципів накопичення і перетворення енергії, інтеграції приводів руху і зміни орієнтації робота, компенсації гравітаційного навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Виконати порівняльний аналіз відомих методологічних підходів до синтезу мобільних РДО, а також відомих теоретичних і експериментальних моделей дослідних зразків мобільних РДО в технологічному просторі.

2. Визначити основоположні принципи автоматизованого синтезу і оптимізації параметрів мобільних РДО на базі структурно-системного підходу й методів: морфологічного аналізу, структурно-параметричного синтезу й динамічних моделей функціональних пристроїв мобільних РДО.

3. Провести теоретичні дослідження, розробити математичні моделі для пошуку технічних розв'язків параметричного синтезу мобільних РДО в частині визначення їх конструктивно-технологічних параметрів та режимів процесу функціонування.

4. Провести експериментальні дослідження, спрямовані на апробацію запропонованих принципів автоматизованого синтезу мобільних РДО на основі постановки повнофакторного експерименту для пошуку засобів і режимів ефективної компенсації гравітаційного навантаження мобільного робота.

5. Розробити інженерні методики розрахунків режимів функціонування й конструктивних параметрів мобільних РДО та реалізувати їх в засобах автоматизованого синтезу.

6. Розробити рекомендації для виконання синтезу технічних рішень і впровадження нових різновидів мобільних РДО в народне господарство і обороноздатність України.

Об'єкт досліджень. Методологічне забезпечення синтезу мобільних РДО в технологічному просторі із застосуванням основоположних принципів їх функціонування.

Предмет досліджень. Процес автоматизованого синтезу мобільних РДО в частині проектування їх функціональних вузлів і пристроїв зчеплення та переміщення по поверхнях довільної орієнтації.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження засновані на методах структурного морфологічного аналізу й параметричного синтезу нових технічних розв'язків, методів квазістатичного, кінематичного й динамічного аналізів технічних систем. Запропонована модифікація параметричного синтезу мобільних РДО як багаторівневої технічної системи, на базі якої розроблені інженерні методики розрахунків режимів функціонування й конструктивно-технологічних параметрів мобільних РДО. Комп'ютерна реалізація математичних моделей проводилась за програмами MathCAD, MathLab/Simulink та за оригінальними програмами. Для синтезу 3D моделей мобільних РДО використовувались системи Kompas, AutoCAD, Solid Works.

Експериментальні дослідження засновані на теорії повнофакторного експерименту, методики його постановки, вимірів значень (min, max) режимів

подолання гравітаційного навантаження генератором реактивної тяги мобільного робота й обробки результатів експерименту методами дисперсійного й регресійного аналізів, включаючи перевірку отриманої регресійної моделі на адекватність реальному процесу із застосуванням критеріїв Кохрена, Стюдента та Фішера.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновано методологічний підхід до створення мобільних РДО на основі реалізації трьох принципів цілеспрямованого синтезу мобільних роботів, а саме:

Принцип 1. Упереджуюче накопичення потенціальної енергії на попередній ділянці (або кроці) переміщення мобільного РДО й перетворення її в енергію руху на наступних ділянках (або наступному кроці) руху.

Принцип 2. Зменшення ваги робота шляхом інтеграції приводів поздовжнього й вертикального переміщення, а також приводів зміни орієнтації робота по заданому маршруту.

Принцип 3. Застосування аеродинамічної піднімальної сили як засобу протидії гравітаційному навантаженню та забезпечення зчеплення робота з поверхнею переміщення.

2. Вперше здійснено структурно-параметричний синтез мобільних РДО як багаторівневої технічної системи із застосуванням модифікації параметричного синтезу мобільних роботів, відмітність якої полягає в перетворенні критеріїв оптимізації у фактори функціоналів на кожному наступному рівні оптимізації параметрів мобільних РДО як ієрархічної технічної системи (ТС).

3. Вперше використаний системно-морфологічний підхід для структурного синтезу мобільних РДО та формування масиву нових технічних рішень, який спрямовано на розробку раціональних конструкцій трансмісій і засобів зчеплення РДО з поверхнею переміщення.

4. Вперше розроблені динамічні моделі мобільних РДО, які враховують гравітаційне та технологічне навантаження (в частині виконання силових операцій) при формуванні технічних розв'язків та дозволяють автоматизувати їх синтез і визначення конструктивно-технологічних параметрів мобільних РДО.

5. Вперше експериментально підтверджений принцип застосування аеродинамічної сили як засобу протидії гравітаційному навантаженню, що сприяє компенсації гравітаційного навантаження мобільних РДО і розширенню діапазону технологічних навантажень.

6. Отримано подальший розвиток параметричного синтезу режимів функціонування та конструктивно-технологічних параметрів мобільних РДО відповідно до запропонованих принципів автоматизованого синтезу технічних рішень.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Для ієрархічної технічної системи РДО на основі методології багатокритеріальної параметричної оптимізації створені інженерні методики, які дозволяють формувати раціональні технічні рішення:

Методика розрахунку параметрів підсистем зчеплення мобільних РДО, обчислення параметрів керування модулями накопичення потенціальної енергії і перетворення її в кінетичну енергію руху мобільних роботів.

Методика параметричного синтезу педіпуляторів мобільного робота з інтегрованими приводами для систем координат технологічного простору довільної орієнтації.

Методика розрахунку параметрів генератора реактивної тяги для мобільних роботів довільної орієнтації у просторі. як засобу протидії гравітаційного навантаження.

2. Створено автоматизовані модулі САЕ систем для параметричного синтезу мобільних РДО з газовими пристроями накопичення та перетворення енергії руху роботів, а також антропоморфних педіпуляторів роботів, використання яких дозволяє проектувальникам зменшити трудомісткість робіт на 20%...35%.

3. Отримано, в результаті експериментальних досліджень, емпіричний масив даних впливу режимів функціонування генератора пневматичної тяги, який засвідчив, що при максимальному тиску у соплах та при переході від мінімального значення їх кількості до середніх значень приріст сили аеродинамічної тяги досягає 77%, а при переході від мінімальних діаметрів сопів до середніх значень при їх максимальній кількості, приріст реактивної тяги не перевищує 63%.

4. Розроблено технічні рішення мобільних РДО для обслуговування висотних об'єктів промислового та комунального господарств із застосуванням компенсації гравітаційного навантаження та комбінуванням приводів переміщення і орієнтації.

5. Результати досліджень впроваджені в Київському спеціальному конструкторському бюро «СКБ – Перспектива» та на підприємстві «Стандарт-Техніка» у якості комплексу робочої проектно-конструкторської документації на зразки мобільних РДО для обслуговування висотних об'єктів промислового та господарського призначення. Це дозволило за рахунок зменшення трудомісткості проектних робіт досягти відповідно вказаних підприємств економічний ефект 657 тис. грн. та 252 тис. грн.

6. Розроблені програмні пакети й інструменти САЕ-систем використовуються в учбових курсах «Проектування робототехнічних систем (РТС-1)» та «CAD/CAM/CAE системи» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Використання САЕ систем, впроваджених в учбовий процес, надає можливість студентам виконувати параметричний синтез РДО.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно й опубліковані в одноособових публікаціях. Здобувач особисто розробив методологію створення мобільних РДО на основі реалізації трьох основоположних принципів цілеспрямованого їх синтезу, отримав результати експериментальних досліджень апробації принципу застосування аеродинамічної піднімальної сили, як засобу протидії гравітаційному навантаженню мобільних роботів, розробив інженерні методики параметричного синтезу режимів керування та конструктивно-технологічних параметрів мобільних РДО, а також запропонував принципово нові технічні розв'язки крокуючих РДО, світова новизна яких доведена результатами кваліфікаційної експертизи Державного підприємства «Український

інститут інтелектуальної власності». У публікаціях у співавторстві дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів досліджень. Постановка завдань і обговорення наукових результатів дисертаційної роботи виконані разом з науковим консультантом.

Апробація результатів дисертації. Отримані результати та наукові положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на вітчизняних та міжнародних науково-технічних конференціях: Conference Proceedings «The development of technical sciences: problems and solutions» (April 27–28, 2018. Czech Republic, Brno); International Multi disciplinary Conference: Key issues of education and sciences: development prospects for Ukraine and Poland. Stalowa Wola, Republic of Poland 20–21 July. 2018; Безопасность жизнедеятельности: проблемы и решения – 2018: (Курган, 4 октября 2018г); IV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації» (Херсон, Вересень 12–16 вересня 2018р.); The 2nd International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA 2019). 18–20 January 2019, Kiev, Ukraine; XII міжнародна науково-практична конференція: Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2019), 21–22 травня 2019р. Київ, МОН України. 2019; XLIX Международная научная конференция «Актуальные научные исследования в современном мире» (Переяслав-Хмельницький, 26–27 травня 2019р.); L Міжнародна наукова конференція: Актуальні наукові дослідження в сучасному світі (Переяслав-Хмельницький, червень 2019); XII международная научно-практическая конференция «Технические науки: проблемы и решения» (М.: Интернаука, июнь, 2018); Сб.: 6(11) С.50–54. XII Международная научно-техническая конференция: Современные проблемы машиноведения (Гомель, 22–23 ноября 2018 года); XIX міжнародна наукова конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (Київ, 17–19 жовтня 2018); VII Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи – 2018» (Черкаси, вересень, 2018); VI Міжнародна науково-практична конференція: Зброя та безпека Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку. (Київ, 11–12 жовтня 2018); Науково-практична конференція: Застосування сухопутних військ збройних сил України у конфліктах сучасності (Львов, 15 листопада 2018); International Scientific Conference UNITECH (03.12.2019, Gabrovo, Bulgaria); XX міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ІРТК-2019, 21–22 травня 2019р. Київ, Україна); I міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси. ІМТСК 2019». (29–31 травня 2019 р., Черкаси, Україна). Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» – 2021 (м. Чернігів, Чернігівська політехніка, 26–27 травня 2021 р).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 83 наукові праці, у тому числі 2 монографії, 34 статті у наукових фахових виданнях (з них 8 статей у виданнях іноземних держав, що включені до міжнародних наукометричних баз); 11 патентів на винахід, 3 патенти на корисну модель, 16 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 17 статей в інших виданнях.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновку й 16 додатків. Загальний обсяг роботи становить 377 сторінок (15,7 друк. арк.), у тому числі 357 основного тексту, містить 134 ілюстрації, 17 таблиць, список літератури зі 158 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі роботи, визначено об'єкт і предмет досліджень, висвітлено наукову новизну і практичну значимість роботи та отриманих результатів, наведені дані про їх апробацію і публікацію.

У першому розділі розглянуті перспективні сфери експлуатації мобільних роботів довільної орієнтації (РДО), викладений рівень технічних підсистем даного класу роботів, виконаний аналіз теоретичних і експериментальних досліджень і запропоновані напрямки методологічних підходів до побудови мобільних РДО. Виконано ретельний аналіз теоретичних і експериментальних досліджень відомих закордонних університетів Західної Європи, США, Японії, Кореї, Китаю, Росії та України, авторів розробок в галузі створення мобільних РДО, відомих також як роботи вертикального переміщення, а в міжнародних виданнях – під терміном *Climber Robot* (альпіністський робот), а саме:

Saunders A., Goldman D.I., Full R.J. (Boston Dynamics, Massachusetts Institute of Technology, USA); Manuel F., Silva J. A., Tenreiro Machado (Institute of Engineering of Porto, Portugal); Houxiang Zhang, Jianwei Zhang, Rong Liu and Guanghua Zong (Robotics Institute, Beihang University, China; University of Hamburg, Germany); Градецкий В.Г., Черноусько Ф.Л. (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН); Рачков М.Ю. (Институт машиноведения им. Благонравова Российской Академии Наук); Краснослободцев В.Я., Скворцов В.Ю. (С-Петербургский технический университет, Россия); Черепанов А. А., Дышенко В. С. (Курский государственный университет, Россия); Побегайлов О.А., Кравченко И.В., Кожуховский С.О. (Ростовский Государственный строительный университет, Россия), Струтинський В. Б., Кузнецов Ю.М. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна), Козлов Л.Г. (Вінницький національний технічний університет), Кирилович В.А. (Державний університет «Житомирська політехніка»), а також промислових розробок мобільних РДО відомих фірм, таких як «Tokyo Gaze Limited», «Hitachi» (Japan), «International robotic technology» (USA).

Зіставлення сфер експлуатації (табл. 1) мобільних роботів довільної орієнтації (РДО) у технологічному просторі, як перспективного засобу виробництва, з їхньою структурою, складом і рівнем реалізації вказує на необхідність створення методологічного підходу до керування синтезом РДО, як одного зі шляхів їх промислового освоєння.

Таблиця 1

Галузі перспективного застосування мобільних роботів довільної орієнтації

№	Область застосування	Об'єкт обслуговування	Рекомендовані системи зчеплення	Припустима трансмісія
1	Обслуговування висотних будинків		Вакуумні	Колісна, крокуюча
2	Ремонт високовольтних ЛЕП		Механічні	Крокуюча
3	Демонтаж або відновлення мостів, віадуків і діагностика подібних споруджень		Механічні	Крокуюча
4	Діагностика промислових трубопроводів, чищення, нанесення покриттів		Вакуумні, електромагнітні, на основі адгезії	Колісна, гусенична, крокуюча, черв'ячна
5	Технічне обслуговування міських, паркових і лісових деревних масивів		Механічні	Крокуюча
6	Дезактивація об'єктів техногенних катастроф		Механічні	Колісна, гусенична, крокуюча

Розглянуто структуру РДО (рис. 1) з погляду впливу домінуючих підсистем на енергетичне споживання, оскільки саме цей фактор визначає потужність, а значить і масу робота, тобто силу його гравітаційного навантаження. Найбільших енергетичних витрат вимагає система втримання на поверхні й приводи переміщення, а також функціональні пристрої технологічного оснащення. Відмітність у витратах енергії між двома описаними групами може досягати декількох порядків. При цьому із збільшенням загальної маси робота виникає необхідність у підвищенні потужності приводів робота й потужності пристроїв, які втримують робота на поверхні переміщення довільної орієнтації. Зміна загальної маси робота не має прямого впливу на енергетичні витрати системи керування, датчиків і функціональних пристроїв, але суттєво впливає на загальну потужність його приводів.

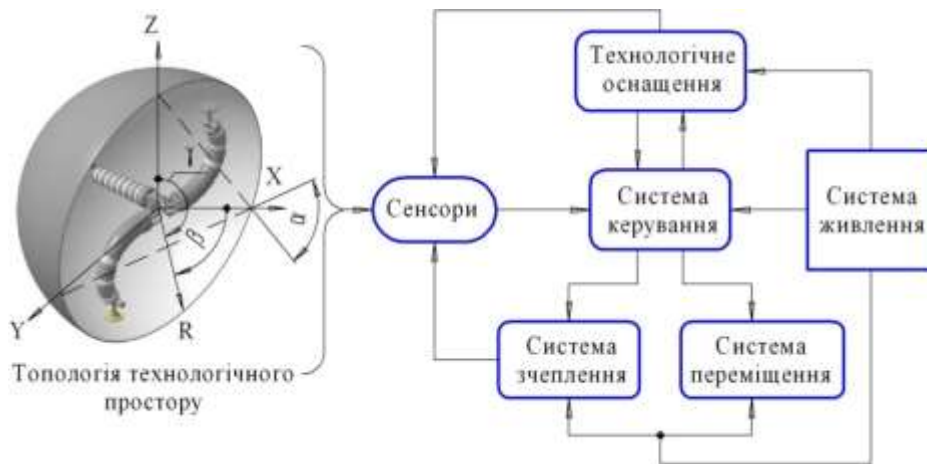


Рис 1. Загальна структура підсистем мобільних РДО

В першому розділі також виконано аналіз статичних, кинетостатических і динамічних моделей мобільних РДО, що підтверджує доцільність їх використання як предтечу для розробки інженерних методик синтезу РДО. На відміну від зазначеного вище моделі енергетичної ефективності мобільних роботів містять критерії оцінки енергоефективності мобільних роботів, однак відсутність в останніх будь-яких методичних рекомендацій, або, принаймні, схемо технічних розв'язків, спрямованих на зниження гравітаційного навантаження, що має принципове значення саме для мобільних роботів, залишає проблему автоматизованого синтезу РДО актуальною.

Розглянуті технічні розв'язки найбільш перспективних дослідних зразків мобільних РДО не містять проектно-конструкторських рішень, що сприяють подоланню дестабілізуючої гравітаційної складовій у сукупності робочих динамічних навантажень транспортних і технологічних операцій й спрямованими на підвищення надійності втримання мобільних роботів на поверхні довільної орієнтації при виконанні різноманітних виробничих операцій.

Вперше представлено мобільні РДО у вигляді багаторівневої технічної системи (ТС), що вказує на актуальність розв'язку завдань структурно-параметричного синтезу. Однак розглянуті методики багатокритеріальної оптимізації багаторівневих ТС, не дивлячись на їхню ефективну апробацію завдяки взаємозв'язку факторів, що характеризують ТС, не відображають взаємозв'язки власне критеріїв оптимальності кожного рівня ієрархічної ТС. Ця обставина знижує ефективність безпосереднього їхнього застосування як засобу параметричного синтезу мобільних РДО. Зазначені напрямки у світовій теорії й практиці експериментальної побудови мобільних РДО дотепер не були досліджені.

Викладені висновки вказують на необхідність створення єдиного методологічного підходу до процесу автоматизованого синтезу мобільних РДО, що включає не тільки досягнуті раніше результати досліджень, але, і насамперед, заснованого на основоположних принципах їх синтезу. Ці принципи повинні бути спрямовані на забезпечення ефективної експлуатації РДО шляхом зниження гравітаційного навантаження й тим самим підвищення енергетичної ефективності мобільних РДО в технологічному просторі.

У **другому розділі** виконано структурно-параметричний синтез мобільних РДО на основі трьох основоположних принципів: 1. Нагромадження потенціальної енергії й перетворення її в кінетичну енергію руху мобільних роботів; 2. Інтеграції приводів поздовжнього й вертикального переміщення, а також приводів зміни орієнтації робота по заданому маршруту. 3. Застосування аеродинамічної піднімальної сили (на основі генераторів тяги) як засобу протидії гравітаційному навантаженню з метою збільшення технологічного навантаження на етапі синтезу при одночасному зменшенні потужності приводів руху й зчеплення робота з поверхнею переміщення. Слід зазначити, що залежно від технологічного призначення мобільних РДО, можлива інтеграція вказаних принципів, або їх комбінація з міркувань промислової доцільності.

Серед методологічних підходів віддано перевагу методам структурно-параметричного синтезу на основі морфологічного аналізу (створеного Zwicky F. і удосконаленого Одріним В.М., Акімовим С.В. та Кузнєцовим Ю.М. і Настасенко В.О. для прогнозування і блокування масиву винаходів), побудові квазістатичних і динамічних моделей, координатної оптимізації, спрямованої на одержання квазіоптимальних технічних розв'язків, а також удосконаленого автором методу оптимізації параметрів багаторівневих ієрархічних систем. Склад морфологічних ознак продиктований ще й наступною методологічною послідовністю синтезу: морфологічний аналіз → структурний → і параметричний синтез.

Здійснений морфологічний аналіз (рис. 2) структур мобільних РДО на рівні інтеграції є *предтечею* реалізації декларованих вище принципів керування синтезом мобільних роботів як класу робототехнічних систем.

Застосовані критерії відбору варіантів морфологічних структур, по-перше, на основі трьох принципів синтезу мобільних РДО, указує напрямок удосконалювання конструкцій мобільних роботів довільної орієнтації, по-друге, селекція варіантів у вигляді патентованих технічних розв'язків підтверджує відповідність обраних структур сучасному рівню матеріалів і технологій для їхнього виготовлення, що є неодмінною вимогою патентного відомства будь-якої країни.

В розділі запропоновано модифікацію методу параметричного синтезу багаторівневої технічної системи РДО. Відзнака запропонованої модифікації методу параметричного синтезу полягає в тому, що при запису цільових функцій кожного рівня системи критерій оптимальності попереднього рівня входить у цільову функцію наступного рівня у вигляді змінної або константи.

У загальному виді для будь-якої технічної системи, розбитої на три рівні, в тому числі і мобільного РДО, викладене вище виглядає наступним чином. Цільова функція 1-го рівня у загальному вигляді:

$$F_1(\bar{X}_i) = f_1(\bar{X}_i) \rightarrow \text{opt}, \quad (1)$$

де $\bar{X}_i$ – змінні параметри 1-го рівня, тобто режими функціонування процесу або технічні параметри пристрою, що реалізує даний процес.

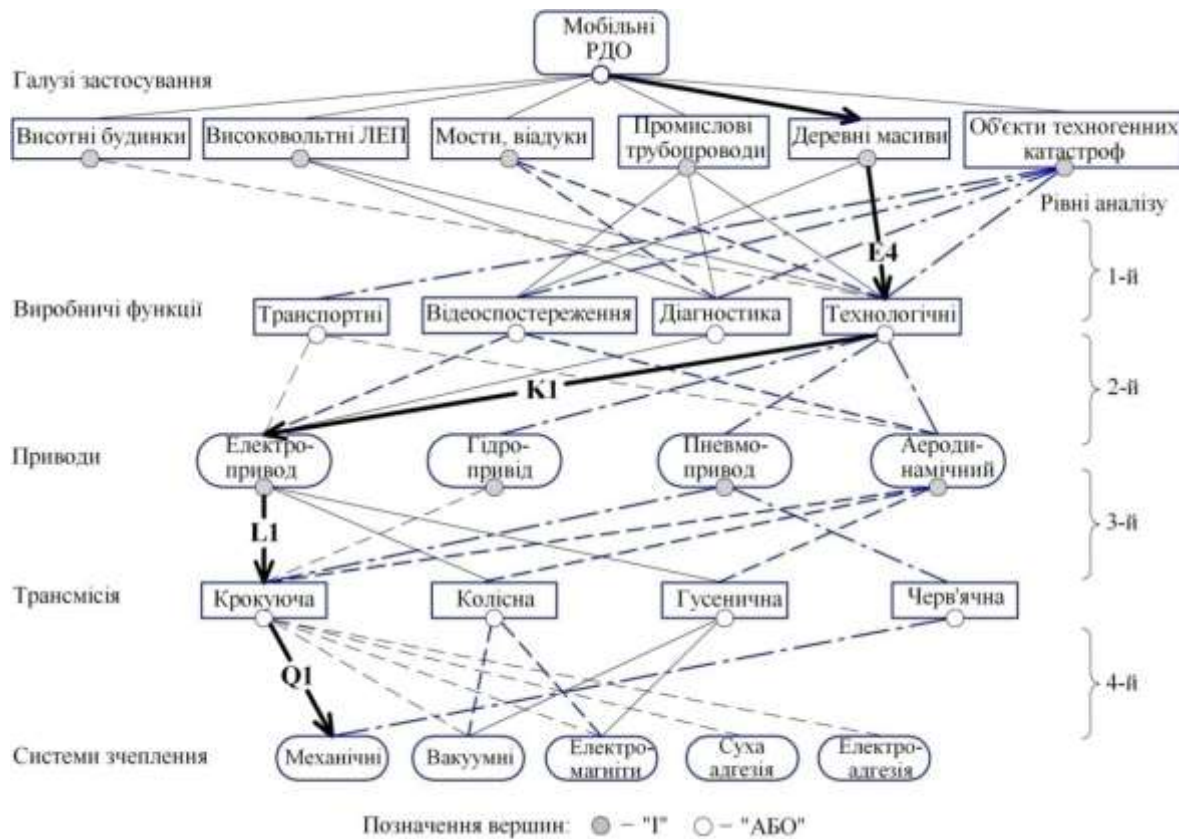


Рис. 2. Модифікований морфологічний граф структур мобільних РДО

Цільова функція 2-го рівня:

$$F_2(\bar{X}_2, \bar{f}_1) = f_2(\bar{X}_2, \bar{f}_1) \rightarrow opt, \quad (2)$$

де: $\bar{X}_2$ – змінні параметри 2-го рівня; $\bar{f}_1$ – критерій оптимальності попереднього, тобто 1-го рівня, який тепер використовується як змінний параметр на другому рівні системи. Цільова функція 3-го рівня:

$$F_3(\bar{X}_3, \bar{f}_2) = f_3(\bar{X}_3, \bar{f}_2) \rightarrow opt, \quad (3)$$

де: $\bar{X}_3$ – змінні параметри 3-го рівня; $\bar{f}_2$ – критерій оптимальності попереднього 2-го рівня, який використовується як змінний параметр на 3-му рівні системи.

Таким чином, формули (1), (2) і (3) зв'язують змінні параметри кожного рівня із критеріями оптимальності попереднього рівня технічної системи. Запропонована модифікація методу параметричного синтезу дозволяє погодити технічні параметри різних пристроїв, що входять у технічну систему, і знайти принаймні квазіоптимальні значення їх параметрів. Відмітність запропонованої модифікації проявляється у взаємному зв'язку між критеріями та параметрами, що характеризують кожний наступний рівень системи.

Для вирішення цієї задачі застосовано метод трансформації структури на основі *цілеспрямованого вдосконалювання* прототипів, тим більше, що цей метод припускає пошук не глобального, а локального екстремуму. У якості прикладу синтез мобільного РДО виконано на основі окремо обраної морфологічної структури. Припустимо, що згідно з технічним завданням потрібно здійснити параметричний синтез мобільного робота для обслуговування паркових деревних масивів. На основі

методу морфологічного конструювання виконаємо синтез необхідної структури, а саме, послідовно рухаючись по ребрах графа рис. 2 створимо необхідну структуру робота. Шукана структура виділена на морфологічному графові рис. 2 стовщеними лініями зі стрілками й позначеннями морфологічних ознак E4, K1 L1 і Q1 комбінацій, що відображають: деревні масиви $\rightarrow$ технологічні операції $\rightarrow$ електропривод $\rightarrow$ із крокуючою трансмісією й механічними захватами для зчеплення зі стовбуром дерева. Витягнута структура показана на рис. 3 з відображенням цільових функцій для оптимізації її параметрів.

Нехай, наприклад, згідно з технічним завданням мобільний робот 1 (рис. 3, а), оснащений крокуючою трансмісією 2 з електроприводами 3 (L1) і механічними Q1 захватами 4, повинен переміщатися по стовбуру дерева 5 у системі координат XYZ на величину ΔZ і виконувати технологічну операцію E4. І нехай остання полягає в тому, щоб дисковою фрезою 6 зрізати деревні нарости 7. Тоді, відповідно до обраної з морфологічного графа рис. 2 структури на рис. 3,б, оптимізації підлягають наступні параметри: режими технологічної операції – різання наростів; характеристики електропривода із крокуючою трансмісією й конструктивні параметри механічного захвата.

Оскільки функціонали цільових функцій, що зв'язують критерій оптимізації з незалежними факторами, можуть бути різноманітні, то тут для стислості обмежимося відображенням цільових функцій у загальному виді, що поки достатньо для викладання застосованої методології параметричного синтезу. Таке обмеження виправдане ще й тим, що власне процедура обчислення оптимальних або, скоріше, квазиоптимальних значень параметрів може здійснюватися як аналітичними, так і чисельними методами, що й застосовано в наступних розділах дисертації.

Пропонована модифікація полягає в наступному: відобразимо не тільки наявність зв'язку критеріїв оптимізації з незалежними змінними в межах цільових функцій, що вже відомо та істотно, але ще й зв'язок самих цільових функцій на різних рівнях технічної системи (див. позначення штриховими стрілками на рис. 3, б), в даному випадку структури мобільного РДО.

Отже, на 1-му рівні параметричного синтезу для морфологічної комбінації E4 (рис. 3) цільова функція, що включає режими технологічної операції, може бути представлена в загальному виді як функція швидкості різання деревини дисковою фрезою:

$$V = f_1(s, t, T^{-1}) \Rightarrow \max, \quad (4)$$

при обмеженнях: $s = f_{11}(\sigma)$; $t_1 \leq t_i \leq t_n$, де: s – величина подачі на зуб дискової фрези; σ – межа міцності деревини певної породи; t – глибина різання в межах діапазону значень $t_1 \dots t_n$; T – період стійкості інструмента.

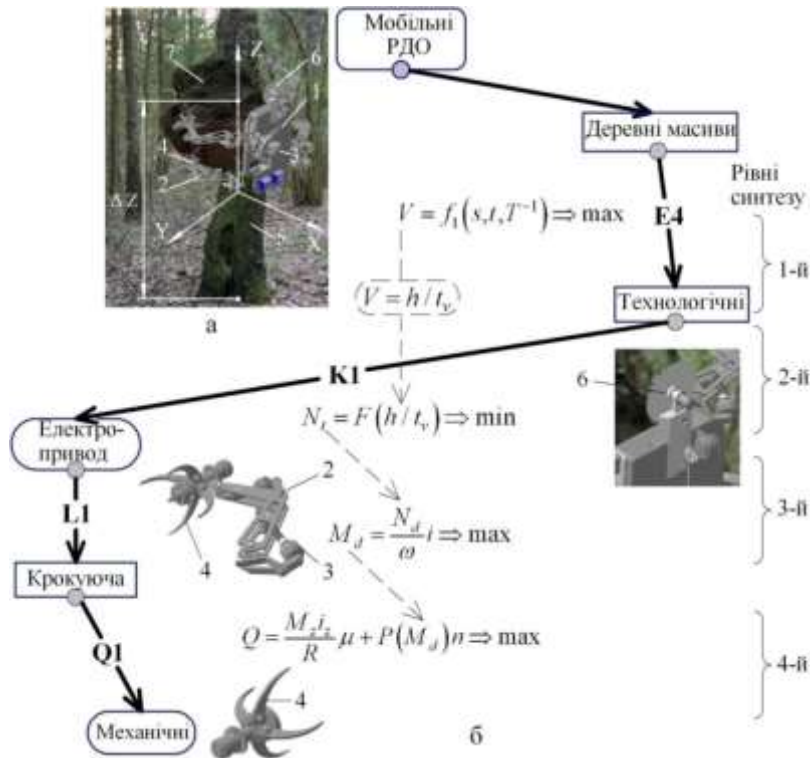


Рис. 3. Структурно-параметричне представлення процесу синтезу мобільного робота для обслуговування паркових масивів

На 2-му рівні параметричного синтезу цільову функцію для такого виду технологічного навантаження, наприклад, як різання деревини при обслуговуванні паркових міських масивів:

$$N_t = F(h/t_v) \Rightarrow \min, \quad (5)$$

де: F – зусилля різання деревини; h – глибина різання (гілки, наросту тощо); t_v – час різання; оскільки $(h/t_v) = V$, то можна записати $N_t = FV \Rightarrow \min$, відобразивши тим самим взаємозв'язок 1-го й 2-го рівнів синтезу.

Для морфологічної комбінації ознак L1 (привод – трансмісія) 3-го рівня синтезу цільову функцію можна представити у вигляді крутного моменту M_d електропривода:

$$M_d = \frac{N_d}{\omega} i \Rightarrow \max; \text{ при } N_d = M_d \omega \geq N_t, \quad (6)$$

де: N_d і ω – потужність і кутова швидкість двигуна; i – передатне відношення підсилювально-передатної ланки (редуктора).

На 4-му рівні параметричного синтезу для комбінації Q1 (привод – система зчеплення з поверхнею переміщення робота) цільову функцію також бажане зв'язати з попереднім функціоналом. Це можна виконати, записавши у вигляді цільової функції вираження для сили зчеплення Q механічного захвата з поверхнею переміщення мобільного РДО:

$$Q = \frac{M_z i_z}{R} \mu + P(M_d) n \Rightarrow \max; \quad Q \geq (F + mg) K, \quad (7)$$

де: M_z і i_z – крутний момент і передатне відношення приводу захвата; R – виліт (довжина) пазурів захвату; μ – коефіцієнт тертя ковзання між матеріалом пазурів захвату й поверхнею дерева; P – зусилля однієї ноги із числа n ланок крокуючої

трансмисії, як функція моменту двигуна M_d у вираженні (6); m – маса робота; g – прискорення вільного падіння; K – коефіцієнт запасу (1,5...2).

Таким чином здійснюється параметричний *взаємозв'язок* цільових функцій оптимізації компонентів структури, як ієрархічної багаторівневої технічної системи, показаної на прикладі мобільного робота, зокрема, для обрізки дерев. Створення подібних формалізованих моделей параметричного синтезу дозволяє максимально наблизити їх адекватність реальним умовам експлуатації мобільних роботів довільної орієнтації у технологічному просторі.

У **третьому розділі** запропоновано реалізацію синтезу мобільних РДО за 1-м принципом: накопичення потенціальної енергії і перетворення її в кінетичну енергію руху. В цьому розділі на основі теоретичного обґрунтування та подальшого моделювання процесу переміщення робота з модулями *накопичення та перетворення* енергії доведено доцільність застосування запропонованого 1-го принципу синтезу мобільних РДО. Первісно розглянуто варіанти реалізації мобільних роботів з модулями перетворення енергії, потім надано їх динамічні моделі та здійснено параметричний синтез конструктивних параметрів на основі багатокритеріальної оптимізації. Модулі РДО для накопичення та перетворення енергії можуть мати різноманітні проектно-конструкторські реалізації, що показані на рис. 4. Ілюстрації прикладів вказаних проектних реалізацій вкрай необхідні для коректного тлумачення 1-го принципу синтезу мобільних РДО.

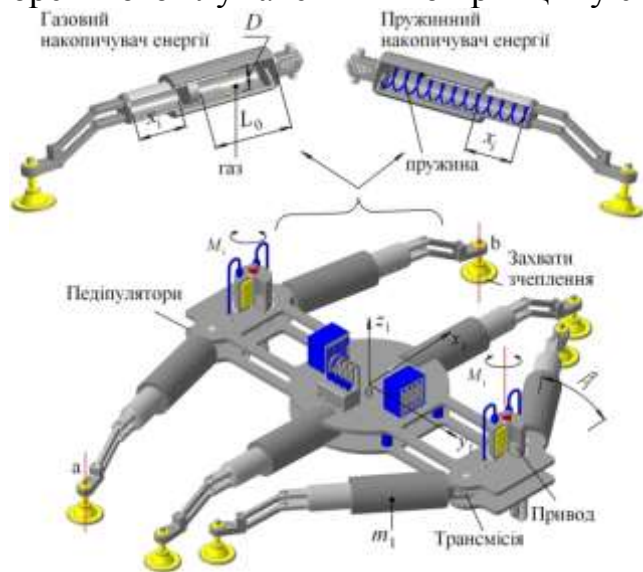


Рис. 4. Мобільний РДО з пружними металевими та газовими модулями перетворення енергії руху

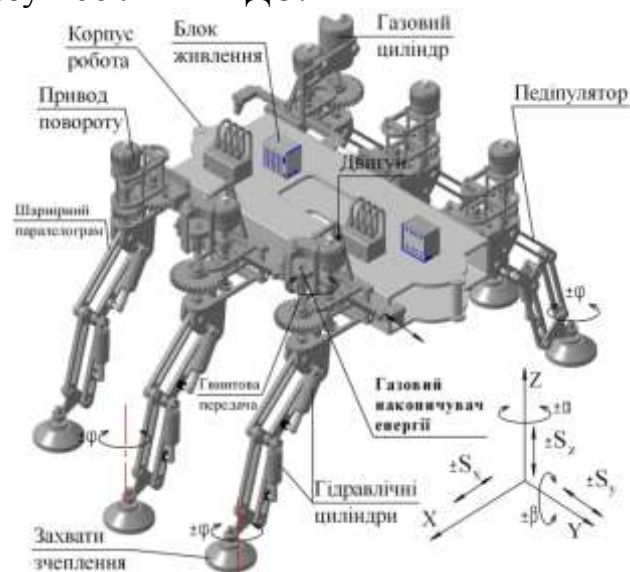


Рис. 5. Мобільний РДО з газовими модулями перетворення енергії руху

При зчепленні захватів з поверхнею переміщення приводи повертають підпультори робота навколо осей «b», стискаючи пружні елементи: або *пружини*, або *газ* у камері підпультатора залежно від варіанта виконання. Внаслідок такого стиснення на ділянці повороту підпультаторів на кут $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ відбувається нагромадження потенціальної енергії за період першої половини кроку, а на другій половині кроку $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ зазначені елементи, розтискаючись, перетворюють потенціальну енергію стиску в кінетичну енергію руху робота.

Один з різновидів мобільного робота з пневматичним накопичувачем енергії, що показаний на рис. 5, має педіпулятори робота, виконані у вигляді шарнірних паралелограмів, на кінцівках котрих встановлені захвати зчеплення з поверхнею переміщення. Але головна відмінність полягає у наявності пневматичних (газових) циліндрів, поршні котрих через *не самогальмуючу* гвинтову передачу та редукцію кінематично зв'язані з двигуном. Означені пневматичні циліндри виконують функцію накопичення потенціальної енергії на першому кроці та перетворення її в кінетичну енергію руху на кожному другому кроці робота.

Для визначення обсягів потенціальної та кінетичної енергії руху робота на різних етапах переміщення застосовані диференціальні рівняння Лагранжа II-го роду. Головним чинником для синтезу мобільних роботів є значення кінетичної енергії руху. Корпус робота рухається поступально і його переміщення можна знаходити за формулою

$$s = R_1 \cos 45^\circ [1 - \operatorname{tg}(45^\circ - \beta_1)], \quad 0 \leq \beta_1 \leq 90^\circ. \quad (8)$$

де: s – переміщення робота; R_1 – довжина ноги педіпулятора; β_1 – кут повороту педіпулятора. Тоді швидкість корпусу робота визначиться як

$$V = \frac{ds}{dt} = \frac{R_2 \cos 45^\circ}{\cos^2(45^\circ - \beta_1)} \dot{\beta}_1, \quad (\cos 45^\circ = \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}), \quad (9)$$

а вираз для кінетичної енергії T_k корпусу матиме вигляд

$$T_k = \frac{mV^2}{2} = \frac{mR_2^2}{4\cos^4(45^\circ - \beta_1)} (\dot{\beta}_1)^2, \quad (10)$$

де m – маса корпусу робота.

Формула для знаходження кінетичної енергії T_1 вільної від зчеплення з поверхнею ноги робота визначена як:

$$T_1 = \frac{m_1 R_2^2}{2} \left(\frac{(\dot{\beta}_1)^2}{2\cos^4(45^\circ - \beta_1)} + \frac{\dot{\beta}_1 \dot{\beta}_2 \sqrt{2} \cos(45^\circ - \beta_2)}{2\cos^2(45^\circ - \beta_1)} + \frac{1}{3} (\dot{\beta}_2)^2 \right). \quad (11)$$

Опорний педіпулятор, тобто нога робота, що зчеплена з поверхнею переміщення робота, здійснює обертальний рух з кутовою швидкістю $\dot{\beta}_1$. Тоді вираз для кінетичної енергії опорної ноги можна отримати, поклавши $V=0$ і $\dot{\beta}_2 = \dot{\beta}_1$:

$$T_2 = \frac{m_1 R_2^2}{6} (\dot{\beta}_1)^2. \quad (12)$$

Тоді повна кінетична енергія T мобільного робота дорівнює

$$T = T_k + 2T_1 + 2T_2 = \frac{R_2^2}{2} \left(\frac{(2m_1 + m)(\dot{\beta}_1)^2}{2\cos^4(45^\circ - \beta_1)} + \frac{m_1 \dot{\beta}_1 \dot{\beta}_2 \sqrt{2} \cos(45^\circ - \beta_2)}{\cos^2(45^\circ - \beta_1)} + \frac{2m_1}{3} ((\dot{\beta}_2)^2 + (\dot{\beta}_1)^2) \right). \quad (13)$$

Власне системи диференціальних рівнянь руху роботів на етапах накопичення та перетворення енергії розв'язувались числовим методом Рунге–Кутта четвертого порядку точності. Тут для стислості викладення розглянемо результати моделювання руху мобільного робота на основі розробленої динамічної моделі функціонування педіпуляторів робота з пружинними та газовими накопичувачами енергії.

Пружні елементи акумуляторів, як відзначено вище, виконують функцію нагромадження потенціальної енергії, а головною їхньою характеристикою є жорсткість j – параметр, який визначає величину накопиченої потенційної енергії на першій половині кроку педипулятора. Як показують результати моделювання, вплив жорсткості j на зміну лінійної (рис. 6,а) та кутової (рис. 6,б) швидкості переміщення у більшій мірі проявляється на другому етапі руху робота, що пояснюється істотним зменшенням накопиченої енергії в наслідок роботи виконаної на переміщення робота на другій половині циклу. Інакше кажучи, при включених двигунах приводів на етапі $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ руху педипуляторів є можливість забезпечити сталу швидкість руху на відміну від другого етапу $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ переміщення, коли виконується робота за рахунок перетворення потенціальної енергії в кінетичну енергію руху мобільного робота.

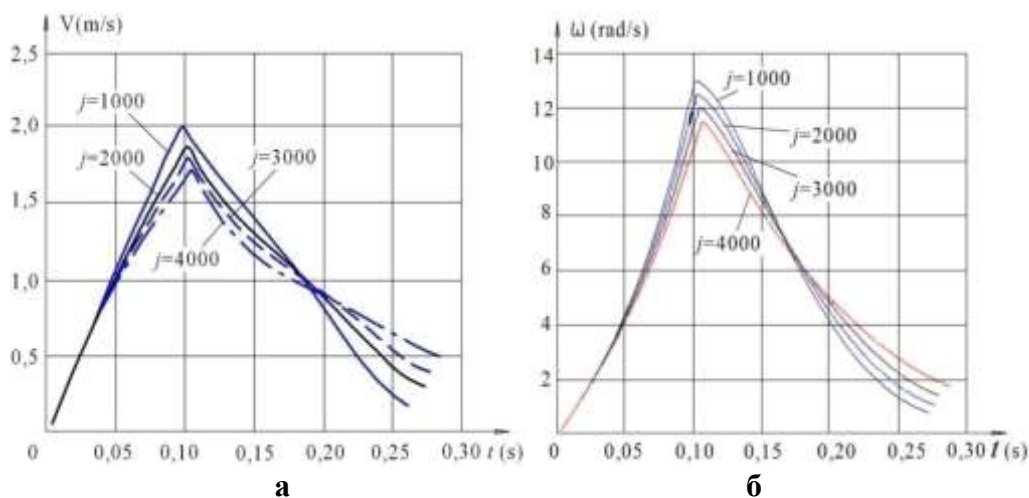


Рис. 6. Вплив жорсткості j (N/m) пружного елемента на зміну лінійної (а) та кутової швидкостей(б) переміщення робота

На графіках рис. 7 показана залежність зміни роботи A від жорсткості пружного елемента j (N/m) і сил ваги робота на другому етапі $\beta_1 > 45^\circ$ переміщення, тобто під час перетворення потенційної енергії в кінетичну енергію руху робота. Оскільки на другому етапі переміщення $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ привод педипулятора відключений з метою енергозбереження ресурсів робота, і він рухається тільки за рахунок кінетичної енергії, то очевидно, що значення жорсткості пружного елемента приводу має домінуючий вплив на динаміку переміщення. Моделювання проводилось при початкових умовах: вага робота (25...50) кг; кут повороту педипуляторів $0 < \beta_i < 90^\circ$; жорсткість пружних елементів $j = (1000...5000)$ N/m; передаточне відношення трансмісії $i = 2$.

Виходячи з аналізу наведених на рис.6 та рис. 7 графоаналітичних залежностей можна остаточно стверджувати, що для збільшення кінетичної енергії руху робота доцільне підвищення жорсткості пружинного накопичувача потенціальної енергії, незважаючи на те, що при цьому зростає протидія приводу на першій половині кроку. *Примітка:* Робота від'ємна при умові $T_2 - T_1 = A$; $T_2 \approx 0$, тому що $\dot{\beta}_1 = 0$.

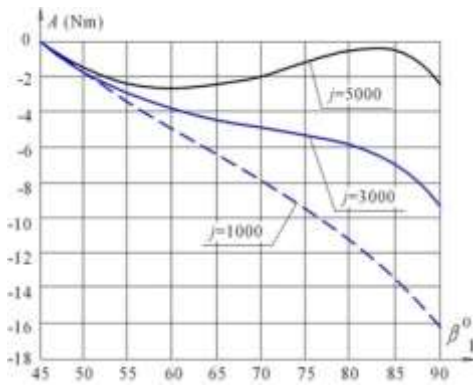


Рис. 7. Вплив жорсткості j (N/m) пружного накопичувача енергії виконувану їм роботу на другому етапі $\beta_1 > 45^\circ$ переміщення робота при виключених приводах.

Газові модулі на копичення потенціальної енергії та перетворення її в кінетичну енергію руху мобільного робота відрізняються від пружинних модулів тим, що позбавлені такого негативного чинника, як накопичення залишкових деформацій конструкції накопичувача, що може призвести до його

руйнування.

Об'єктом автоматизованого синтезу мобільного РДО з газовим модулем перетворення енергії є газова камера зі стислим повітрям. Переміщення x

поршня газової камери накопичувача потенціальної енергії залежить від кута β_1 повороту опорної ноги (див. рис. 4):

$$x = R_1 \left(1 - \frac{\cos 45^\circ}{\cos(45^\circ - \beta_1)} \right); \quad 0 \leq \beta_1 \leq 90^\circ; \quad 0 \leq x \leq x_{\max}. \quad (14)$$

Встановлені співвідношення для маси m робота и маси m_1 педіпулятора:

$$F_1 L_1 \geq (m + 3m_1)gL; \quad (15)$$

$$F_1 L_1 \geq (m + 3m_1)g \frac{L}{2} + 2U_{\max}. \quad (16)$$

Нерівність (15) вказує, що енергії, яку отримала механічна система внаслідок виконання роботи сили F_1 на відрізку L_1 , досить для переміщення робота на відстань L_2 . Нерівність (16) вказує, що роботи сили F_1 вистачить для нагромадження максимальної потенціальної енергії у стисненому повітрі (газу). Так, наприклад, при значеннях

$$D < \sqrt{\frac{(m + 3m_1)gL}{\pi(p_o L_o \ln \frac{L_o}{L_o - x_{\max}} - p_a x_{\max})}}, \quad (17)$$

досить, щоб виконувалась умова (15), а при D більшому досить виконання нерівності (16).

Сила зчеплення Q захватів педіпулятора робота також впливає на допустиме значення діаметра газової камери, тому що повинна виконуватись нерівність

$$F_T > J_{\max} \Rightarrow \mu Q_{\max} > \frac{\pi D^2}{4} (p_{\max} - p_a), \quad (18)$$

де μ – коефіцієнт тертя захватів педіпуляторів з поверхнею переміщення робота.

Звідси знаходимо діаметр D газової камери накопичувача потенціальної енергії

$$D < \sqrt{\frac{4\mu Q_{\max}}{\pi(p_{\max} - p_a)}}. \quad (19)$$

Результати моделювання динаміки переміщення мобільного РДО з газовими модулями накопичення та перетворення енергії руху показали домінанту впливу провідного моменту на залежність лінійної швидкості робота та кутової швидкості його педіпуляторів на обох циклах руху, що спостерігаємо на графіках рис. 8.

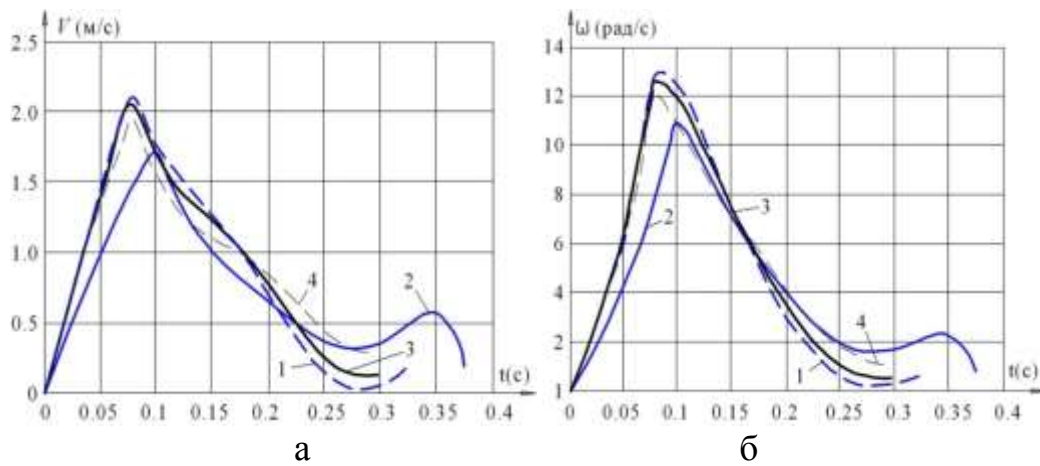


Рис. 8. Залежність лінійної швидкості V (м/с) робота (а) та кутової ω (рад/с) швидкості педіпуляторів (б) від часу t (с) при різних діаметрах D газової камери накопичувача енергії і рушійних моментах M приводу робота:
 1: $D=0,02$ м; $M=12$ Нм; 2: $D=0,035$ м; $M=9,6$ Нм; 3: $D=0,03$ м; $M=12$ Нм; 4: $D=0,04$ м; $M=12$ Нм

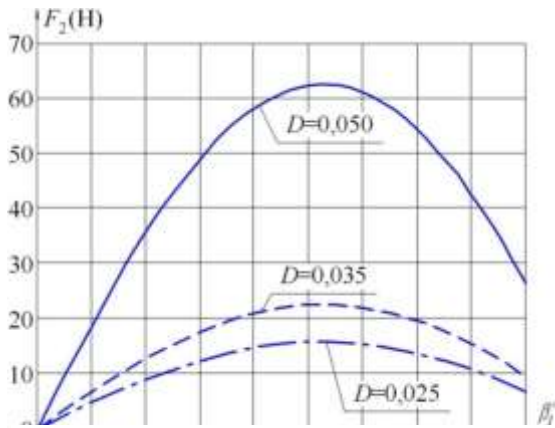


Рис. 9. Графіки зміни значення рушійної сили $F_2^{\max}$ залежно від кута β_1 повороту педіпулятора робота і діаметра D (м) газової камери накопичувача потенціальної енергії

енергії знижується ресурс роботи педіпуляторів. Газовому накопичувачу не властиво нагромадження залишкових напружень.

У четвертому розділі виконано дослідження синтезу мобільних РДО за 2-им принципом: інтеграції приводів переміщення та зміни орієнтації мобільного робота. Вказане відповідає головному принципу мехатроніки – синергетичної інтеграції її складових. Первісно в даному розділі відображені технічні реалізації мобільних РДО з інтегрованими приводами – педіпуляторами, далі розроблена динамічна модель та виконаний аналіз результатів моделювання, а також здійснено параметричний синтез РДО на основі багатокритеріальної оптимізації параметрів та надано інженерну методику синтезу основних конструктивних елементів мобільного РДО, створеного за другим принципом синтезу.

Збільшення діаметру D газової камери впливає на збільшення рушійної сили F_2 на етапі перетворення потенціальної енергії в кінетичну енергію руху робота не пропорційно, інакше кажучи, ефективна площа поршня $\pi D^2/4$ має домінуючий вплив на значення пружної рушійної сили на другому етапі переміщення мобільного робота, тобто коли робот рухається під дією кінетичної енергії.

Використання пружинного накопичувача енергії сприяє підвищенню вантажопідйомності робота, але внаслідок природнього нагромадження залишкових напружень пружинних накопичувачів

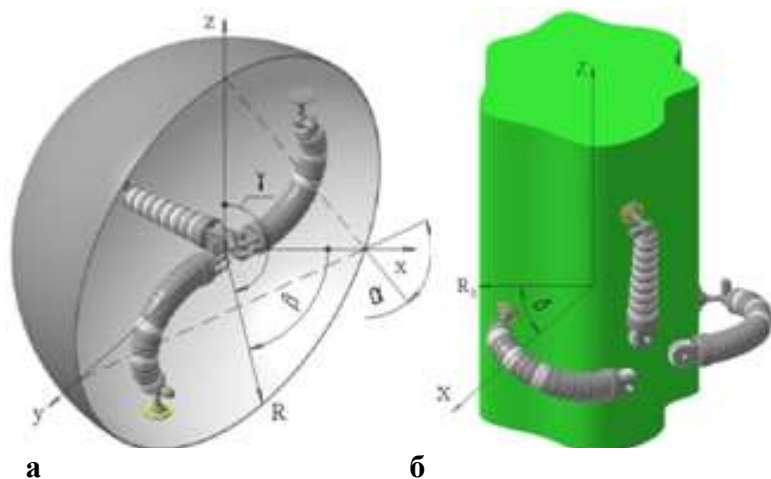


Рис. 10. Орієнтація педіпуляторів робота, відповідно: в Декартовій і сферичній (а) та циліндричній (б) системах координат

Як видно з рис. 10, а, наслідком реалізації поставленого завдання є орієнтація педіпуляторів робота у Декартовій системі X, Y, Z , сферичній R, β, γ (де: R – радіус педіпулятора, тобто його довжина; β, γ – відповідно кути вигину педіпуляторів) в системах координат. Для ясності сприйняття платформа робота умовно не показана. Кутом α визначається зона сервісу мобільного робота в сферичній R, β, γ системі координат.

Аналогічно ілюструється на рис. 10, б, можливість педіпуляторів працювати також і в циліндричній системі координат R_0, δ, Z (де: R_0 – поточний радіус-вектор об'єкта обслуговування; δ – кут полярної, а Z – координата циліндричної систем координат).

Розв'язок, показаний на рис. 11, 12, як приклад реалізації 2-го принципу синтезу мобільних РДО, які містять корпус що складається з верхньої й нижньої платформ. На останні встановлені гнучкі педіпулятори, кожна пара педіпуляторів постачена трансмісією з сервоприводом. Крім того, кожний із шести педіпуляторів оснащений захватом для зчеплення з поверхнею переміщення і його приводом повороту орієнтації для забезпечення нормального положення захватів до поверхні переміщення. Кожний з педіпуляторів виконаний у вигляді набору кілець, кількість яких визначається призначенням педіпуляторів робота: чим більше кілець, тим вище точність орієнтації педіпуляторів, а при зменшенні їхнього числа підвищується вантажопідйомність робота.

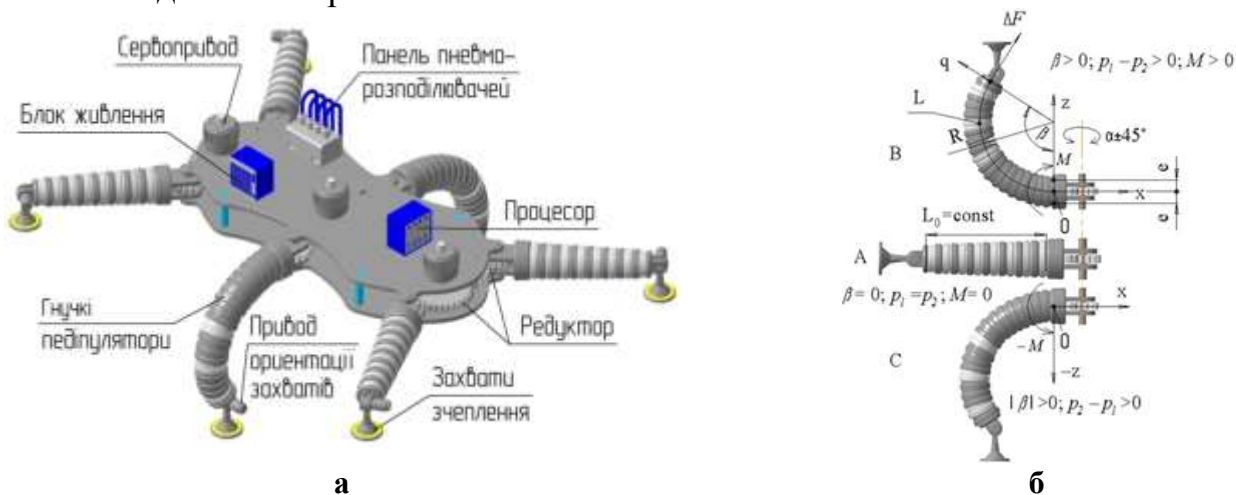


Рис. 11. Мобільний РДО з інтегрованими приводами:

а – технічна реалізація; **б** – положення педіпуляторів залежно від різниці тиску $\Delta = p_1 - p_2$ в гофрованих камерах: M – крутний момент; β – кут вигину; L_0 – довжина ноги робота

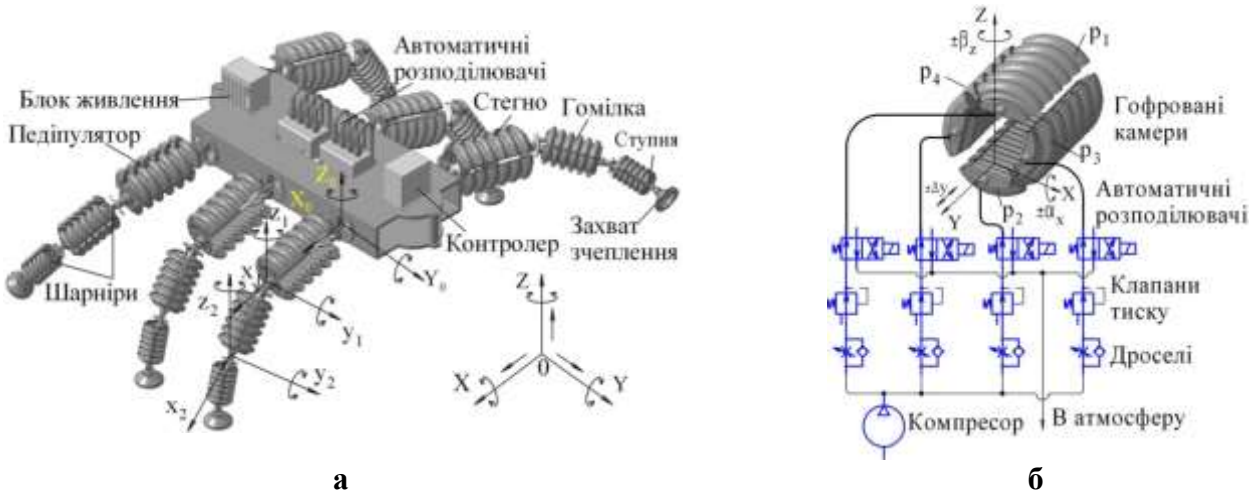


Рис. 12. Антропоморфний мобільний РДО з інтегрованими приводами:
а – технічна реалізація; б – схема підключення гофрованих камер до генератору тиску

Інтеграцію приводів здійснено за рахунок гофрованих камер (оболонок), що розташовані всередині підпультаторів і знаходяться під різним тиском газу. За рахунок різниці тиску в них $\Delta = p_1 - p_2$ вказані трубопроводи дозволяють здійснювати вигин ніг робота, тобто привод орієнтації, у довільному напрямку відповідно до початку системи координат XYZ.

Запропонований принцип інтеграції приводів дозволяє, по-перше, суттєво зменшити гравітаційне навантаження на мобільні роботи, а значить підвищити надійність їх утримання на поверхнях довільної орієнтації, а по-друге, здійснювати різноманітні комбінації технічних реалізацій мобільних РДО залежно від сфери їх експлуатації в промисловості.

Для автоматизованого синтезу робота необхідно мати аналітичні залежності координат положення площини вигину кожного підпультатора. Оскільки осі трубопроводів зміщені відносно осі підпультатора на величину ексцентриситету e , то виникають згинаючі моменти

$$M_1 = \frac{\pi d^2}{4} (p_1 - p_2) e; \quad M_2 = \frac{\pi d^2}{4} (p_3 - p_4) e, \quad (20)$$

де: d – діаметр гофрованих трубопроводів; $p_1, \dots, p_4$ – різні тиски в трубопроводах. Ці моменти обертають підпультатор робота у різних площинах, а тому доцільно розглядати їх як вектори. Оскільки вектори $\vec{M}_1, \vec{M}_2$ взаємно перпендикулярні, то модуль сумарного вектора складе:

$$M = |\vec{M}| = \sqrt{(\vec{M}_1)^2 + (\vec{M}_2)^2} = \frac{\pi d^2}{4} e \sqrt{(p_1 - p_2)^2 + (p_3 - p_4)^2}. \quad (21)$$

Кут β вигину ніг підпультаторів, що визначає положення мобільного робота у технологічному просторі довільної орієнтації визначається залежно від різниці тисків:

$$\beta = \arctg \left(\frac{p_1 - p_2}{p_3 - p_4} \right); \quad p_3 > p_4; \quad (22)$$

$$\beta = \pi + \arctg \left(\frac{p_1 - p_2}{p_3 - p_4} \right); \quad p_3 < p_4$$

Орієнтація мобільного РДО здійснюється за наступними координатами: педіпулятор довжиною L згинається по дузі кола радіуса R у заданій площині (відомий кут β), а рівняння осі педіпулятора у нерухомій системі координат матимуть вигляд:

$$\begin{cases} x = R \sin \varphi; \\ y = (R \cos \varphi - R) \cos \beta; \\ z = (R \cos \varphi - R) \sin \beta; \end{cases} \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{L}{R}. \quad (23)$$

На основі побудованої динамічної моделі за результатами моделювання впливу параметрів робота на динаміку його переміщення отримані графоаналітичні залежності (рис. 13) зміни величин переміщення, швидкості та кутів вигину педіпуляторів мобільного РДО. На рис. 13(а) видно, що швидкість при дії рушійного моменту робота спочатку стрімко зростає, а далі зменшується внаслідок витрати енергії на згин ноги педіпулятора і підймання корпусу робота. Потім швидкість знову дещо зростає, бо опорні ноги розпрямляються, а корпус робота опускається і, таким чином, вивільняється частина набутої енергії.

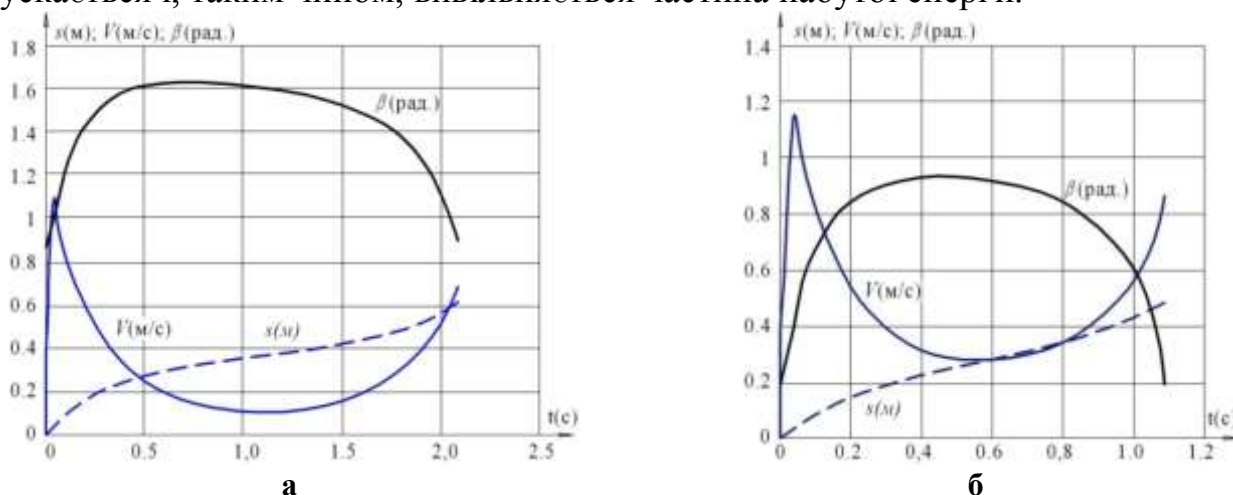


Рис. 13. Зміна у часі переміщення, швидкості робота та кута вигину педіпулятора:

а – при $\beta_0 = 50^\circ$; $\alpha = 45^\circ$ – куті нахилу поверхні переміщення до обрію; **б** – при $\beta_0 = 10^\circ$ і $\alpha = 60^\circ$.

На відміну від попереднього рішення задачі багатокритеріальної оптимізації параметрів мобільного робота як дворівневої технічної системи, здійснено вирішення вказаного розв'язання з урахуванням не тільки гравітаційного, а ще й технологічного навантаження мобільного робота при виконанні силових технологічних операцій.

На рис. 14 показані графіки залежності технологічного навантаження від кута нахилу поверхні переміщення робота до обрію, коли всі його чотири ноги перебувають на одній поверхні. Криві 1 і 2 показують стан, коли задня й передня ноги не відриваються від поверхні переміщення, а крива 3 характеризує стан робота, коли він переміщається, але захвати його ніг не прослизують по поверхні руху. Усі три стани руху робота виключають можливість аварійної ситуації, тобто зриву робота з поверхні руху. Як видно із графіків, збільшення коефіцієнта тертя захватів робота з поверхнею переміщення від значення $\mu = 0,2$ (а) до $\mu = 0,5$ (б), а саме на

150%, приводить до можливості підвищення мінімального технологічного навантаження N від 350(N) до 770(N), тобто на 120%.

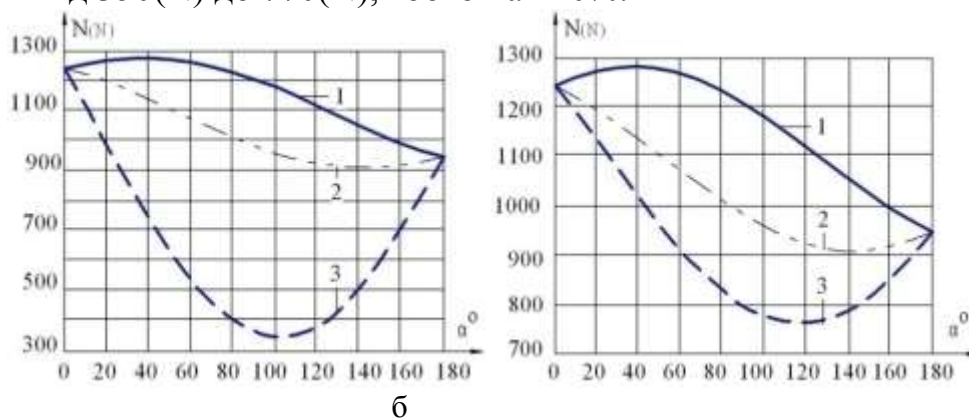


Рис. 14. Графіки зміни технологічної реакції $N = f(\alpha)$ залежно від кута α нахилу поверхні переміщення робота до обрію при коефіцієнті тертя захватів робота: а – $\mu=0,2$ і б – $\mu=0,5$

Такий ефект свідчить про домінуючий вплив сили зчеплення на можливість підвищення технологічного навантаження робота при виконанні контактних силових операцій: різання, свердління, клепки, установки монтажних дюбелів і т.п. операцій на довільно орієнтованих поверхнях переміщення.

Таким чином, реалізація 2-го принципу синтезу мобільних РДО як на прикладі гнучких педипуляторів, так і на прикладі антропоморфної їх реалізації, надає можливість досягатися довільної орієнтації крокуючого мобільного робота в різних робочих просторах: прямокутної Декартової, сферичної й циліндричної систем координат.

У **п'ятому розділі** запропоновано і розвинуто доцільність застосування 3-го принципу синтезу мобільних РДО, який має наступне тлумачення:

Принцип 3. Застосування аеродинамічної піднімальної сили (на основі генераторів тяги) як засобу протидії гравітаційному навантаженню з метою підвищення надійності зчеплення мобільних РДО з поверхнею переміщення.

В розділі представлені технічні реалізації мобільного РДО за третім принципом синтезу, потім здійснено кінематичний і динамічний аналізи руху генератора тяги, надана модель процесу створення аеродинамічної піднімальної сили і нарешті досліджено вплив ваги робота і аеродинамічної піднімальної сили як протидії гравітаційному навантаженню на величину технологічної реакції при виконанні мобільним РДО виробничого завдання. Запропонований приклад технічного розв'язку(рис. 15) за третім принципом спрямований на компенсацію або повне подолання гравітаційного навантаження мобільного робота довільної орієнтації при виконанні транспортних і технологічних операцій.

У сукупності викладені розв'язки сприяють підвищенню надійності втримання мобільних роботів на поверхні довільної орієнтації в просторі за рахунок протидії аеродинамічної піднімальної сили гравітаційному навантаженню при їхній експлуатації в різних областях промисловості.



Рис. 15. Мобільний РДО з генератором аеродинамічної сили

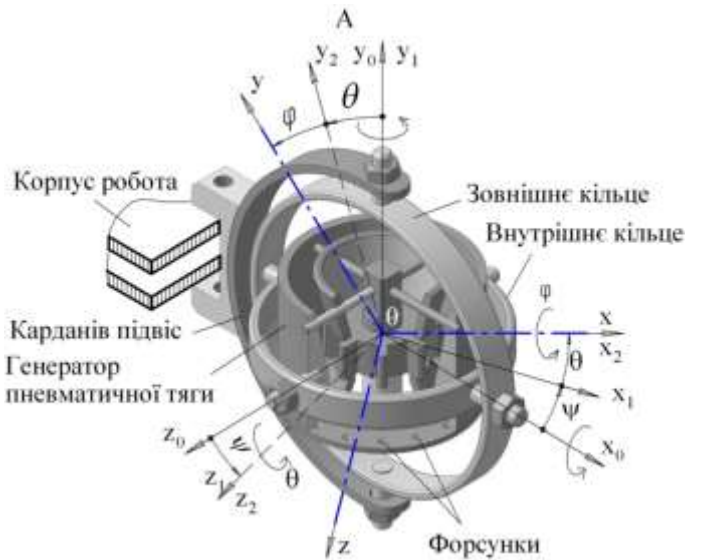


Рис. 16. Генератор аеродинамічної сили на Кардановому підвісі

Мобільний РДО з генератором пневматичної реактивної тяги (рис. 15), установлений на Кардановому підвісі, постачений крокуючими механізмами – гнучкими підпуляторами з відповідними приводами. Однак принциповою відмінністю мобільного робота є установка на Кардановому підвісі (рис. 16) із трьома ступенями свободи генератора пневматичної тяги. Також робот має пристрій вимірювання кута нахилу робота до обрію, що виконані у вигляді енкодерів, установлених на осях противаг і завжди спрямованих під дією сили ваги у напрямку гравітаційної сили. Автоматичне регулювання сили протидії гравітаційному навантаженню здійснюється за допомогою зв'язку пристрою вимірювання кута нахилу робота з регулятором швидкості сервоприводу генератора тяги. Таким чином змінюється сила реактивної пневматичної тяги залежно від кутів нахилу робота до обрію.

Генератор пневматичної тяги має три степені свободи і для опису його руху зручно користуватись кутами Ейлера-Крилова (ψ , θ , φ), які дають змогу, здійснивши три повороти на задані кути, отримати необхідне положення незмінно з'єднаної з генератором тяги рухомої системи координат $Ox_0y_0z_0$. Перший поворот на кут ψ , що називається кутом *прецесії*, здійснюємо навколо осі Oy_0 . Другий поворот на кут θ , який називається кутом *нутації*, проводимо навколо осі Oz_1 . Склавши матриці B_1 , B_2 , B_3 координат повороту відносно кожної осі та перемноживши їх, одержимо матрицю B , стовпці якої є напрямними косинусами осей Ox , Oy , Oz відносно нерухомої системи координат $Ox_0y_0z_0$:

$$B = B_1 B_2 B_3 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

де позначено: $a_{11} = \cos \theta \cos \psi$; $a_{13} = \sin \psi \cos \varphi + \sin \varphi \cos \psi \sin \theta$; $a_{21} = \sin \theta$; $a_{22} = \cos \theta \cos \varphi$; $a_{23} = -\sin \varphi \cos \theta$; $a_{31} = -\sin \psi \cos \theta$; $a_{32} = \sin \varphi \cos \psi + \sin \psi \cos \varphi \sin \theta$; $a_{33} = \cos \psi \cos \varphi - \sin \varphi \sin \psi \sin \theta$.

Для дослідження динаміки руху генератора тяги мобільного РДО використано рівняння Лагранжа 2-го роду. Систему диференціальних рівнянь, розв'язано числовими методами, зокрема, методом Рунге – Кутта четвертого порядку точності при заданих початкових значеннях кутів Ейлера – Крилова і їх похідних за часом. Результатами моделювання в середовищі MATLAB процесу повороту на кути ψ , θ кілець Карданового підвісу (рис. 17, а, б) показують наявність коливань внаслідок малого моменту сил тертя катання в опорах кілець. Цей ефект однозначно вказує на необхідність застосування демпферів для гасіння коливань.

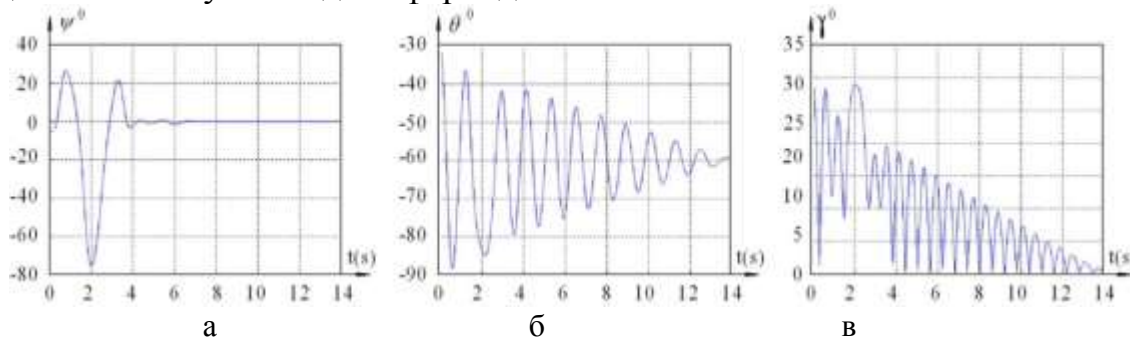


Рис. 17. Зміни кутів повороту ψ , θ , γ кілець Карданового підвісу з генератором тяги:
а – процес повороту на кут ψ ; б – поворот на кут θ ; в – поворот на кут γ

На рис. 17, в, кут γ між вертикаллю й радіус-вектором: центр підвісу → центр мас компресора поступово зменшується, і сопла компресора займають вертикальне положення, тобто по лінії гравітаційного навантаження, що й було потрібно довести установкою генератора тяги на Кардановому підвісі.

На рис. 18 надано графіки зміни кутових швидкостей кілець Кардана, на яких встановлено генератор тяги (блакитна лінія – кутова швидкість $\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt}$ червона лінія – кутова швидкість $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$), які підтверджують доцільність застосування демпферів для гасіння коливань.

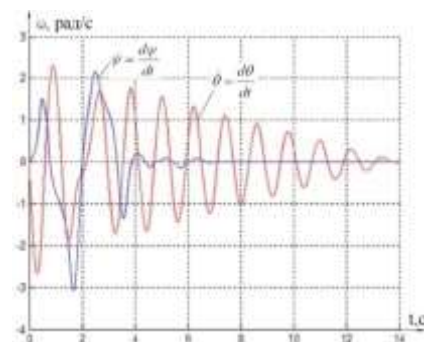


Рис. 18. Зміна у часі кутових швидкостей обертання кілець Карданового підвісу.

На основі кінематичного й динамічного аналізів побудована інженерна методика визначення параметрів сопів генератора та величини реактивної пневматичної тяги, що протидіє гравітаційному навантаженню на мобільний робот довільної орієнтації у технологічному просторі. Для переважної більшості пневматичних пристроїв процес перетікання газу відбувається достатньо швидко, що дозволяє нехтувати теплообміном і розглядати розширення або стиснення газу у вигляді адіабатного процесу. Для даного випадку побудовано систему рівнянь у диференціальній формі з використанням рівнянь балансу енергії та рівнянь Клапейрона – Менделєєва. Це дозволило визначити значення аеродинамічної сили, що протидіє гравітаційному навантаженню мобільного робота:

$$G_a = \frac{2k}{k-1} \frac{\rho_a}{\rho_1} P_1 F_2 \left(1 - b^{\frac{k-1}{k}} \right) + (P_1 - P_a) F_2 \quad \text{при } b = \frac{P_a}{P_1} \leq b_{kp};$$

$$G_a = \frac{2}{k+1} \left(b_{kp} \right)^{\frac{1}{k}} P_1 F_2 + (P_1 - b_{kp} P_1) F_2 \quad \text{при } b = b_{kp},$$
(25)

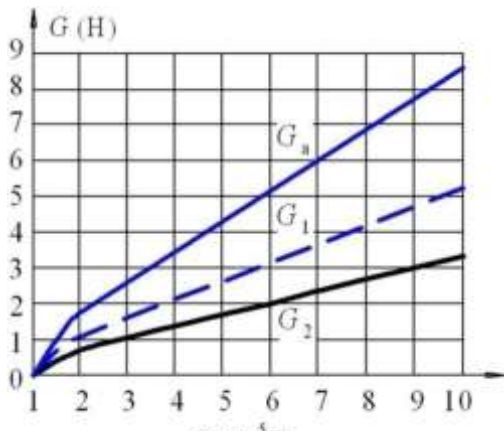


Рис. 19. Залежності величини сили аеродинамічної тяги від тиску стікаючого газу: G_1 — сила від швидкості витікання газу; G_2 — сила від різниці тисків; G_a — сумарна сила

де: $k = C_p/C_v$ (для адіабатного процесу і повітря $k=1,4$), C_p — теплоємність газу при постійному тиску, Дж/моль; C_v — теплоємність газу при постійному об'ємі, Дж/моль; P_1, ρ_1 — тиск та густина газу на вході; P_2, ρ_2 — тиск та густина газу на виході; F_2 — площа поперечного перетину сопла на виході газу, м². Залежності (рис. 19) ілюструють зміну сили від швидкості витікання стисненого повітря G_1 , крива G_2 — від різниці тисків, G_a — відображає сумарну силу тяги. За залежностями встановлено силу аеродинамічної компенсації G в функції числа сопів та площин F їх поперечного перетину або діаметрів.

Якщо задати n отворів діаметром d , то витрату маси M_c стисненого повітря й величину сили реактивної тяги G можна обчислити за формулами:

$$M_c = Mn \left(\frac{d}{d_o} \right)^2; \quad G = G_a n \left(\frac{d}{d_o} \right)^2, \quad (26)$$

де M — маса газу, що витікає через сопло за одиницю часу; G_a — сила протидії гравітаційному навантаженню мобільного РДО, тобто аеродинамічна сила; n — кількість форсунок (отворів) генератора тяги. Слід урахувувати, що збільшення числа сопів до сотень при одночасному зменшенні їх діаметра, аж до десятих часток міліметра, а це можливо застосуванням лазерної технології, сприяє зниженню турбулентності потоку повітря на виході сопел генератора пневматичної реактивної тяги.

Також в розділі викладені результати дослідження впливу сили ваги

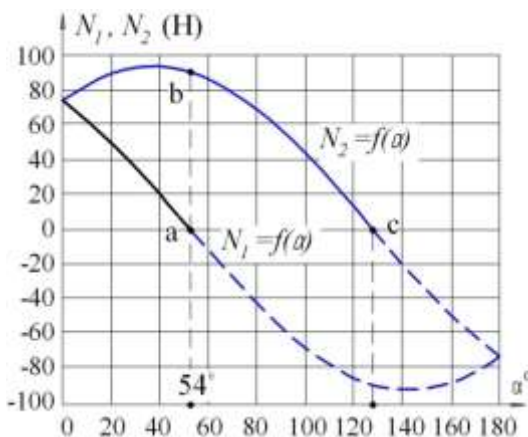


Рис. 20. Графіки залежності нормальних реакцій N_1, N_2 опор робота від кута α його нахилу до обрію

мобільного РДО на технологічне навантаження N_i згідно рівнянь рівноваги (див. формули (5.62) рукопису). Кут α (рис. 20) нахилу мобільного робота до обрію технологічного простору може змінюватись у межах $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$. Як видно із графіків при певних характеристиках робота (ваги, жорсткості підпультів, потужності приводів і т.п.) обидві технологічні реакції N_1 і N_2 додатні до значення кута нахилу поверхні переміщення $\alpha \leq 54^\circ$ (на графіках позначено точками «а», «б» і «с»).

Таким чином отримані графоаналітичні залежності для керування режимами та

параметрами (тиск стислого повітря на вході генератора, швидкість витікання, кількість сопел) функціонування генератора аеродинамічної тяги надають можливість здійснювати автоматизоване керування процесом протидії гравітаційному навантаженню мобільного робота довільної орієнтації у просторі.

У шостому розділі викладені експериментальні дослідження процесу керування генератором реактивної тяги, що проведені з метою апробації 3-го принципу керування мобільними РДО, а саме: застосування аеродинамічної піднімальної сили як засобу протидії гравітаційному навантаженню, що сприяє підвищенню надійності утримання мобільних РДО на поверхні переміщення довільної орієнтації у технологічному просторі. Здійснено постановку повнофакторного експерименту (ПФЕ), який дозволив не тільки апробувати доцільність застосування пневматичної реактивної тяги для мобільних РДО, але й здійснити пошук квазіоптимальних значень факторів, а саме: тиску на вході генератора, діаметру та кількості сопел (див. нижче формули (27) та (28), що визначають ефективність роботи пневматичного генератора тяги.

У даному розділі спочатку сформульоване завдання постановки ПФЕ, далі описана методика експерименту й виконані дисперсійний і регресійний аналізи отриманих експериментальних даних, включаючи перевірку отриманої регресійної моделі на адекватність реальному процесу. На завершенні розділу виконане дослідження регресійної та аналітичної моделей генератора тяги для мобільних роботів довільної орієнтації у просторі.

На рис. 21 показаний загальний вид експериментального стенда із пневматичним генератором тяги для мобільного робота. Як видно на фото джерелом надлишкового тиску в камері генератора тяги 1 служив безолійний поршневий компресор 2 мод. Gentilin CS 240/24 (Італія), що створює тиск до 8 бар, із продуктивністю подачі стисненого повітря 150 л/хв. Контроль тиску здійснювався манометром 3, а величина тиску задавалася регулятором тиску 4 у діапазоні (2...8) бар. Зовнішнє навантаження на генератор тяги здійснювалося безштоковим пневматичним циліндром 5 мод. DNT-40-400-PPV, з'єднаним з аналоговим датчиком переміщення 6 і керованим контролером позиціонування 7 мод. SPC200 виробництва компанії FESTO з модулем інтерфейсу мод. SPC200-SCU-AIF і панеллю керування 8 мод. SPC200-MMI. Вимір сили пневматичної тяги здійснювався цифровим динамометром 9 мод. Weiheng WH-A08 із зусиллям до 50 кг (490 Н), що має похибку вимірювання ± 5 г при зусиллі (0...10) кг та ± 10 г у діапазоні зусиль (10...45) кг.

Власне процес створення аеродинамічної піднімальної сили генератором тяги здійснювався при варіюванні наступних факторів (незалежних змінних): F – ефективної площі сопел за допомогою зміни числа n отворів сопел і їх діаметрів d при регулюванні тиску p у генераторі тяги й силового навантаження Q на екстремальних рівнях згідно з матрицею планування експерименту. В процесі експерименту від компресора стисле повітря подавалось в генератор тяги 1 (рис. 22), встановлений на кільцях 2 Карданового підвісу, через штуцери 3. В результаті в камері «А» створювалась зона підвищеного тиску в діапазоні (2...8) бар.



Рис. 21. Експериментальний стенд для дослідження параметрів генератора тяги

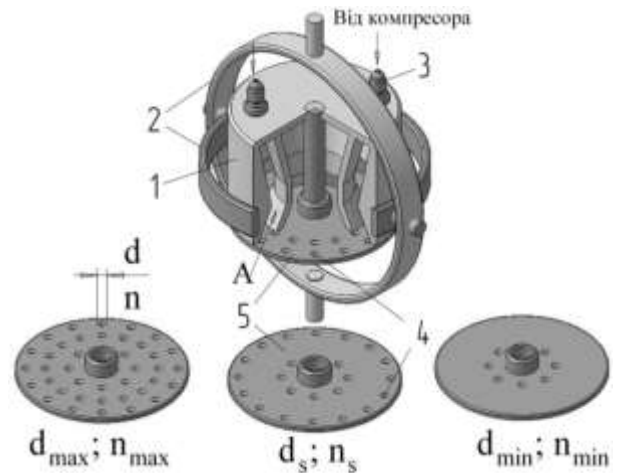


Рис. 22. Пневматичний генератор тяги зі змінними мембранами

Стисле повітря, стікаючи через сопла 4 мембран 5, утворювало аеродинамічну тягу. Оскільки умови проведення повнофакторного експерименту передбачають варіювання факторів на екстремальних рівнях, то вказані мембрани змінювались (з різним тиском) відповідно до значень діаметрів сопел $d_{\min}^{\max}$ та їх кількості $n_{\min}^{\max}$, включаючи основний (середній) рівень значень d_s і n_s матриці планування експерименту.

У якості гіпотези на етапі постановки завдання було представлено цільову функцію у вигляді добутку

$$R = C_0 f_1(n) f_2(p_j) f_3(d_k) \rightarrow \max \quad (27)$$

при обмеженнях:

$$\begin{aligned} \frac{\pi d^2}{4} n_{\min} \leq F_i(d, n) \leq \left(\frac{\pi d^2}{4} n_{\max} \right); \\ p_{\min} < p_j \leq p_{\max}; \\ d_{\min} \leq d_k \leq d_{\max}, \end{aligned} \quad (28)$$

де: R – аеродинамічна тяга, Н; C_0 – постійний коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх факторів, не відображених у цільовій функції; $f_1(n_i)$, $f_2(p_j)$, $f_3(d_k)$ – факторні залежності (функції змінних), що підлягають визначенню; F – площа поперечного перерізу сопла, обумовлена діаметром d отворів витікання газу і їх кількістю n ; p_j – тиск у соплах генератора тяги.

У відповідність із прийнятими обмеженнями (28) при постановці повнофакторного експерименту варіювання факторів цільової функції проводилося в наступних межах:

$$\begin{aligned} 10 \leq n_i \leq 80; \\ (1 \leq p_j \leq 8) \cdot 10^5, \text{ Па}; \\ (0,001 \leq d_k \leq 0,0045), \text{ м}, \end{aligned} \quad (29)$$

де: n_i – кількість сопел; p_j – тиск у соплах діаметром d_k .

Усього було проведено $N = n^k m = 2^3 8 = 64$ дослідів, де: n – число рівнів варіювання факторів (max , min); k – число факторів; m – кількість повторних реалізацій кожного дослідів, виконуване з метою гарної відтворюваності результату дослідів й зменшення дисперсій помилок вимірів.

В результаті експерименту та після його статистичного аналізу за критеріями Кохрена та Стюдента з урахуванням перевірки на адекватність результатів експерименту реальному процесу за критерієм Фішера отримано регресійну модель керування режимами функціонування генератора тяги:

$$y = 4,22 + 1,04x_1 + 0,67x_2 + 0,75x_3, \quad (30)$$

де: y – кодовані значення аеродинамічної піднімальної сили R , та факторів x_1, x_2, x_3 в натуральних логарифмах.

Для відшукування координат екстремуму регресійну модель (30) підстановкою кодованих значень змінних (29) і потенціювання перетворено цільову функції (27) у натуральному вираженні:

$$R = e^{5.68} (n)^{0.988} (p)^{0.965} (d)^{0.99}, \quad (31)$$

де $e = 2,72$ – постійний коефіцієнт, основа натуральних логарифмів.

Таким чином, у результаті експерименту встановлено, що керування силою аеродинамічної тяги R може бути здійснено за залежністю (31) від 3-х незалежних факторів: кількості сопел n , надлишкового тиску p у них і діаметрів d поперечного перерізу сопел. Це дозволило здійснити аналіз впливу чисельних характеристик незалежних факторів на параметр оптимізації, тобто силу реактивної тяги, на підставі аналітичного виразу (31) у натуральному вимірі. На рис. 23 представлені графіки залежності реактивної сили тяги R від екстремальних значень незалежних факторів: кількості сопел n_{min}^{max} та їх діаметрів d_{min}^{max} при зміні тиску в соплах у діапазоні експерименту. Згідно з матрицею планування ПФЕ екстремальні значення факторів становили: кількості сопел $n_{min}^{max} = n_{10}^{80}$, а їх діаметрів $d_{min}^{max} = d_{1 \cdot 10^{-3}}^{4,5 \cdot 10^{-3}}$, м. Встановлено, що при максимальному тиску у соплах при переході від мінімального значення їх кількості $n_{min} = 10$ до середніх значень $n_s = 45$ при максимальних діаметрах сопел

$d_{max} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ (м) приріст сили реактивної тяги становить 77%.

У той час як при переході від мінімального діаметра сопел $d_{min} = 1 \cdot 10^{-3}$, м до середніх значень діаметрів $d_s = 2,75 \cdot 10^{-3}$ (м) при максимальному значенні кількості сопел $n_{max} = 80$ зазначений приріст реактивної тяги становить менше, а саме 63%. Інакше кажучи, відмінність ефективності керування кількістю сопел і їх діаметрів становить 14%.

Значення абсолютних похибок в діапазоні від 0,7% до 5,1% обчислення реактивної тяги мобільного робота за

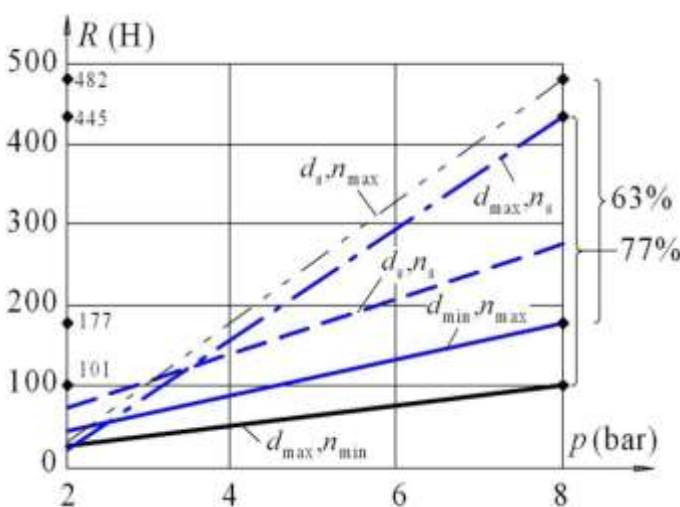


Рис. 23. Залежність сили тяги R від екстремальних значень (min , max) кількості n сопел і діаметрів d отворів в діапазоні тиску $p = (2...8)$ бар

аналітичною залежністю (31) відносно експериментальних даних, з урахуванням коефіцієнта кореляції $K = 0,9998$, підтверджує, що рівняння регресії (30) практично повністю описує результати експерименту.

В остаточному підсумку проведені експериментальні дослідження надають достатні підстави ствердження доцільності використання аеродинамічної сили для компенсації та протидії гравітаційному навантаженню з метою підвищення надійності утримання мобільних роботів у технологічному просторі довільної орієнтації при виконанні різноманітних виробничих завдань.

У **сьомому розділі** розроблено інженерні методики синтезу мобільних роботів довільної орієнтації. Запропоновані інженерні методики синтезу мобільних РДО дозволяють здійснювати синтез вказаних роботів, спрямований на визначення їх параметрів згідно технічного завдання. Для мобільних РДО, створених за 1-м принципом синтезу, створено інженерну методику обчислення параметрів керування модулями накопичення потенціальної енергії і перетворення її в кінетичну енергію руху роботів. Запропонована методика дозволяє за рахунок рекуперації енергії руху робота суттєво зменшити сумарну потужність приводів і тим самим підвищити енергоефективність мобільних РДО.

На основі 2-го принципу синтезу мобільних РДО здійснено параметричний синтез педіпуляторів мобільного робота з інтегрованими приводами, що дозволяє забезпечити інваріантність приводної підсистеми до будь якої системи координат технологічного простору довільної орієнтації, що в свою чергу, забезпечує розширення технологічних можливостей мобільних роботів.

На основі 3-го принципу керування синтезом мобільних РДО створено методику розрахунку параметрів генератора тяги. Вперше застосування генератора аеродинамічної сили, як засобу протидії гравітаційного навантаження мобільних РДО, суттєво підвищує надійність утримання мобільних роботів на поверхні довільної орієнтації у технологічному просторі. Дана методика апробована постановкою та результатами повнофакторного експерименту.

Створені автоматизовані модулі САЕ-системи для параметричного синтезу мобільних РДО з газовими пристроями накопичення та перетворення енергії руху роботів, а також антропоморфних педіпуляторів роботів дозволяють визначати значення конструктивно-технологічних параметрів мобільних роботів. В кінцевому результаті запропоновані автоматизовані модулі САЕ сприяють підвищенню ефективності автоматизованого синтезу мобільних РДО.

Для мобільних РДО з газовими модулями накопичення енергії розроблено модуль САЕ системи, за допомогою якого здійснюється обчислення характеристик параметрів газового накопичувача. Автоматизований модуль (рис. 24) відкликається на дії користувача через реалізовані функції-події, такі як натискання відповідних піктограм та наведення курсору. Крім того, автоматизований модуль містить діалогове вікно «Методика розрахунку» (рис. 25), що надає можливість корегування аналітичних залежностей газового накопичувача енергії.



Рис. 24. Діалогове вікно «Виведення результатів»

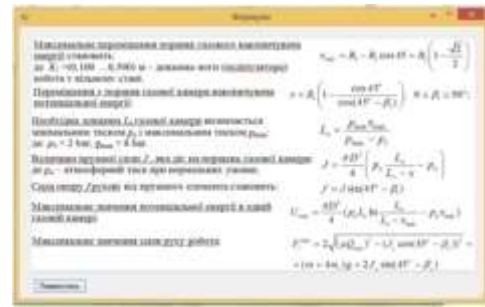


Рис. 25. Діалогове вікно «Методика розрахунку»

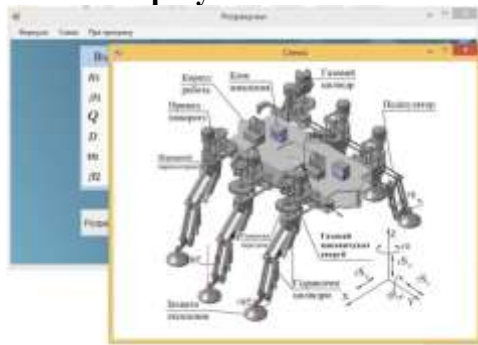


Рис. 26. Діалогове вікно прикладу побудованої схеми технічного розв'язку мобільного РДО

У вікні діалоговому «Схема» (рис. 26) відображаються відповідні схеми технічних розв'язків мобільних РДО з газовим модулем накопичування та перетворення енергії руху робота з позначенням величин, що використовуються під час розрахунку.

Таким чином, розроблений модуль САЕ системи автоматизованого синтезу мобільних РДО з газовими модулями накопичення та перетворення енергії руху суттєво підвищує ефективність вибору та розрахунку параметрів функціонування приводів рекуперації енергії руху мобільних РДО.

Для синтезу мобільних РДО антропоморфного типу створено автоматизований модуль параметричного синтезу педіпуляторів робота як основних виконавчих органів. Даний модуль являє собою різновид САЕ системи, програму якої наведено в Додатках П і Р до рукопису. Інтерфейс програми складається з трьох вікон: «Вхідні дані», «Результати», «Графіки». У вкладці «Вхідні дані» надається вісім полів для введення користувачем параметрів (рис. 27) та методики їх розрахунку (рис. 28).



Рис. 27. Діалогове вікно «Результати» розрахунку параметрів



Рис. 28. Діалогове вікно розрахунку параметрів антропоморфного педіпулятора

В модулі САЕ крім вікон вмонтовано п'ять основних вкладок: «Файл», «Правка», «Формули», «Схема», «Методика розрахунку». У перших двох вкладках користувач може здійснювати різні операції над вхідними даними й результатами розрахунків. В останніх двох вкладках продемонстровано схему гофрованої камери

педіпулятора робота (рис. 29) та алгоритм розрахунку параметрів, на основі якого базується програма автоматизованого модуля САЕ. В цьому вікні можливе введення різноманітних схем технічних розв'язків антропоморфних крокуючих пристроїв мобільних РДО.

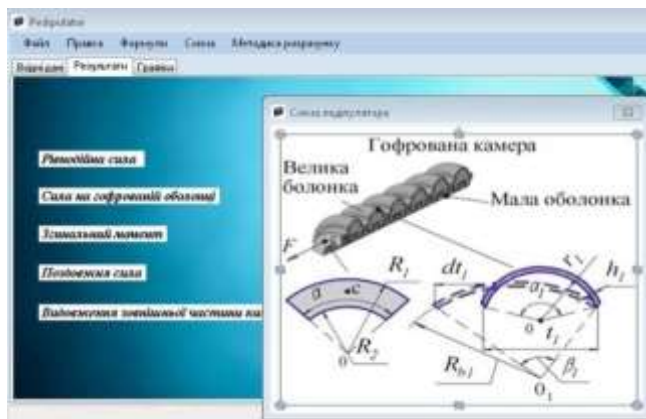


Рис. 29. Вікно інтерфейсу «Розрахункова схема»

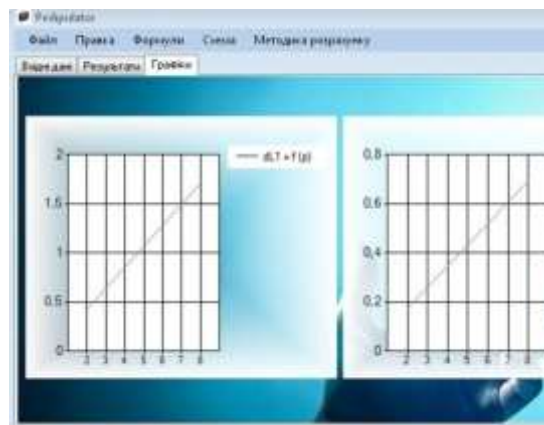


Рис. 30. Вікно інтерфейсу симуляції антропоморфних мобільних РДО

На відміну від попереднього автоматизованого модуля САЕ даний модуль дозволяє здійснювати симуляцію функціонування (рис. 30) антропоморфного пристрою мобільного РДО з виводом графоаналітичних залежностей його параметрів. Таким чином, створені автоматизовані модулі САЕ системи для параметричного синтезу педіпуляторів мобільного робота, як основних виконавчих органів, дозволяє не тільки розраховувати параметри педіпуляторів, а й додатково здійснювати симуляцію функціонування антропоморфних пристроїв мобільних РДО з метою апробації квазіоптимальних режимів функціонування та конструктивно-технологічних параметрів мобільних роботів. В сукупності це дає скорочення часу розробки РДО що найменше в 3...3,5 рази та підвищення якості їх проектування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Основні наукові і практичні результати полягають в наступному:

1. Розроблена та апробована методологія автоматизованого синтезу мобільних роботів довільної орієнтації у технологічному просторі, що базується на трьох основоположних принципах:

а) упереджуюче накопичення потенціальної енергії та перетворення її в кінетичну енергію руху робота, що дозволяє досягати економії ресурсів автономних джерел живлення що найменше на 35% ... 40% за рахунок переміщення мобільних РДО під дією кінетичної енергії;

б) інтеграції приводів переміщення та орієнтації робота, що призводить до зниження ваги робота на 15% ... 35%, і як наслідок, зменшення гравітаційного навантаження, що у відповідному діапазоні розширяє функціональні можливості по технологічному навантаженню для мобільних роботів саме довільної орієнтації;

в) застосування аеродинамічної піднімальної сили як засобу протидії гравітаційному навантаженню, що надає можливість збільшення технологічного навантаження при від'ємних кутах розташування поверхні контакту.

2. Вперше розроблено методику структурно-параметричного синтезу мобільних РДО, як багаторівневої технічної системи із застосуванням модифікації параметричного синтезу мобільних роботів, що надало можливість створення автоматизованої системи проектування, що надає проектувальникам засоби формування доцільних структур та їх компонентів і обраховувати квазіоптимальні значення конструктивних параметрів мобільних РДО.

3. Вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації мобільних РДО, як ієрархічної технічної системи, дозволяє знаходити режими функціонування та конструктивно-технологічні параметри залежно від вантажопідйомності чи технологічного призначення мобільного робота, що забезпечує втримання мобільних РДО на поверхнях довільної орієнтації що розширює можливість їх використання в різних галузях промисловості.

4. Отримані на основі квазістатичного, кінематичного та динамічного аналізу аналітичні залежності дозволяють здійснювати автоматизований синтез пристроїв зчеплення та переміщення робота залежно від граничних значень технологічних навантажень, що надає можливість зіставляти силу зчеплення й потужність приводів із необхідним технологічним навантаженням при виконання виробничих завдань.

5. Застосування аеродинамічної піднімальної сили мобільного РДО як засобу протидії гравітаційній силі дозволяє при автоматичному регулюванні сили тяги залежно від кута нахилу робота до обрію зменшити потужність приводів зчеплення робота з поверхнею переміщення що найменше на 25% ... 35%, а звільнений енергетичний ресурс направити на підвищення ефективності виконання як технологічних, так і транспортних операцій.

6. Отриманий емпіричний масив даних, на основі статистичного аналізу якого, розроблені регресійна та аналітична моделі залежності аеродинамічної піднімальної сили, як засобу протидії гравітаційному навантаженню, від режимів керування генератором тяги, що дозволяє визначати раціональні режими роботи РДО і генератора з врахуванням як нахилу поверхні, так і технологічного навантаження.

7. Створені модулі САЕ, як інструментарій автоматизованого синтезу мобільних РДО з газовими пристроями накопичення та перетворення енергії руху роботів, а також антропоморфних педипуляторів роботів, які дозволяють визначати значення конструктивно-технологічних параметрів роботів, та здійснювати тестування розроблених конструкцій шляхом симуляції функціонування вказаних пристроїв на етапі проектування зі скороченням часу та зменшенням трудомісткості робіт на 20%...35%.

8. На основі розробленої методології синтезу мобільних РДО створені модифікації мобільних засобів в галузі робототехніки. Отримані технічні розв'язки дозволяють роботам виконувати різноманітні технологічні операції на поверхнях довільної орієнтації в різних системах координат при довільній топології поверхонь руху робота з розширеними функціональними можливостями.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Полищук М.Н., Тышкевич Ю. В. Проектирование технологического оснащения и наладка промышленных роботов. / Под общ. ред. проф. Ямпольского Л.С. Київ: Дорадо-Друк, 2014. 272 с. *(Дисертанту належить постановка задач, планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів)*
2. Polishchuk M. M. Mobile robots of arbitrary orientation in the technological space. *Engineering sciences: development prospects in countries of Europe at the beginning of the third millennium/Collective monograph*. Stalowa Wola, Poland, 2018. P 369–388.

Публікації у наукових фахових виданнях

3. Поліщук М.М., Пушкін М.С. Конструювання багаторівневої складної агрегатованої системи (САС). *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2008. № 13. С. 69–76. *(Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів)*, (фахове видання).
4. Поліщук М.М., Науменко Ю.О. Вибір методу оптимізації критеріїв багаторівневої складної агрегатованої системи. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2010. №16. С. 84–88. *(Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів)*.
5. Поліщук М.М., Красота Д.І., Шкурченко О.А. Моделювання роботизованого процесу складання. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2011. №19. С. 102–108. *(Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів)*.
6. Поліщук М.М., Землянкін А.В. Дослідження залежності похибки позиціонування пневматичного приводу від параметрів його роботи. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2012. № 20. С. 3–10. *(Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів)*.
7. Полищук М.Н., Баранова Д.К. Модуль САПР механических захватных устройств промышленных роботов. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2012. № 40. С. 87–93. *(Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів)*.
8. Персигов В.К., Поліщук М.М. Аналіз проблем створення технологічних роботів вертикального переміщення. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2014. №1(24). С. 87–95. *(Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів)*.
9. Полищук М. Н. Педипулятор работа вертикального перемещения с возможностью рекуперации энергии движения. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2016. №1(28). С. 107–115.
10. Полищук М. Н., Пуховский Е. С. Адаптивный сборочный модуль промышленного робота. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2016.

№2(29). С. 100–105. (*Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів*).

11. Полищук М. Н. Метод компенсации потерь производительности робототехнологических комплексов. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2017. №1(30). С. 124–129. (В частині оптимізації багаторівневої технічної системи).

12. Полищук М. М. Модернізація вакуумного захвату мобільного крокуючого робота. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. № 2. С. 59–64.

13. Полищук М. М. Оптимізація параметрів крокуючого робота. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2017. №2(31). С. 62–71.

14. Polishchuk M., Oliinyk V. Mobile climbing robot with elastic energy accumulators. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018. №1(82). P.116–122. (*Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів*).

15. Полищук М. Н. Способ мультипликации технологического усилия промышленного робота. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2018. №1(32). С. 146–152.

16. Полищук М. М. Підвищення енергоефективності роботів вертикального переміщення. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2018. №2(32). С. 97–105.

17. Полищук М.М. Принципи синтезу мобільних роботів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2018. Том 29 (68)№ 5. С.1–8.

18. Кузнецов Ю.Н., Полищук М.Н. Области перспективного применения роботов произвольной ориентации в пространстве. *Вісник Херсонського Національного технічного університету*. 2018. № 4(67). С. 63–69. (*Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів*).

19. Полищук М.М. Оптимізація параметрів мобільного робота з газовим накопичувачем енергії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2018. Том 29 (68)№ 6. С. 15–21.

20. Полищук М.М., Кузнецов Ю.М. Морфологічний аналіз і параметричний синтез мобільних роботів довільної орієнтації. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. Том 30 (69) Ч.1, № 2 2019. С. 1–12 (*Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів*).

21. Полищук М.Н. Теоретическое обоснование функционирования антигравитационного мобильного робота. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. Том 30 (69) № 3, 2019. С. 1–9.

22. Полищук М.М. Мобільний робот для обслуговування паркових та лісних деревних масивів. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. № 26, 2019. С. 132–137.

23. Полищук М.М. Мобільний робот з пневматичним акумулятором енергії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. Том 30 (69) № 4, 2019. С. 1–6.

24. Mikhail Polishchuk. The concept of synthesis of walking robots of arbitrary orientation. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи*

автоматичного управління». 2019. № 1(34). С. 90–102.
DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.1.2019.178234>.

25. Polishchuk M. Parametric synthesis of a mobile robot for servicing park trees. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління»*. 2019. № 2(35). С. 70–78.

26. Polishchuk M.M. Optimization of mobile robot parameters for surfaces of arbitrary orientation. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. Том 31 (70) № 1, 2020. С. 1–5.

27. Mikhail Polishchuk. Dynamic model of a walking mobile robot. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2020. Том 1, № 36. С. 8–16.
<https://doi.org/10.20535/1560-8956.36.2020.209749>

28. Поліщук М.М., Ткач М.М. Дослідження модуля аеродинамічної піднімальної сили мобільного робота довільної орієнтації. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. Том 31 (70) № 4, 2020. С. 1–11.

Публікації у наукометричних базах Scopus та Web of Science

29. Polishchuk, M. Anthropomorphic gripping device for an industrial robot: design and calculation of parameters. *Springer Nature Applied Sciences* (2019) 1:503.
<https://doi.org/10.1007/s42452-019-0535-z> (Scopus, Web of Science)

30. Mikhail Polishchuk, Mykyta Suyazov and Mark Opashnyansky. Study on numerical analysis of dynamic parameters of mobile walking robot. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*. ISSN: 2289-4659 e-ISSN: 2231-8380 Vol.14, Issue 1, 2020: 6380–6392. DOI: <https://doi.org/10.15282/jmes.14.1.2020.14.0499> (Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів). (Scopus)

31. Mikhail Polishchuk, Mikhail Tkach, Igor Parkhomey, Juliy Boiko, Oleksander Eromenko. Experimental Studies on the Reactive Thrust of the Mobile Robot of Arbitrary Orientation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*. ISSN 2089-3272. Vol. 8, No 2. 2020, pp. 340–352. DOI: [10.11591/ijeei.v8i2.1681](https://doi.org/10.11591/ijeei.v8i2.1681) (Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів). (Scopus)

32. Polishchuk M.N., Oliinyk V.V. Dynamic Model of a Stepping Robot for Arbitrarily Oriented Surfaces. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019*. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 938. Springer Cham. (Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів). (Scopus)

33. Polishchuk M., Tkach M. Mobile Robot with an Anthropomorphic Walking Device: Design and Simulation. *FME Transactions*. Volume 48, No 1, 2020. P.13–20. (Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів). (Scopus)

34. Mikhail Polishchuk, Mikhail Tkach, Igor Parkhomey, Juliy Boiko, Oleksander Eromenko. Walking Mobile Robot for Trimming Trees: Design and Modeling. *International Journal of Control and Automation*. ISSN: 2005-4297 IJCA. Vol. 13, No.2, (2020), pp. 1760-1772. <http://sersc.org/journals/index.php/IJCA/article/view/34012> (Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів). (Scopus)

35. M. Polishchuk, M. Tkach. Experimental Studies of Robotic Assembly of Precision Parts. *FME Transactions*, ISSN / eISSN: 1451-2092. VOL. 49, No 1, 2021, pp. 44–55. <https://www.mas.bg.ac.rs/istrazivanje/fme/start> (Дисертанту належить аналіз,

модельовання і узагальнення результатів). (Scopus)

36. Mikhail Polishchuk, Mikhail Tkach, Igor Parkhomey, Juliy Boiko, Yevhenii Batrak, Oleksander Eromenko. Intelligent machine for sorting semi-precious minerals. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. Vol. 22, No. 3, June 2021, pp. 1354~1364 ISSN: 2502-4752, DOI: 10.11591/ijeecs. v.22, pp. 1354-1364 (Дисертанту належить конструкція матричного пристрою відеоспостереження для роботизованої машини). (Scopus)

Патенти на винаходи

37. Спосіб переміщення педіпуляторів крокуючого робота і пристрій для його здійснення: пат. 111021 Україна: МПК В62D 57/032. Ямпольский Л.С., Поліщук М.М., Персиков В.К.; заявники і патентовласники: Ямпольский Л.С., Поліщук М.М., Персиков В.К.; № а201411741; заявл. 30.10.2014; опубл. 10.03.2016, Бюл. 5. 4 с. (Дисертанту належить спосіб і конструкція).

38. Крокуючий мобільний робот: пат. 117065 Україна: МПК В62D 57/032. Поліщук М.М., Ткач М.М., Пасько В.П.; заявники і патентовласники: Поліщук М.М., Ткач М.М., Пасько В.П.; № а201701440; заявл. 16.02.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. 11. 4 с. (Дисертанту належить постановка завдання і конструкція).

39. Захват крокуючого робота вертикального переміщення: пат. 119109 Україна: МПК В62D 57/02. Поліщук М.М.; заявник і патентовласник Поліщук М.М.; № а2017110873; заявл. 07.11.2017; опубл. 25.04.2019, Бюл. №8. 4 с.

40. Антигравітаційний мобільний робот Поліщука: пат. 120410 Україна: № 201805661. МПК В62D 57/024; Поліщук М.М.; заявник і патентовласник Поліщук М.М.; заяв. 22.05.2018; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22 К.: Укрпатент, 2018. 4 с.

41. Мобільний робот для обрізки дерев: пат. 119633 Україна: МПК А01G 23/00. Поліщук М.М., Ткач М.М.; заявники і патентовласники: Поліщук М.М., Ткач М.М.; № а201901310; заявл. 11.02.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. №. 13. 4 с. (Дисертанту належить принципова схема і конструкція).

42. Крокуючий мобільний робот: пат. № 121432 Україна: МПК В62D 57/032. Поліщук М.М., Кузнецов Ю.М.; заявники і патентовласники: Поліщук М.М., Кузнецов Ю.М.; № а201807976; заявл. 18.07.2018. опубл. 25.05.2020, Бюл. № 2. с. 4. (Дисертанту належить принципова схема і конструкція).

43. Антропоморфна кисть промислового робота: пат. 120391 Україна: МПК В25J 15/08. Поліщук М.М.; заявник і патентовласник Поліщук М.М.; № а201711458; заявл. 14.03.2017; опубл. 25.11.2019, Бюл. №. 22.

44. Транспортний пристрій для переміщення усередині труб: пат. 118921 Україна: МПК F16L 55/34. Поліщук М.М.; заявник і патентовласник Поліщук М.М.; заявл. 24.10.2017; опубл. 25.03.2019, Бюл. №. 6. 4 с.

45. Мобільний робот для обслуговування паркових дерев: Україна а202007378; Поліщук М.М., Ткач М.М.; заявники і патентовласники Поліщук М.М., Ткач М.М. опубл. 17.03.2021. Бюл. № 9. (Дисертанту належить принципова схема і конструкція).

46. Антропоморфний крокуючий пристрій: Україна: а201607429: МПК В25J 11/00. Поліщук М.М., Ткач М.М.; заявники і патентовласники Поліщук М.М., Ткач М.М. заяв. 02.07.2019; опубл. 10.12.2019. Бюл. № 17.

47. Спосіб Поліщука мультиплікації зусилля і пристрій для його здійснення:

пат. Україна 113679; МПК F15B 3/00. Поліщук М.М., заявник і патентовласник Поліщук М.М., заяв. 27.07.2015; опубл. 7.02.2017, Бюл. № 4. (*Дисертанту належить принципова схема і конструкція*).

Патенти на корисні моделі

48. Захват крокуючого робота: пат. України на корисну модель 117979: МПК B65H 5/08. Поліщук М.М., Ткач М.М., Пасько В.П.; заявники і патентовласники: Поліщук М.М., Ткач М.М., Пасько В.П.; № u201702363; заявл. 14.03.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. 13. 4 с. (*Дисертанту належить постановка завдання і конструкція*).

49. Складальний модуль маніпулятора: пат. України на корисну модель 120783: МПКВ25J 15/00. Поліщук М.М.; заявник і патентовласник Поліщук М.М.; № a201509697; заявл. 07.10.2015; опубл. 27.11.2017, Бюл. 22. 4 с.

50. Мобільний робот для моніторингу дерев: пат. України на корисну модель: a201800828. МПК B62D 57/024; Поліщук М.М.; Ткач М.М. заявники і патентовласники Поліщук М.М.; Ткач М.М. заяв. 23.03.2021; опубл. 18.10.2021. Бюл. 21. (*Дисертанту належить постановка завдання і конструкція*).

Тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій

51. Polishchuk M.N. Walking robot with flexible pedipulators. *The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings*, (April 27–28, 2018. Czech Republic, Brno). Baltija Publishing. 2018. С. 42–45.

52. Поліщук М.М. Напрямки розвитку мобільних роботів довільної орієнтації в просторі. *International Multidisciplinary Conference: Key issues of education and sciences: development prospects for Ukraine and Poland*. 20–21 July. Stalowa Wola, Republic of Poland 2018. Volume 6, pp. 95–99.

53. Кузнецов Ю.Н., Полищук М.Н. Принципы синтеза мобильных роботов произвольной ориентации. «*Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації*»: Матеріали IV-ої Міжнародної наук.–практ. конф. (Херсон, Вересень 12–16 вересня 2018р.). Херсон, 2018. С. 15–19.

54. Кузнецов Ю.М., Поліщук М.М. Тактично-оперативне застосування мобільних роботів довільної орієнтації. *Науково-практична конференція: Застосування сухопутних військ збройних сил України у конфліктах сучасності*. Сб. тез. (Львів, 15 листопада 2018).

55. Поліщук М.М. Кузнецов Ю.М. Мобільний робот з генератором аеродинамічної піднімальної сили. *XII міжн. наук.-практ. конференція: Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси*, 21–22 травня 2019р. Київ, МОН України. 2019. С. 28–33.

56. Полищук М.Н. Мобильный робот с педипуляторами произвольной ориентации. *XLIX Международная научная конференция «Актуальные научные исследования в современном мире»* (Переяслав-Хмельницкий, 26–27 травня 2019р.), iSCIENCE, 2019. С 21–29.

57. Поліщук М.М. Інноваційні принципи синтезу мобільних роботів. *L Міжнародна наукова конференція: Актуальні наукові дослідження в сучасному світі* (Переяслав-Хмельницкий, червень 2019). Сб.: 6(50) ч. 2 С. 130–142.

58. Кузнецов Ю. Н., Полищук М. Н. Компьютерное моделирование

мобильных роботов, синтезированных на новых принципах. *Современные проблемы машиноведения*. Гомель, 2018. Сб. трудов СПМ: С. 31–33.

59. Кузнецов Ю.М., Полищук М.М. Перспективы застосування мобільних роботів у плодоовочевому господарстві. Сб.: *"Сучасні проблеми землеробської механіки"* (Київ, 17–19 жовтня 2018). С. 202–203.

60. Кузнецов Ю.Н., Полищук М.Н. Перспективы применения мобильных роботов в Украине. *VII Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи – 2018»* (Черкаси, вересень, 2018). Зб. тез. С. 70–74.

61. Кузнецов Ю.М., Полищук М.М. Застосування мобільних роботів довільної орієнтації в Україні. *VI Міжнародна науково-практична конференція: Зброя та безпека Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку*. (Київ, 11–12 жовтня 2018). Зб. тез. С. 102–103.

62. Kuznetsov Y., Polishchuk M. Mobile climbing robots with energy accumulators. *International Scientific Conference UNITECH* (03.12.2019 Gabrovo, Bulgaria). Vol. 57. P. 53–57.

63. Полищук М.М. Мобільний робот з генератором аеродинамічної піднімальної сили. XX міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ІРТК-2019, 21–22 травня 2019р. Київ, Україна). Зб. тез. С. 28–33.

64. Полищук М.М. Мобільний робот для обслуговування дерев. *Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси. ІМТСК 2019. I міжнародна науково-практична конференція* (29–31 травня 2019 р., Черкаси, Україна). Матеріали конференції. С. 81–84.

65. Polishchuk M. N. Parametric optimization of a walking mobile robot for arbitrary oriented surfaces. *Scientific achievements of modern society: Abstracts of V International Scientific and Practical Conference* (Liverpool, United Kingdom 8-10 January 2020). P. 167–176. URL: <http://sci-conf.com.ua>

66. M. Polishchuk and M. Tkach. Information Technology for the Recognition of Semi-Precious Minerals, *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 315-318, doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349264. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9349264>

Публікації в інших виданнях

67. Polishchuk M., Opashnianskyi M., Suyazov N. Walking Mobile Robot of Arbitrary Orientation. *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*. 2018. №3. P. 1–11. (*Дисертанту належить аналіз та моделювання робота*).

68. Полищук М. Н. Шагающий робот с гибкими педипуляторами. *The development of technical sciences: problems and solutions*. 2018. №1. С. 42–45.

69. Полищук М. Н. Инновационные подходы к синтезу мобильных роботов. *Инновационные подходы в современной науке*. 2018. №14. С. 65–71.

70. Полищук М. Н. Мобильный шагающий робот. *Технические науки: проблемы и решения*. 2018. №6. С. 50–54.

71. Кузнецов Ю.Н., Полищук М.Н. Перспективы применения мобильных роботов в Украине. *Датчики, прилади та системи – 2018: збірник праць VII міжнар. наук.-техн. конф.* (Черкаси, 17–21 вересня 2018р.). Черкаси, 2018. С. 70–74

(Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів).

72. Поліщук М.М. Напрямки розвитку мобільних роботів довільної орієнтації в просторі. *International Multidisciplinary Conference: Key issues of education and sciences: development prospects for Ukraine and Poland* (Stalowa Wola, Republic of Poland 20–21 July 2018). Stalowa Wola, Volume 6, 2018. pp. 95–99.

73. Кузнецов Ю.М., Поліщук М.М. Мобільний робот із гідравлічними педипуляторами. *Промислова гідравліка і пневматика: праці XIX міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП. Львів, 2018. С.61–62* (Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів).

74. Кузнецов Ю.Н., Полищук М.Н. Компьютерное моделирование мобильных роботов, синтезированных на новых принципах. Сб.: *Современные проблемы машиноведения*. Гомель, 2018. Сб. трудов СПМ: С. 31–33. С. 31–33 (Дисертанту належить планування роботи, аналіз, моделювання і узагальнення результатів).

75. Polishchuk M.N. Principles of designing mobile robots. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2018. №22. P. 31–37.

76. Kuznetsov Y., Polishchuk M. Mobile climbing robots with energy accumulators. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2018. Vol.57. P. 53–57. (Дисертанту належить аналіз, конструкція, моделювання і узагальнення результатів).

77. Polishchuk, M.N., Yampol'skii, L.S. Automatic search procedure for optimum robot-assisted assembly of precision joints. *Soviet engineering research this link is disabled*, 1986, 6(8), pp. 43–47. (Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів).

78. Polishchuk M.N., Kuznetsov Yu.N. Mobile robots of arbitrary orientation: Design and modelling. “*The Actual Problems of the World Today*” / Collective monograph. London, 2019. P.536–549. (Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів).

79. Кузнецов Ю.М., Поліщук М.М. Мобільні роботи для плодоовочевих господарств. *Науковий журнал «Техніка та енергетика»* 2019. Том 9, № 3 С. 59–64. (Дисертанту належить аналіз, моделювання і узагальнення результатів).

80. Полищук М.Н. Мобильный робот с педипуляторами произвольной ориентации. *Актуальные научные исследования в современном мире*. Вып. 5(49) Ч. 1, 2019. С 21–29.

81. Поліщук М.М. Інноваційні принципи синтезу мобільних роботів. *Актуальные научные исследования в современном мире*. Вып. 6(50), ч. 2, 2019. С. 130–142.

82. Поліщук М., Ткач М., Пасько В. Крокуючий мобільний робот. *Винахідник і раціоналізатор*. ДП «Український інститут інтелектуальної власності». №1, 2020. С. 8–12. (Дисертанту належить принципове рішення та конструкція).

83. Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління: підручник. [Авт. кол.: Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, Б.Б. Самотокін, М.М. Поліщук, М.М. Ткач, К.Б. Остапченко, О.І. Лісовиченко]. Житомир: ЖДТУ, 2005. 680 с. (Дисертанту належить в книзі 1: розділи 4, 6, 9; аналіз, моделювання і узагальнення результатів).

АНОТАЦІЯ

Поліщук М.М. Автоматизований синтез мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – Машинознавство. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-практичної проблеми – розробці методології синтезу мобільних роботів довільної орієнтації (РДО) у технологічному просторі з системами втримання мобільних роботів на поверхні переміщення для компенсації гравітаційного та технологічного навантаження.

Запропонована методологія автоматизованого синтезу мобільних роботів довільної орієнтації у технологічному просторі базується на трьох основоположних принципах: 1) нагромадження потенціальної енергії переміщення й перетворення її в кінетичну енергію руху робота; 2) інтеграції приводів поздовжнього й вертикального переміщення; 3) застосування аеродинамічної піднімальної сили як засобу протидії гравітаційному навантаженню на робот. На основі розробленої методології автоматизованого керування синтезом мобільних роботів створені нові модифікації мобільних засобів в галузі робототехніки. Проведені експериментальні дослідження керування технологічними режимами аеродинамічної піднімальної сили як засобу протидії гравітаційному навантаженню, підтверджують доцільність технічних розв'язок мобільних РДО з метою збільшення їх технологічного навантаження.

Ключові слова: структурно-параметричний синтез, мобільні роботи, альпіністські роботи, автоматизоване керування, крокуючі механізми

ANNOTATION

Polishchuk M.N. Automated synthesis of mobile robots of arbitrary orientation in the technological space – Qualified scientific work as a manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.02.02 – Machine Science. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kiev, 2021.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem – the development of a methodology for controlling the synthesis process of mobile robots of arbitrary orientation in the technological space with systems for holding mobile robots on the surface of moving to compensate for the gravitational load. The solution to this problem is aimed at creating a new means of production – a variety of robotics in the form of mobile robots of arbitrary orientation, which takes into account the needs of society, the level of its socio-economic, scientific and technological development in modern production. Studies are devoted to solving the problem of excluding human labor from the sphere of servicing high-rise facilities at industrial and municipal facilities and providing a person with remote automatic control functions.

Mobile robots of arbitrary orientation in the technological space, also known as robots with vertical movement, and in international publications under the name Climber Robot are a new modification of mobile robots equipped with tools to hold the robot on a surface of arbitrary orientation relative to the horizon of the technological space. The creation of this type of robotics is at the initial stage and is dictated by the need for technological operations in such areas as monitoring of industrial facilities, installation and dismantling of building structures, repair and preventive maintenance of their components, maintenance of high-rise buildings of public utilities, forest and parklands, etc. n. The problem of using mobile robots is especially relevant in the extreme conditions of technological disasters in which human work is dangerous and even unacceptable to humans.

The methodology for managing the synthesis of mobile robots in the technological space is based on three fundamental principles: 1) the accumulation of potential displacement energy and its conversion into kinetic energy of robot movement; 2) integration of drives of longitudinal and vertical movement, as well as drives of changing the orientation of the robot along a given route; 3) the use of aerodynamic lifting force as a means of counteracting the gravitational load in order to increase the technological load while reducing the power of the drive drives and the adhesion of the robot to the displacement surface. The indicated directions in world theory and practice of the experimental construction of mobile robots have not yet been investigated.

Based on the developed methodology for managing the synthesis of mobile robots, new modifications of mobile robots have been created. The proposed technical solutions allow robots to move along surfaces of arbitrary orientation in various coordinate systems with an arbitrary topology of the surfaces of movement of the robot. The experimental studies of the control of aerodynamic lift regimes as a means of counteracting the gravitational load confirm the feasibility of using the developed technical solutions of mobile robots.

As a result of setting up a full factorial experiment, a regression and analytical model of the relationship between the values of the aerodynamic lift and the operating modes of the jet thrust generator, namely, the number and diameter of nozzles, as well as the pressure of the compressed air outflow from the generator nozzles, was obtained. The indicated dependences make it possible to determine the quasi-optimal values of the control modes of the aerodynamic thrust generator. Also, dynamic modeling of the movement of mobile robots on surfaces of arbitrary orientation and different topology has been carried out. The obtained analytical dependences make it possible to calculate the ultimate technological load of the robot and the allowable weight of the robot. These dependencies formed the basis for the developed engineering techniques for designing functional devices and drives of mobile robots. These engineering methods for calculating the parameters of mobile robots are automated based on CAE technologies for computer-aided design systems. Special programs have been created that allow one to calculate the quasi-optimal values of the modes of operation of mobile robots of arbitrary orientation in the technological space.

As a result of theoretical and experimental studies, a synthesis of fundamentally new designs of mobile robots for the maintenance of high-rise industrial and agricultural facilities was carried out. New models of mobile robots allow performing not only

monitoring operations of the specified objects, but also power technological operations. Such mobile robots make it possible to exclude the presence of a person in hazardous areas for performing various production operations and to hand over to the operator only the functions of controlling the robots, which is especially important for the conditions of man-made disasters. The implementation of these modifications helps to reduce the total power of the drives and increase the reliability of the retention of robots on a surface of arbitrary orientation in the technological space.

Key words: structural-parametric synthesis, mobile robots, climbing robots, automated control, walking mechanisms