

Вченому секретарю
Спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11
при НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського,
к.т.н., доц. Ганпанцуровій О. С.

03056, м. Київ,
просп. Перемоги, 37, корп. 1,
НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Поліщука Михайла Миколайовича

на тему «Автоматизований синтез мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – Машинознавство.

1. Загальна структура та зміст роботи

Дисертаційна робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» на кафедрі технічної кібернетики. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновку й 16 додатків. Загальний обсяг роботи становить 377 сторінок, у тому числі 357 основного тексту, містить 134 ілюстрації, 17 таблиць, список літератури зі 158 найменувань.

У **вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи, розкрито актуальність наукової проблеми, сформульовано мету й основні задачі досліджень, викладено наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, наведено особистий внесок здобувача в розв'язання задач, поставлених в дисертаційній роботі, наведені дані публікацій за тематикою досліджень.

В **першому розділі** розглянуто сфери застосування мобільних роботів, як перспективного засобу виробництва. Виявлена необхідність створення методологічного підходу до автоматизованого керування синтезом РДО. Наведено структуру мобільного робота та взаємозв'язки його складових частин. Проведено аналіз відомих статичних, кінетостатичних та динамічних моделей. Розглянуто конструкції найбільш перспективних моделей РДО. Наголошено на необхідності подолання дестабілізуючої гравітаційної складової у сукупності технологічних навантажень, що буде сприяти підвищенню надійності втримання РДО на поверхнях довільної орієнтації. Обґрунтовано необхідність представлення

РДО, як багаторівневої технічної системи. Розглянуто методики багатокритеріальної оптимізації багаторівневих систем. Зроблено висновок щодо необхідності єдиного методологічного підходу до керування синтезом мобільних роботів.

У **другому розділі** обґрунтовано методологічний підхід до структурно-параметричного синтезу РДО на основі трьох основних принципів, запропонованих автором. Перший принцип полягає в накопиченні потенціальної енергії на кожній попередній ділянці руху й перетворення її в кінетичну енергію на наступній ділянці, що забезпечує економію енергії автономного джерела живлення. Другий принцип полягає в інтеграції приводів повздовжнього і вертикального переміщень робота, а також приводів зміни орієнтації по маршруту, що забезпечує зменшення кількості приводів та зменшення гравітаційного навантаження. Третій принцип полягає в застосуванні аеродинамічної сили з метою забезпечення можливості збільшення технологічного навантаження. В розділі здійснено морфологічний аналіз функціонального призначення і відповідної структури мобільного робота. Відзнакою методу є те, що при записі цільових функцій кожного рівня системи, критерій оптимальності попереднього рівня входить у цільову функцію наступного рівня у вигляді змінної, або константи. Проведено параметричний синтез мобільного робота з пружними накопичувачами енергії, представлено алгоритм синтезу РДО як багаторівневої технічної системи.

У **третьому розділі** наведені результати синтезу мобільних роботів, в основу якого покладено принцип накопичення потенціальної енергії і перетворення її в кінетичну енергію. Побудовані динамічні моделі РДО з пружинними та газовими модулями накопичення та перетворення енергії. Досліджено вплив технологічних і конструкторських параметрів мобільних роботів на їх динамічне навантаження. Виявлено, що регулювання моментів приводів педіпуляторів має домінуючий вплив на лінійні і кутові переміщення, відповідно автоматичне регулювання моментів являє собою пріоритетну задачу. Жорсткість модулів накопичення енергії проявляється суттєво на етапі перетворення потенціальної енергії в кінетичну енергію. Ефективна площа газової камери має домінуючий вплив на значення рушійної сили на другому етапі переміщення робота. Домінуючим чинником впливу на величину пружної сили є значення початкового тиску газу в камері накопичувача. Знайдені квазіоптимальні значення параметрів, які забезпечують надійне утримання мобільного робота на поверхні довільної орієнтації. Використання пружинного накопичувача сприяє підвищенню вантажопідйомності та технологічного навантаження робота, але знижує ресурс роботи педіпуляторів. Застосування газового накопичувача на порядок збільшує ресурс роботи, але придатне для роботів невеликої потужності.

У **четвертому розділі** обґрунтовано застосування принципу інтеграції приводів повздовжнього та вертикального переміщень та приводів зміни орієнтації робота, що забезпечує зменшення кількості приводів, і як наслідок, зменшення гравітаційного навантаження на робота. Це в свою чергу підвищує надійність утримання РДО у технологічному просторі. Проаналізовано роботу варіантів конструкцій педіпуляторів. Розроблено динамічну модель робота, що ґрунтується на другому принципі керування. Проаналізовано особливості роботи крокуючих роботів з інтегрованими приводами. Визначено максимально допустиме технологічне навантаження, при якому відсутнє проковзування педіпуляторів робота з урахуванням кутів нахилу до обрїю. Розроблена конструкція мобільного робота з антропоморфними педіпуляторами та шарнірними суглобами. Дослідженні особливості роботи гофрованих камер педіпуляторів. За результатами досліджень з'ясовано, що швидкість робота на початку дії рушійного моменту привода стрімко зростає далі зменшується внаслідок витрати енергії на піднімання корпусу. Потім швидкість знову зростає внаслідок розпрямлення педіпуляторів і опускання корпусу, що вивільняє енергію. Результати оптимізації параметрів робота надають можливість рекомендувати використання роботів у русі для операцій з малим навантаженням, а операції з великим навантаженням слід проводити у стаціонарному стані.

В **п'ятому розділі** представлено синтез мобільних РДО створених із застосуванням генератора аеродинамічної піднімальної сили. Представлена принципово нова технічна реалізація мобільного робота, що включає генератор піднімальної сили на основі компресора, підвісу Кардана та спеціального сопла. Здійснено кінематичний і динамічний аналіз роботи генератора на основі математичної моделі, яка описує сутність фізичного процесу. Визначено залежність величини піднімальної сили від числа сопел та тиску стисненого повітря. Досліджено вплив ваги робота та аеродинамічної піднімальної сили на допустиму величину технологічної реакції при виконанні виробничого завдання.

В **шостому розділі** проведена експериментальна апробація способу формування аеродинамічної піднімальної сили. Наведені опис спеціального експериментального стенду та генератора реактивної тяги. Приведена метрологічна характеристика приладів, використаних в процесі досліджень. В експериментальних дослідженнях виявлено вплив ефективної площі сопел (числа отворів сопел та їх діаметрів), а також величини тиску повітря в генераторі тяги на величину піднімальної сили. Проведено повно факторний експеримент, що включав 64 досліди та визначена регресійна модель залежності величини реактивної сили від ефективної площі сопел та тиску повітря в генераторі. Дослідження виконані по регресійній моделі виявили наявність екстремумів на границях факторного простору.

В цьому розділі розроблено методичне забезпечення параметричного синтезу мобільних РДО. Наведено методику розрахунку параметрів вакуумних, електромагнітних та механічних захватів мобільного робота з поверхнею переміщення. Представлено методики розрахунку параметрів мобільних роботів з пружинними та газовими накопичувачами енергії. Створено автоматизований модуль розрахунку параметрів газового накопичувача енергії, що дозволяє суттєво підвищити ефективність вибору параметрів приводу з рекуперацією енергії руху роботів. Розроблено автоматизовані модулі САЕ системи для розрахунку антропометричних педипуляторів, що дозволяють визначити квазиоптимальні значення параметрів мобільних роботів та здійснювати симуляцію роботи вказаних пристроїв з метою їх апробації.

2. Оцінка актуальності теми дисертації

Відомі науково-технічні розробки мобільних РДО в різних університетах країн світу та в Україні позбавлені загальнометодологічного підходу до синтезу мобільних РДО, і носять експериментальний характер, що, не дивлячись на оригінальність їх конструкцій, не надає можливості їх автоматизованого проектування для виробництва з метою експлуатації в різних галузях промисловості.

В дисертації запропоновано методологічний підхід до синтезу мобільних РДО, заснований на трьох принципах, а саме: накопичення та перетворення енергії руху роботів, інтеграції їх приводів і застосування засобів компенсації гравітаційного навантаження. Реалізація зазначених принципів синтезу РДО надає можливість створення нового покоління мобільних роботів, які дозволять вилучити людей із вкрай небезпечних умов праці при обслуговуванні висотних об'єктів в різноманітних галузях промисловості, що визначає актуальність проблеми. На основі розробленої методології автоматизованого синтезу мобільних роботів знайдені нові технічні розв'язки, що дозволяють створювати роботи означеного класу, здатні виконувати різноманітні технологічні операції при переміщенні по поверхнях довільної орієнтації в різних системах координат.

Особливу актуальність досліджень, спрямованих на створення означеного класу мобільних роботів, додає експлуатація цих роботів в екстремальних умовах техногенних катастроф, небезпечних і навіть неприйнятних для перебування і втручання людини. Тому тему дисертаційної роботи, присвяченої вирішенню вище вказаних задач, слід визначити актуальною, що підтверджується відповідними апробаціями та публікаціями по темі дисертації.

3. Оцінка наукової новизни дисертації

Наукова новизна роботи визначається наступними результатами досліджень:

1. Вперше запропоновано методологічний підхід до створення мобільних РДО на основі реалізації трьох принципів цілеспрямованого синтезу мобільних роботів, що передбачають накопичення потенціальної енергії на попередній ділянці переміщення мобільного РДО й перетворення її в енергію руху на наступних ділянках руху; інтеграцію приводів поздовжнього й вертикального переміщення, а також приводів зміни орієнтації робота по заданому маршруту; застосування аеродинамічної піднімальної сили як засобу протидії гравітаційному навантаженню з метою підвищення надійності утримання робота на поверхнях довільної орієнтації відносно обрїю технологічного простору.

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. 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.

Вище означені результати є новими в такій предметній галузі як створення мобільних роботів і тому заслуговують позитивної оцінки наукової новизни даної дисертаційної роботи.

4. Оцінка достовірності та обґрунтованості основних положень дисертації

Теоретичні дослідження засновані на методах структурного морфологічного аналізу й параметричного синтезу нових технічних розв'язків, методів квазістатичного, кінематичного й динамічного аналізів технічних систем. Одночасно запропонована модифікація параметричного синтезу мобільних РДО, як багаторівневої технічної системи, на базі якої розроблені інженерні методики автоматизованого синтезу як структур, так і конструктивно-технологічних параметрів мобільних РДО. Комп'ютерна реалізація математичних моделей проводилась за програмами MathCAD, MathLab, а також за оригінальними програмами автора. Для синтезу 3D моделей мобільних РДО використовувались системи Компас, AutoCAD, SolidWorks.

Експериментальні дослідження, проведені автором, ґрунтуються на теорії повнофакторного експерименту, коректних вимірах варійованих режимів подолання гравітаційного навантаження генератором аеродинамічної тяги мобільного робота й обробки результатів експерименту методами дисперсійного й регресійного аналізів, включаючи перевірку адекватності регресійної моделі реальному процесу із застосуванням класичних критеріїв Кохрена, Стюдента та Фішера. Отримані в роботі наукові результати є обґрунтованими на основі застосованих методів досліджень.

5. Практична цінність роботи

В роботі досягнуті практичні результати, а саме:

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

2. Створено автоматизовані модулі САЕ систем (Computer Aided Engineering) для параметричного синтезу мобільних РДО з газовими пристроями накопичення та перетворення енергії руху роботів, а також антропоморфних педипуляторів 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. Апробація роботи та повнота викладу результатів в опублікованих працях

Основні результати та наукові положення дисертаційного дослідження достатньо повно відображено в опублікованих 83 наукових працях, що включають 2 монографії, 34 статті у наукових фахових виданнях (з них 8 статей у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science); 11 патентів на винаходи, 3 патенти на корисні моделі, 16 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 17 статей в інших виданнях. Публічна апробація роботи підтверджується участю у 16 міжнародних та вітчизнах конференціях.

7. Зауваження та недоліки дисертації та автореферату

Одночасно вважаю за доцільне звернути увагу на наступні недоліки.

1. На рис. 1.1 (стор. 45) представлено структуру підсистем мобільних роботів довільної орієнтації. На цій структурній схемі слід було б відокремити об'єкт досліджень автора, оскільки розроблення методичного забезпечення синтезу мобільних роботів стосується в першу чергу пристроїв зчеплення та переміщення.

2. У підрозділі 1.3 (стор. 51...56) «Аналіз математичних моделей мобільних роботів» не відзначається які саме експлуатаційні характеристики забезпечуються на основі статичного, кінетостатичного та динамічного аналізу мобільних РДО.

3. У підрозділі 1.7 «Постановка завдання активного синтезу мобільних РДО» (стор. 81) автором стверджується наступне «Стратегію активного синтезу слід тлумачити як категорію керування послідовністю кроків із прийняттям

вирішальних правил керування процесом синтезу технічних систем». Але, на жаль, детально не розкрито поняття «вирішальних правил керування процесом синтезу» мобільних роботів.

4. В першому абзаці Розділу 2 (стор. 84) автором прийнята аксіома, що зменшення енергетичних витрат підсистем мобільних роботів приводить до зниження їх гравітаційного навантаження в сукупності динамічних навантажень. Так, загально відомо, що аксіомою є ствердження, яке не потребує доказів. Однак слід в такому разі обґрунтувати доцільність прийнятої аксіоми.

5. На рис. 4.9 (стор. 178) надано принципову схему модуля автоматизованого керування мобільним РДО. Слід зауважити, що наведена схема відображає тільки з'єднання гідравлічних пристроїв, а не елементів автоматизованого керування. В схемі також помилково використано умовне зображення регульованого гідромотора (потрібно гідронасоса) та не розшифровано позиції 15,16,17.

6. На стор. 198 визначені умови статичної визначеності розв'язання задачі, а на стор. 199 надані рівняння (4.59) статичної рівноваги мобільного робота. Однак відсутнє обґрунтування того, чому і коли, тобто при яких умовах можливо застосування для дослідження метода статичної рівноваги.

7. У підрозділі 5.2. «Технічна реалізація мобільного РДО з генератором тяги» на стор. 249, 250 відповідно на рис. 5.1 та рис. 5.2, запропонована оригінальна ідея та технічна реалізація встановлення пневматичного генератора тяги на Кардановому підвісі з трьома ступенями свободи. Вважаю що для орієнтації вказаного генератора достатньо двох ступенів свободи. Третій ступінь свободи, тобто обертання генератора навколо своєї осі, є зайвим і тільки ускладнює конструкцію та опис його динамічної моделі.

8. На рис. 7.3 (стор. 333), що відображає діалогове вікно «Виведення результатів» розрахунків параметрів робота, а також на рис. 7.4 «Діалогове вікно методики розрахунку» відсутні аналітичні залежності для визначення допустимого технологічного навантаження на мобільний робот, наявність яких вкрай важлива для ефективної його експлуатації.

9. Для коректного представлення результатів досліджень, що наведені в підрозділі 5.6 «Аналіз результатів моделювання генератора тяги» (див. рис. 5.8 та 5.9) слід було вказати, що наведені залежності розраховані для одного сопла певного діаметру.

Однак данні зауваження слід сприймати як науково-методичні рекомендації, а перелічені недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

8. Заключна оцінка дисертаційної роботи

Дисертаційна роботи Поліщука М.М. є самостійною закінченою науково-дослідною роботою. Вона містить наукові положення, які можна розглядати як розв'язання важливої галузевої проблеми, що сприяє розвитку робототехніки в Україні. Автореферат за своїм змістом та публікації за темою дисертації достатньо повно відтворюють зміст дисертаційної роботи, підтверджують актуальність теми та задач дослідження, наукової новизни та практичної цінності роботи.

Вважаю, що представлена дисертаційна робота «**Автоматизований синтез мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі**» є завершеною самостійною науковою працею, яка відповідає вимогам п.п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою КМУ №567 (зі змінами, внесеними згідно Постанови КМУ №656 від 19.08.2015) та вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор **Поліщук Михайло Миколайович** заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – Машинознавство.

Офіційний опонент

д.т.н., доцент, завідувач кафедри
технологій та автоматизації машинобудування
Вінницького національного
технічного університету



Л. Г. Козлов

Підпис *Л. Г. Козлова*
ПОСВІДЧУЮ
книжечка