

1
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Одеський національний політехнічний університет

УДК 681.516:004.896(043.3)



Герасін Олександр Сергійович

**МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ
МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ БАГАТОЦІЛЬОВОГО
ПРИЗНАЧЕННЯ НА ФЕРОМАГНІТНИХ ПОВЕРХНЯХ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор,
Заслужений винахідник України
Кондратенко Юрій Пантелійович,
Чорноморський національний університет
імені Петра Могили (м. Миколаїв),
завідувач кафедри інтелектуальних
інформаційних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Рожков Сергій Олександрович,
Херсонська державна морська академія,
завідувач кафедри експлуатації суднового
електрообладнання та засобів автоматики

кандидат технічних наук, доцент
Беглов Костянтин В'ячеславович,
Одеський національний політехнічний
університет, доцент кафедри комп'ютерних
технологій автоматизації

Захист відбудеться « 31 » жовтня 2019 р. о 13³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1, ауд. 400-А.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий « 30 » вересня 2019 р.

Т. в. о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої
ради



О.Л. Становський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення продуктивності праці та зменшення вартості готової продукції або послуг в сучасних умовах досягається за рахунок підвищення рівня автоматизації виробництва, в т.ч. шляхом застосування робототехнічних систем і комплексів, які замінюють людину при виконанні трудомістких та небезпечних для життя і здоров'я людини технологічних операцій. Особливо важливу роль при цьому відіграють гнучкі мобільні роботи багатоцільового призначення (МРБП), які здатні переміщувати робочий інструмент як по рівних, так і по складних похилих поверхнях. Зокрема, в суднобудуванні та судноремонті перспективним є застосування МРБП на феромагнітних поверхнях (ФП) корпусів суден для автоматизації багатоцільових технологічних операцій і завдань: очищення поверхонь великої площі, фарбування, різання, зварювання, інспекція, діагностика, аварійно-рятувальні та протипожежні операції, роботи в агресивних та високотемпературних середовищах, у важкодоступних місцях та ін.

Суттєвий внесок у розробку схемотехнічних рішень та систем дистанційного керування мобільними роботами різного функціонального призначення внесли роботи Л.А. Жучинського, Ю.П. Кондратенка, Ю.М. Запорожця, В.О. Кушніра, В.Г. Градецького, В. Ross, D. Souto, L. Christensen, R. Duro, J. Rudolph, F. Lopez-Peña та інших науковців. Разом з тим, характерними ознаками і недоліками існуючих МРБП, здатних переміщуватися по похилих ФП, є низький рівень автоматизації процесів керування рухом та відсутність засобів прогнозування і визначення необхідного притискного зусилля (ПЗ) мобільного робота до ФП нестационарного типу, що в багатьох випадках призводить до недостатньо ефективного і небезпечного використання МРБП, зокрема при змінах кутів нахилу робочої поверхні, типу поточної технологічної операції, маси об'єкта маніпулювання, товщини шару обростання корпусу судна водними організмами тощо. Таким чином, розробка і удосконалення моделей та засобів, що забезпечуватимуть підвищення ефективності і надійності систем контролю і керування МРБП при їх функціонуванні в нестационарних умовах є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася у відповідності до пріоритетних напрямків науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування (НУК) імені адмірала Макарова згідно з: (а) координаційними планами Міністерства освіти і науки України, зокрема в рамках наукових досліджень за держбюджетними темами "Розробка комп'ютеризованої системи моніторингу та автоматичного керування мобільним роботом багатоцільового призначення на основі інтелектуальних технологій" (номер державної реєстрації 0117U007282, 2017 – 2020 рр.), в якій автор брав участь як відповідальний виконавець, та "Дослідження та розробка модулю термоакустичного перетворювача теплових викидів енергетичних установок транспорту та промисловості" (номер державної реєстрації 0115U000301, 2015 – 2017 рр.), в якій автор брав участь як виконавець; (б) міжнародною науково-дослідною роботою з Китайською народною республікою "Розробка суднової багатофункціональної системи віддаленого контролю і вимірювання рівня рідини з

підсистемою оповіщення" (2013–2014 рр.). Крім того, дисертаційні дослідження проводились в рамках міжнародної наукової університетської кооперації при виконанні міжнародних проектів за програмами Європейського Союзу: DAAD-Ostpartnerschaftsprogramm (проект з Саарландським університетом, ФРН), TEMPUS (Cabriolet) та Erasmus+ (Aliot).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності процесів переміщення та виконання заданих технологічних операцій мобільними роботами багатоцільового призначення на феромагнітних поверхнях за рахунок розвитку моделей, методів та засобів систем контролю і керування.

Виконання поставленої мети забезпечується в дисертаційній роботі шляхом розв'язання наступних **задач дослідження**:

- аналіз сучасного стану проблеми автоматизації процесів переміщення робочого інструменту похилими феромагнітними поверхнями;
- формалізація завдань контролю і керування МРБП;
- розробка математичних моделей основних компонентів МРБП як складного багатокоординатного об'єкта керування;
- синтез багатозв'язної системи автоматичного керування швидкістю та курсовим кутом МРБП на основі методів проектування інтелектуальних регуляторів;
- синтез спостерігачів (ідентифікаторів) притискного зусилля МРБП до ФП із застосуванням нейро-нечітких технологій та основ теорії поля;
- розробка універсальних засобів контролю та датчиків проковзування (ДП): а) при недостатньому стискальному зусиллі губок захвату маніпулятора МРБП; б) при втраті зчеплення МРБП з похилою феромагнітною поверхнею;
- розробка структури, програмно-технічних засобів та експериментальної моделі системи керування МРБП.

Об'єкт дослідження – процеси контролю і керування мобільними роботами багатоцільового призначення при переміщенні і маневруванні по похилих феромагнітних поверхнях.

Предмет дослідження – моделі, структури та програмно-технічні засоби систем контролю і автоматичного керування мобільними роботами багатоцільового призначення.

Методи дослідження. Проведене в дисертаційній роботі дослідження з розробки системи контролю і керування основними координатами МРБП базується на комплексному використанні методів: теорії автоматичного керування для синтезу структур та алгоритмів систем автоматичного керування (САК), а також для проведення порівняльного аналізу їх показників якості з різнотипними регуляторами; теорії математичного аналізу для синтезу математичних моделей МРБП; теорії ідентифікації, теорії нечітких множин, нейромережових технологій, теорії електромагнітного поля (для синтезу спостерігачів ПЗ та регулятора просторового руху МРБП); теорії оптимізації (для налагодження оптимальних параметрів регуляторів САК МРБП); комп'ютерного моделювання (для аналізу та перевірки достовірності отриманих теоретичних положень).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку і поглибленні теоретичних та методологічних основ створення систем контролю і керування для підвищення рівня автоматизації та ефективності МРБП. Новими науковими результатами є наступні:

- вперше запропоновано математичні моделі МРБП з гусеничними та магнітокерованими рушіями, які враховують взаємозв'язок напрямку та швидкості руху з притискними зусиллями та кутом нахилу робочої ФП, що дозволяє досліджувати поведінку МРБП в динамічних режимах;

- удосконалено структуру багатозв'язної САК гусеничним МРБП за рахунок введення двоканального нейронного регулятора просторового руху, налаштованого за допомогою еталонної моделі та генетичного алгоритму, що забезпечує покращення динамічних характеристик МРБП при керуванні кутом повороту і швидкістю руху та підвищення продуктивності технологічних операцій МРБП на похилих ФП;

- вперше синтезовано математичну модель спостерігача притискного зусилля МРБП на основі нейро-нечітких технологій, яка враховує локальні невизначеності робочої ФП і в цілому забезпечує підвищення ефективності процесів керування притискним зусиллям та безпеки функціонування МРБП;

- набув подальшого розвитку метод контролю проковзування МРБП на похилій ФП та об'єкта маніпулювання в адаптивному захваті МРБП на основі реєстрації резистивними компонентами відхилення чутливого елемента, що, на відміну від існуючих, дозволяє визначати напрям проковзування та підвищити швидкодію процесів адаптації стискального зусилля захвату та притискного зусилля МРБП до апріорно невідомої маси об'єкта маніпулювання.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані моделі, методи, програмно-технічні засоби синтезу структур та алгоритмів систем контролю і керування можуть бути покладені в основу розробки вискоєфективних систем керування для автоматизації МРБП та їх окремих компонентів.

Розроблені в дисертаційній роботі моделі, механізми та програмно-технічні засоби побудови систем для контролю та керування впроваджено на підприємстві ТОВ "Респект Бізнес" (при проектуванні автоматизованих виробничих комплексів), а також у Національному університеті кораблебудування (НУК) ім. адмірала Макарова, зокрема при виконанні:

- завдань згідно з координаційними планами Міністерства освіти і науки України на 2015-2020 роки в рамках держбюджетних тем: "Розробка комп'ютеризованої системи моніторингу та автоматичного керування мобільним роботом багатоцільового призначення на основі інтелектуальних технологій", ДР № 0117U007282 (2017-2020 рр.); "Дослідження та розробка модулю термоакустичного перетворювача теплових викидів енергетичних установок транспорту та промисловості", номер ДР № 0115U000301 (2015-2017 рр.);

- міжнародної науково-дослідної роботи з КНР "Розробка суднової багатофункціональної системи віддаленого контролю і вимірювання рівня рідини з підсистемою оповіщення" (2013–2014 рр.);

– міжнародних європейських проектів за програмами DAAD-Ostpartnerschaftsprogramm (проект з Саарландським університетом, ФРН), TEMPUS (Cabriolet) та Erasmus+ (Aliot).

Основні положення, висновки та рекомендації, що викладені в дисертаційній роботі, також використовуються у навчальному процесі НУК ім. адмірала Макарова на кафедрі комп'ютеризованих систем управління при підготовці студентів за спеціальністю 151 – "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології", зокрема при викладанні дисциплін "Теорія систем і системний аналіз", "Комп'ютеризовані системи штучного інтелекту", "Автоматизоване проектування цифрових пристроїв".

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно та опубліковані в 33 наукових працях та 9 патентах України на корисні моделі. При цьому роботи [1, 33, 39] опубліковані здобувачем без співавторів; в роботах [1, 4, 39] здобувачем проведено аналіз комплексу задач та координат керування МРБП; в [5, 8] запропоновано структуру та основні компоненти комп'ютеризованої системи контролю і керування основними координатами МРБП; в [7, 29, 30, 34, 35] здійснено синтез математичних моделей основних компонентів МРБП як об'єкта керування; в [6, 31, 32, 36, 38, 40] розроблено і обґрунтовано функціональні структури та процедури синтезу регуляторів САК основними координатами МРБП та складних технічних об'єктів; в [3, 9, 24, 26, 28, 41] запропоновано магніто-індуктивний та нейро-нечіткі спостерігачі ПЗ; окремі компоненти системи для контролю і керування основними параметрами складних технічних об'єктів керування та МРБП розроблено в [19-21, 27, 42]; в [10-18, 22, 23, 25, 37] запропоновані нові схемотехнічні рішення МРБП та ДП; розвинутий метод визначення напрямку проковзування та програмно-технічні засоби його реалізації для резистивного ДП запропоновано в [2].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційних досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних міжнародних конференціях і семінарах: The XIII Int. Conf. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics – CADSM'2015 (Львів-Поляна, 2015); Міжнар. конф. з автоматичного управління "Автоматика" (Одеса, 2015; Суми, 2016); Міжнар. наук. конф. «International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)» (Варшава, 2015; Бухарест, 2017); IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології» (Одеса, 2015); Міжнар. наук.-техн. конф. «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (Дніпропетровськ, 2016); Третій Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (Київ, 2016); Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing – DSMP (Львів, 2016, 2018); Міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2016); Всеукраїнській наук.-метод. конф. «Могилянські читання» (Миколаїв, 2014, 2015, 2016); XIII Int. Conf. Perspective Technologies and Methods in MEMS Design – MEMSTECH (Поляна, 2017); Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies – DESSERT'2018

(Київ, 2018); Всеукраїнській наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки» (Миколаїв, 2019).

Публікації. Результати дисертації викладено в 33 наукових працях (11 з яких входять до наукометричної бази Scopus), в т.ч. – 8 статей у наукових фахових журналах (1 – одноосібна), 4 наукові праці – у міжнародних журналах та закордонних виданнях, 20 – у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, 1 методичні вказівки; отримано 9 патентів України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 293 сторінки, обсяг основного тексту – 144 сторінки, додатків – 77 сторінок. Дисертація містить 65 рисунків, 11 таблиць та посилання на 218 літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи, яка підкреслює її актуальність, зв'язок з науковими програмами, мету і задачі дослідження, наукову новизну, апробацію та практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми автоматизації процесів переміщення та виконання заданих технологічних операцій мобільними роботами різного функціонального призначення, а також визначено основні завдання дослідження.

Для здійснення роботизованих технологічних процесів, зокрема для виконання окремих технологічних операцій на ФП, успішно використовуються робототехнічні системи і комплекси. В опублікованих працях світових (вітчизняних та, здебільшого, зарубіжних) провідних наукових центрів висвітлені проблеми вибору оптимальних конструкцій мобільних роботів згідно з функціональним призначенням, створення модульних архітектур, розгалужених функціональних структур систем керування, впровадження бортових та наземних систем контролю та керування МРБП. При цьому суттєвим недоліком існуючих рішень в області розробки систем для керування мобільними роботами є низький рівень автоматизації обладнання для їх реалізації, що призводить до зниження ефективності роботи таких роботів і, як наслідок, – якості технологічних операцій. Особливості МРБП як об'єкта керування додають специфічні завдання для вирішення, пов'язані з необхідністю врахування особливостей окремих операцій та невизначеностей робочих ФП, зокрема поточного значення ПЗ, яке формується притискними пристроями, тому, на відміну від програмних САК, найбільш перспективними є саме адаптивні та інтелектуальні системи. Однак відомості стосовно розробки інтелектуальних САК МРБП носять у науково-технічній літературі обмежений характер. Тому, на підставі проведеного аналізу існуючих рішень обґрунтовано доцільність розробки структур, математичних моделей, алгоритмів функціонування, програмно-апаратних засобів систем контролю і керування основними параметрами руху МРБП.

У другому розділі розглянуті конструкції гусеничного МРБП та МРБП з магнітокерованими колесами-рушіями, проведено формалізацію основних завдань

контролю і керування таких роботів, синтезовано математичні моделі основних компонентів МРБП з магнітокерованими колесами-рушіями та гусеничного МРБП в цілому як складного багатокоординатного об'єкта керування. Отримані моделі враховують вплив конструктивних параметрів на параметри руху, що дозволяє досліджувати поведінку МРБП в динамічних режимах та підвищити ефективність розробки магнітокерованого колеса-рушія та гусеничного МРБП.

Функціональна структура МРБП як багатокоординатного об'єкта керування зображена на рисунку 1, де позначено: ТО – технічне обладнання робота; ПЕ – притискні електромагніти; $U_{ТО}$ – вектор сигналів керування ТО; U_P – вектор сигналів керування рушіїв; $U_{ПЕ}$ – вектор сигналів керування ПЕ МРБП; Z_P , $Z_{ПЕ}$, $Z_{ТО}$, $Z_{МР}$ – вектори збурювальних впливів, що діють на рушії, ПЕ, ТО та корпус робота.

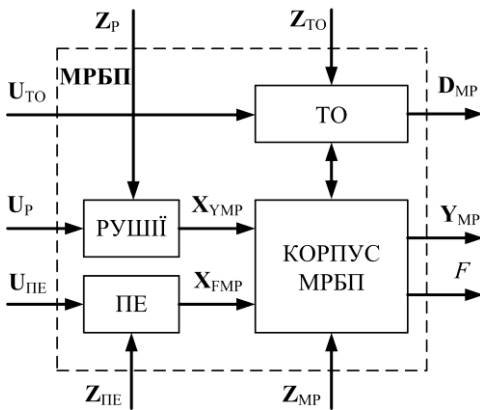


Рисунок 1 – Функціональна схема МРБП як складного об'єкта керування

МРБП для переміщення по складних ФП містить магнітокеровані рушії у формі коліс зі змінюваною конфігурацією обводу. З геометричної точки зору проаналізовано можливі варіанти схемотехнічних рішень таких коліс-рушіїв та визначено, що для широкого спектру використання найбільш доцільним є застосування восьми розсувних спиць.

Для колеса-рушія залежність поточної подовжньої координати x (поточне положення на вісі, паралельній поверхні та напрямку руху) від кута повороту φ центра колеса впродовж кроку переміщення (1) та рівняння руху (2):

$$x = R \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right| + x_0; \quad (1)$$

$$\ddot{x} = \begin{pmatrix} F_3 \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{A_K} + (F_{II} + k_{IP} (R B_K - \\ - R)) \cdot \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{B_K} - (mg R \sin \gamma + \\ + k_{IOB} \dot{x}^2 R + k_{IP} (R A_K - R) \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{A_K}) \end{pmatrix} \frac{R}{(J_B + m R^2) \cos \varphi}, \quad (2)$$

де x_0 – початкове положення, R – довжина проміжної розсувної спиці; γ – кут нахилу поверхні; α – кут між рухомими елементами сусідніх розсувних спиць; m – маса колеса; F_3 – штовхальна сила задньої спиці; F_{II} – тягова сила передньої спиці; g – прискорення вільного падіння; k_{IOB} – коефіцієнт опору повітря; k_{IP} – коефіцієнт жорсткості вертальної пружини; J_B – центральний момент інерції; коефіцієнти A_K та B_K визначаються з (3) та (4):

$$A_K = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha + 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}; \quad (3)$$

$$B_K = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha - 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}. \quad (4)$$

Сформовано структурну модель ПЕ колеса-рушія МРБП як об'єкта керування, визначено залежність ПЗ F від маси робота, нахилу і характеру ФП:

$$F = m_{\text{ПЕ}} g (\sin \gamma / \mu_{\text{ПЕ}} - \cos \gamma), \quad (5)$$

де $m_{\text{ПЕ}}$ – маса робота, яка припадає на один ПЕ, $\mu_{\text{ПЕ}}$ – коефіцієнт тертя. Результати комп'ютерного моделювання виразу (5) для кутів нахилу ФП $\gamma_{\text{max}} \leq \gamma \leq \pi$ вказують на змінюваний характер потрібного ПЗ при зміні γ для утримання на ФП та дозволяють визначити максимальний кут γ_{max} , на якому ще можливе утримання ПЕ робота без електромагнітного притиску (відсутня потреба в створенні ПЗ). Для більших кутів необхідно здійснювати керування ПЗ.

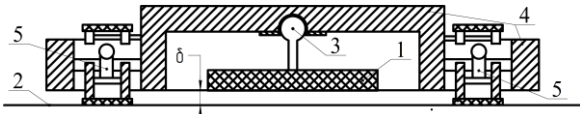


Рисунок 2 – Гусеничний МРБП
(переріз виконано по шарніру 3)

Крім того, запропоновано поліпшену конструкцію МРБП гусеничного типу (основні позиції позначені на рисунку 2), в якій основний притискний магніт 1 підтримується сферичним шарніром 3 знизу

рами 4 між правою і лівою гусеницями 5 із забезпеченням зазору δ відносно ФП 2. На основі теорії руху транспортних засобів з урахуванням створюваного ПЗ синтезована математична модель рушійного комплексу такого гусеничного МРБП. Так, отримані рівняння руху (6) та вираз (7) для визначення потрібного значення ПЗ для забезпечення сили тяги за зчепленням:

$$\ddot{x} = \pm \frac{1}{m_{\text{МР}} \lambda_{\text{М}}} [F_{\text{Т}} - G(f \cos \gamma \mp \sin \gamma) - fF \mp F_{\text{ТО}}], \quad (6)$$

$$F^* = \frac{F_{\text{ТО}}^* + f \cos \gamma + \sin \gamma - \phi \cos \gamma}{\phi - f}, \quad (7)$$

де $F_{\text{Т}}$ – сила тяги двох гусениць; f – коефіцієнт кочення; ϕ – коефіцієнт зчеплення; $\lambda_{\text{М}}$ – зведений коефіцієнт маси, $m_{\text{МР}}$ – маса робота; G – сила тяжіння; $F_{\text{ТО}}$ – сила від технологічної операції; F^* , $F_{\text{ТО}}^*$ – відносні значення сил F , $F_{\text{ТО}}$ ($F^* = F/G$, $F_{\text{ТО}}^* = F_{\text{ТО}}/G$).

Сили тяги за рівномірного повороту на похилій ФП визначаються як

$$F_{\text{Ti}} = f \frac{G \cos \gamma + F}{2} + G \sin \gamma \left(\frac{\cos \phi_{\text{МР}}}{2} + j \frac{x_{\text{O}}}{B_{\text{МР}}} \sin \phi_{\text{МР}} + j f \frac{h_{\text{Ц}}}{B_{\text{МР}}} \sin \phi_{\text{МР}} \right) - j \frac{\mu_{\text{ПОВ}} L (G \cos \gamma + F)}{4 B_{\text{МР}}} \left(1 + \frac{4 x_{\text{O}}^2}{L^2} \right) + F_{\text{ТО}} \left(\frac{1}{2} \cos \beta - j \frac{(l - x_{\text{O}})}{B_{\text{МР}}} \sin \beta \right). \quad (8)$$

Результати моделювання сили тяги (8) забіжної (F_{T2}) та відстаючої (F_{T1}) гусениць для рівномірного повороту на похилій поверхні наведені в роботі, вони схожі за характером з результатами, отриманими для гусеничних машин на косогорі проф. Л.С. Сергєєвим, та підтверджують якісну адекватність отриманих результатів.

Узагальнена математична модель динаміки МРБП представлена виразом (9), де прийняті наступні позначення: $i = 1, j = 1$ – для відстаючої гусениці; $i = 2, j = -1$ – для забіжної; B_{MP} , L , $h_{Ц}$ – ширина, довжина, висота центру тяжіння МРБП; x_O , l – відстані від поперечної осі робота до центрів повороту гусениць та до точки закріплення ТО; $\mu_{ПОВ}$ – коефіцієнт опору повороту; β – кут відхилення лінії дії сили $F_{ТО}$ від поздовжньої вісі МРБП; M_{EMi} – електромагнітні моменти двигунів; η_d , η_{MP} – ККД двигуна та МРБП; $J_{Я}$ – момент інерції якоря двигуна; $J_{\Sigma K}$ – сумарний момент інерції колеса і гусениці; k_p – передаточне число редуктора; R_K – радіус ведучого колеса; ω_d , ω_K – кутові швидкості обертання вала двигуна та ведучого колеса.

$$\begin{aligned}
 M_{EMi} = & \frac{J_{Я}}{\eta_d} \frac{d\omega_d}{dt} + \frac{1}{k_p \eta_{MP}} \left[J_{\Sigma K} \frac{d\omega_K}{dt} + R_K \left(f \frac{G \cos \gamma + F}{2} + \right. \right. \\
 & + G \sin \gamma \left(\frac{\cos \varphi_{MP}}{2} + j \frac{x_O}{B_{MP}} \sin \varphi_{MP} + j f \frac{h_{Ц}}{B_{MP}} \sin \varphi_{MP} \right) - \\
 & - j \frac{\mu_{ПОВ} L (G \cos \gamma + F)}{4 B_{MP}} \left(1 + \frac{4 x_O^2}{L^2} \right) + F_{ТО} \left(\frac{1}{2} \cos \beta - \frac{(l - x_O)}{B_{MP}} \sin \beta \right) + \\
 & \left. + \left(\frac{G \cos \gamma + F}{2g} + j G \sin \gamma \sin \varphi_{MP} \frac{h_{Ц}}{g B_{MP}} \right) \frac{dV_{Gi}}{dt} + \left(m_{MP} + \frac{F}{g} \right) \frac{L^2 + B_{MP}^2}{12 B_{MP}} \frac{d\omega_{MP}}{dt} \right].
 \end{aligned} \quad (9)$$

Визначено, що найбільш важливими керованими координатами МРБП є швидкість переміщення V_{MP} , курсовий кут φ_{MP} та ПЗ F , від значення якого залежать перші дві координати, а, відповідно, і якість технологічних операцій. Отримані результати комп'ютерного моделювання МРБП показані на рисунках 3-4, де через ΔU_{12} позначена різниця напруг, які живлять двигуни, $\Delta U_{12} = U_2 - |U_1|$.

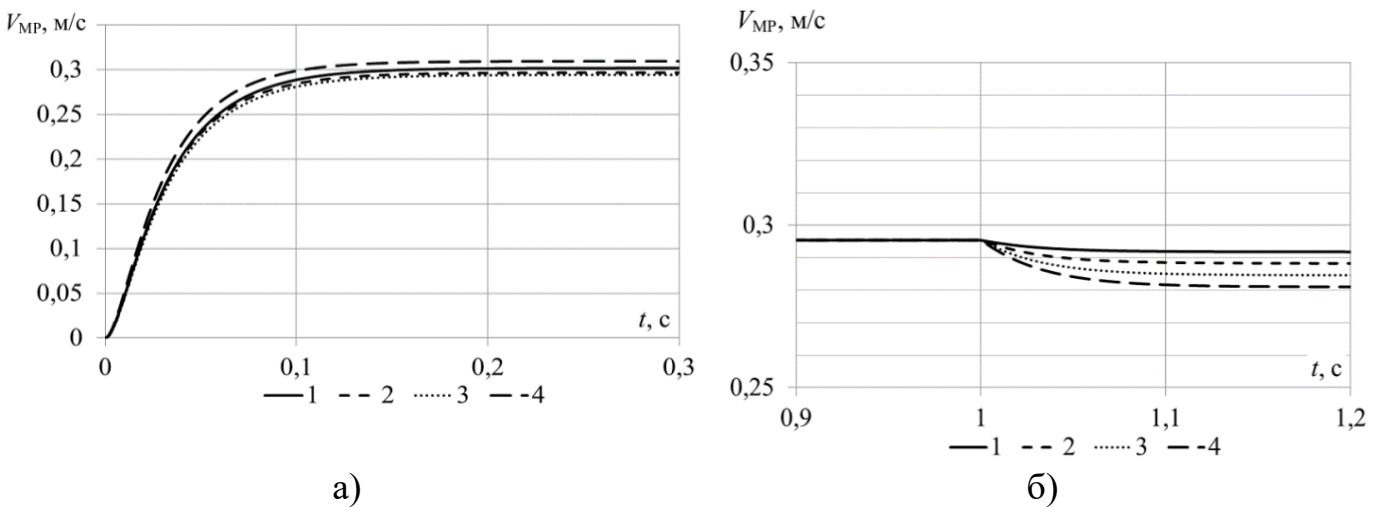


Рисунок 3 – Зміна лінійної швидкості МРБП: (а) при різних значень кута γ (1 – $\gamma = 0^\circ$; 2 – $\gamma = 45^\circ$; 3 – $\gamma = 90^\circ$; 4 – $\gamma = 270^\circ$) та (б) при різних значеннях навантаження (1 – 700 Н; 2 – 1400 Н; 3 – 2100 Н; 4 – 2800 Н)

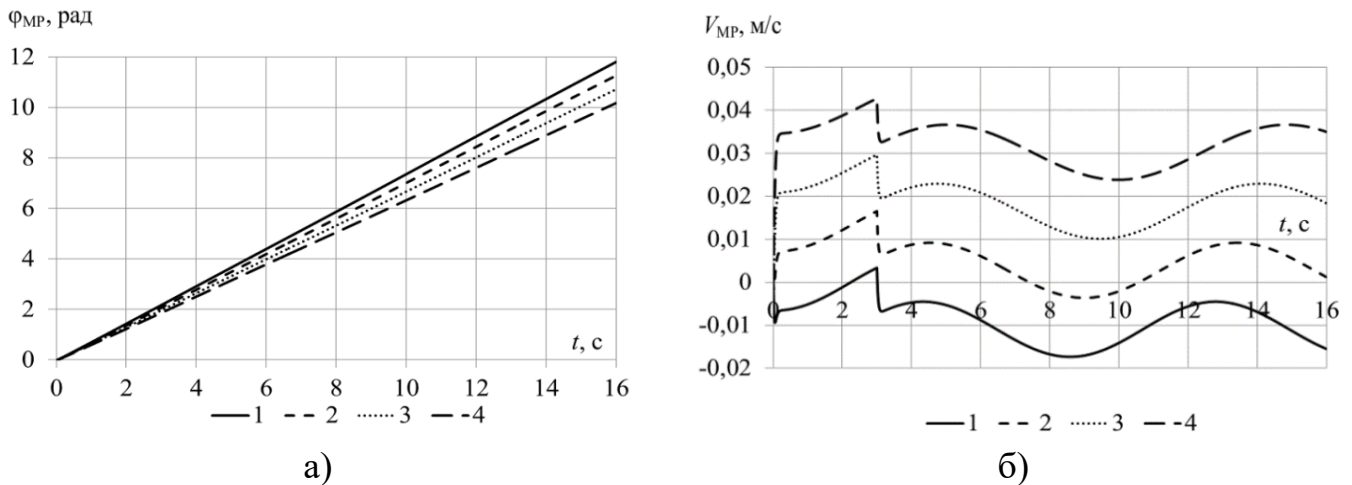


Рисунок 4 – Зміна кута повороту (а) та лінійної швидкості переміщення (б) МРБП при різниці по модулю напруги живлення приводних двигунів:
 1 – $\Delta U_{12} = 0$ В; 2 – $\Delta U_{12} = 20$ В; 3 – $\Delta U_{12} = 40$ В; 4 – $\Delta U_{12} = 60$ В

У третьому розділі наведено процедури синтезу та дослідження САК швидкістю, курсовим кутом та ПЗ МРБП з різнотипними регуляторами. Запропоновано багатозв'язну САК просторовим рухом гусеничного МРБП для переміщення та виконання заданих технологічних операцій на похилих та вертикальних ФП. Проведено структурно-параметричний синтез нейронного регулятора просторового руху (НРПР) МРБП, який, по суті, поєднує в собі окремі регулятори швидкості та курсу в одному комплексному регуляторі, у взаємозалежній двоканальній структурі системи управління роботом. Обґрунтовано необхідність ідентифікації притискних зусиль електромагнітів МРБП. Сформовано нейро-нечіткі та нейронні математичні моделі спостерігачів зусилля (СЗ) ПЕ МРБП. Проведено аналіз адекватності розроблених моделей СЗ. На основі засобів теорії поля розроблено модель магніто-індуктивного СЗ для ПЕ.

Розроблені функціональні схеми САК швидкістю, курсом та ПЗ МРБП з традиційними регуляторами, налаштування регуляторів для яких здійснено шляхом параметричної оптимізації показників якості перехідних процесів градієнтним методом за квадратичним критерієм.

Функціональна структура багатозв'язної двоканальної САК просторовим рухом МРБП на основі синтезованого НРПР представлена на рисунку 5, де використовуються наступні позначення: $u_{НРПРП}$ та $u_{НРПРЛ}$ – напруги, що подаються на кожний транзисторний перетворювач (ТП) правої (ПГ) та лівої (ЛГ) гусениць від НРПР; $V_{МРБ}$, $\varphi_{МРБ}$ – бажані значення лінійної швидкості та курсового кута МРБП на виході еталонної моделі за швидкістю (ЕМШ) та кутом (ЕМК); БРФФ – блок розрахунку фітнес-функції; $\mathbf{P}$ – вектор параметрів (вагових коефіцієнтів) нейронної мережі НРПР, який синтезується на виході блоку розрахунку вагових коефіцієнтів (БРВК) за допомогою генетичного алгоритму (ГА).

В САК МРБП міститься дві еталонні моделі – ЕМШ та ЕМК, які є опорними моделями швидкості і кута та описують бажану реакцію МРБП для швидкості $V_{МРБ}(t)$ і кута $\varphi_{МРБ}(t)$ в найближчому описі для будь-яких заданих впливів $u_{ЗШ}(t)$ та $u_{ЗК}(t)$. Ці моделі набагато простіші, ніж модель робота для кожного каналу керування і представляються передаточними функціями $W_{ЕМШ}(p)$ та $W_{ЕМК}(p)$, відповідно:

$$W_{\text{ЕМШ}}(p) = \frac{V_{\text{МРБ}}(p)}{u_{\text{ЗШ}}(p)} = \frac{1}{(T_{\text{ЕМШ}}p + 1)^\chi}, \quad (10) \quad W_{\text{ЕМК}}(p) = \frac{\varphi_{\text{МРБ}}(p)}{u_{\text{ЗК}}(p)} = \frac{1}{(T_{\text{ЕМК}}p + 1)^\lambda}, \quad (11)$$

де $T_{\text{ЕМШ}}$, $T_{\text{ЕМК}}$, χ , λ – постійні часу і порядки $W_{\text{ЕМШ}}(p)$ та $W_{\text{ЕМК}}(p)$.

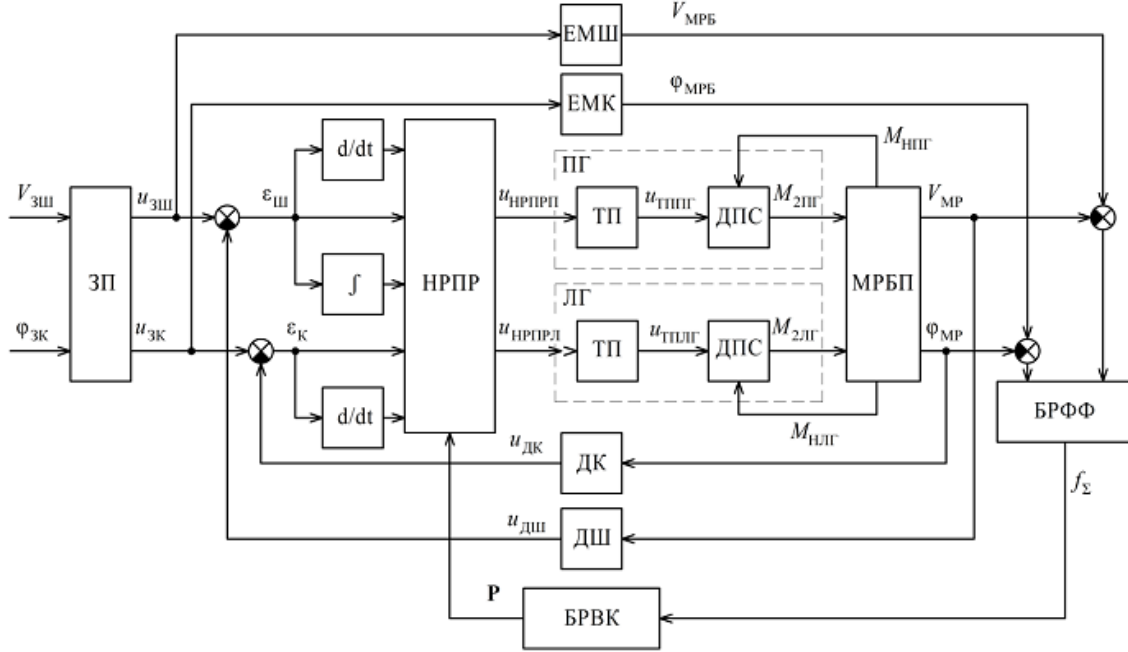


Рисунок 5 – Удосконалена структура САК МРБП з НРПР

Багатокроковий процес синтезу нейрорегулятора просторового руху (НРПР) містить дві процедури, які взаємодіють між собою: структурний та параметричний синтез. Перша процедура визначає архітектуру нейронної мережі: спочатку встановлюються граничні параметри структури, правила збільшення кількості входів, шарів та нейронів у відповідному шарі. Друга процедура полягає у визначенні оптимальних значень вагових коефіцієнтів для кожної поточної розглядуваної структури нейромережі НРПР. Для цього альтернативні варіанти параметрів НРПР $\mathbf{P}$ (рисунок 5) кодуються з використанням хромосом, зведених у популяцію. Для оцінки придатності кожної хромосоми початкової та наступних популяції виконується моделювання перехідного процесу з параметрами $\mathbf{P}$ НРПР для даних $u_{\text{ЗШ}}(t)$ та $u_{\text{ЗК}}(t)$. Враховуючи наявність двох каналів керування, входним параметром БРВК (який працює на базі ГА) є комплексна фітнес-функція f_Σ , що враховує якість керування при взаємному впливі обох каналів (швидкості і кута) і еталонні моделі (10), (11) та розраховується в БРФФ для всіх точок W :

$$f_\Sigma = k_f f_\text{Ш} + f_\text{К} = k_f \sum_{k=1}^W (V_{\text{МРБ}_k} - V_{\text{МР}_k})^2 + \sum_{k=1}^W (\varphi_{\text{МРБ}_k} - \varphi_{\text{МР}_k})^2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

де $f_\text{Ш}$, $f_\text{К}$ – фітнес-функції за кожним каналом, k_f – ваговий коефіцієнт.

Для формування кожної нової популяції використовуються генетичні оператори – селекція, схрещування і мутація. Процедура параметричної оптимізації

припиняє роботу за однією з умов: досягнення прийнятного значення цільової функції (12); перевищення максимального числа ітерацій; виродження популяції. Тому, закон керування синтезується за допомогою ГА в результаті багаторазових експериментів з імітаційною моделлю МРБП. При адекватній роботі НРПР, виходи моделі МРБП і еталонних моделей повинні бути близькими, тому завдання налаштування нейронного регулятора полягає у мінімізації фітнес-функції f_{Σ} .

На рисунках 6 та 7 наведені результати моделювання багатозв'язної САК МРБП у вигляді графіків перехідних процесів при пуску: 1 – з нейронним регулятором просторового руху, 2 – еталонна модель, 3 – з традиційними регуляторами. Розроблена багатозв'язна САК МРБП із синтезованим НРПР має значно вищі показники якості керування швидкістю та кутом повороту у порівнянні із застосуванням окремих традиційних регуляторів САК даними координатами (див. рисунки 6 та 7). Зокрема, застосування даної багатозв'язної САК дозволяє зменшити час перехідного процесу за швидкістю та кутом на 55 % та 19 % відповідно, позбавитися небажаного перерегулювання за швидкістю (з 27 до 0%) та суттєво зменшити статичну помилку за кутом (у 8 разів), хоча за швидкістю статична помилка виявилася рівною 0,7 %, що не дуже критично при виконанні технологічних операцій. При відпрацюванні навантаження система з НРПР також показує вищі показники якості. Отримані покращення дозволяють збільшити продуктивність процесу виконання технологічної операції очищення на 5,2 %.

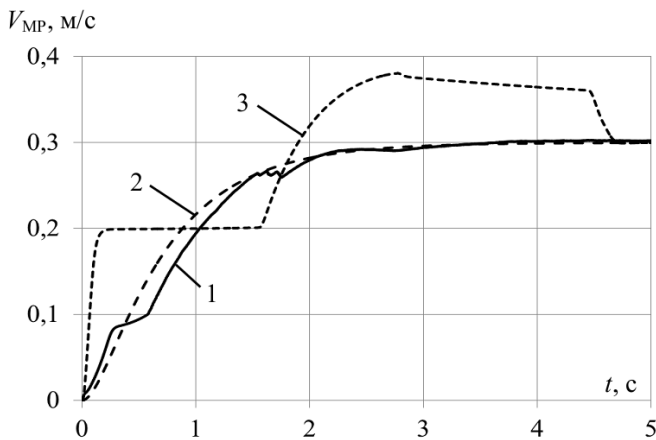


Рисунок 6 – Перехідні процеси САК МРБП за швидкістю

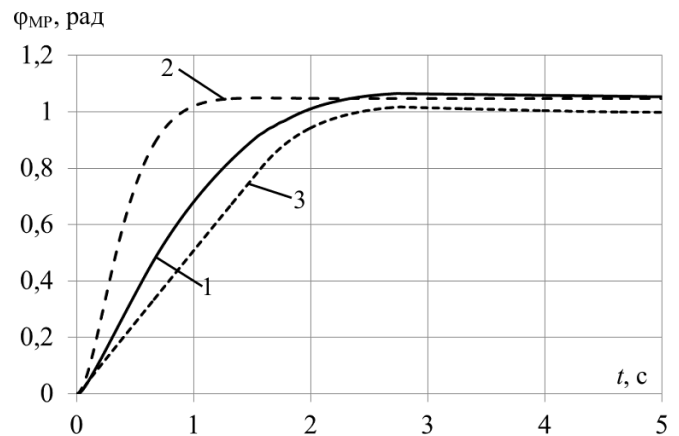


Рисунок 7 – Перехідні процеси САК МРБП за кутом

Для вирішення обґрунтованої в роботі задачі ідентифікації реально створюваного значення ПЗ запропоновано підхід до синтезу спостерігача зусилля МРБП з магнітокерованими рушіями, заснований на використанні експериментальних даних, що полягає у розробці моделі ПЕ як об'єкту керування ПЗ на основі інтелектуальних засобів. ПЗ F , яке розраховується за допомогою СЗ, з одного боку, визначається інтегральною сумою магнітної індукції, створюваної ПЕ на ФП, і, з іншого боку, суттєво залежить від таких параметрів як: кути нахилу полюсу ПЕ до ФП (на рисунку 8 α_1 , α_2 обумовлені відстанями δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 через невизначеності неферромагнітної природи виникнення, наприклад обростання на корпусі судна), відстань до ФП R_B і напруга живлення ПЕ $u_{ПЕ}$:

$$F = f(u_{\text{ПЕ}}, \alpha_1, \alpha_2, R_B). \quad (13)$$

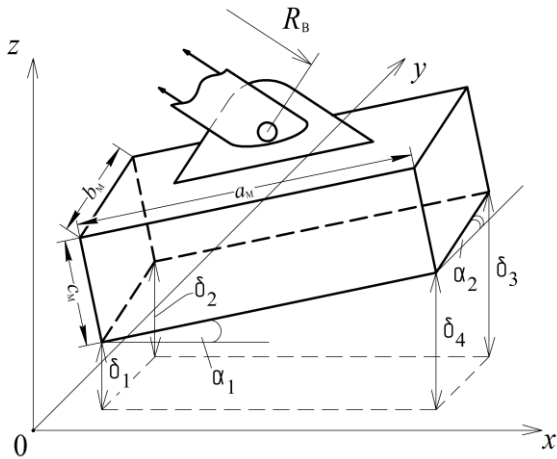


Рисунок 8 – Просторове положення призматичного ПЕ відносно ФП

Розроблені моделі нейро-нечітких обчислювальних систем (ННОС) ПЗ ANFIS-типу з різними типами функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних (трикутною, трапецієвидною, Гаусівською 1-го роду, Гаусівською 2-го роду, π -типу), які представляють вираз (13). Для змінних α_1 та α_2 обрано по 3 лінгвістичні терми: S – малий, M – середній і B – великий; для змінних R_B та $u_{\text{ПЕ}}$ – 5 термів: Z – нульова, S – мала, M – середня, B – велика і VB – дуже велика. Кожна база правил із запропонованих ННОС

складається з 225 правил, які відповідають всім комбінаціям чотирьох вхідних нечітких змінних. ANFIS реалізує систему нечіткого логічного виведення Сугено типу у п'ятишаровій нейронній мережі прямого поширення сигналу. Для навчання нейро-нечіткої мережі використано гібридний метод навчання, який об'єднує в собі метод зворотного поширення помилки і метод найменших квадратів. Структура нечіткого правила з порядковим номером r представлена виразом (14):

$$\text{IF } x_1 = a_{1,r} \text{ AND } \dots \text{AND } x_n = a_{n,r} \text{ THEN } y = b_{0,r} + b_{1,r}x_1 + \dots + b_{n,r}x_n, \quad (14)$$

де $r = 1, \dots, m$ – номер відповідного правила; $a_{w,r}$ – нечіткий терм із функцією належності $\mu_r(x_w)$, який застосовується для лінгвістичної оцінки змінної x_w у правилі r ($r = 1, \dots, m$; $w = 1, \dots, n$); $b_{q,r}$ – дійсні числа у консеквенті правила r ($r = 1, \dots, m$; $q = 0, 1, \dots, n$). На рисунку 9 наведені характеристичні поверхні ННОС з різними типами функцій належності лінгвістичних змінних. Результати розрахунків статистичних оцінок адекватності синтезованих математичних моделей нейро-нечітких спостерігачів ПЗ зведено в таблиці 1.

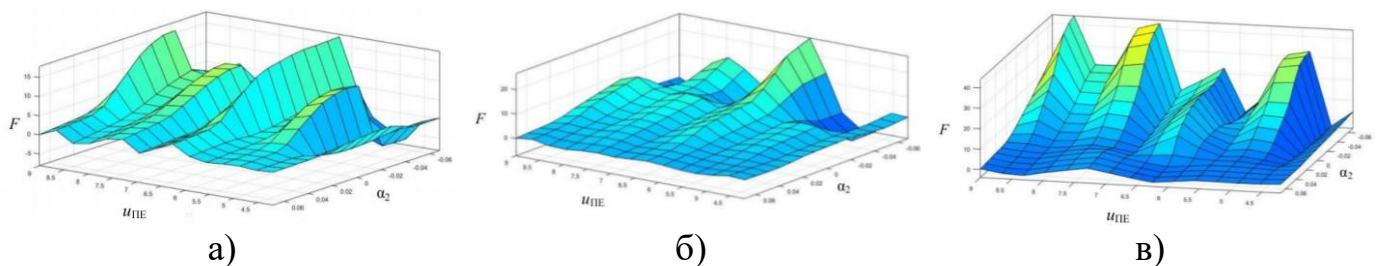


Рисунок 9 – Характеристичні поверхні ННОС: а) π -типу; б) типу трапецій; в) Гаусівського типу 2-го роду

Крім того, розроблені нейронні СЗ для ПЕ на основі 3-шарової архітектури класичної нейронної мережі зі змінюваною кількістю нейронів у прихованому шарі, навченої методом зворотного поширення помилки.

Проведені дослідження нейронних СЗ архітектурою 4-N-1 ($N = 1..100$) показали меншу адекватність реальним процесам за ННОС. Так, найкращий

показник $RMSE$ складав 1,4 для мережі з 2 нейронами у прихованому шарі, який на 48 % більше за аналогічний показник для моделі СЗ на основі ННОС із функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних трапецієвидного типу ($RMSE = 0,948$), яка показала не найкращий результат з представлених ННОС, і в 3 рази більший за найкращий результат для ННОС із функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних Гаусівського типу 2-го роду ($RMSE = 0,461$).

Таблиця 1 – Результати розрахунків статистичних оцінок адекватності ННОС ПЗ

Тип математичної моделі СЗ із функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних	SSE	R^2	$RMSE$
трикутного типу	2,926	0,961	0,571
трапецієвидного типу	8,087	0,889	0,948
Гаусівського типу 1-го роду	2,275	0,969	0,503
Гаусівського типу 2-го роду	1,904	0,974	0,461
π - типу	2,241	0,969	0,499

Для врахування невизначеностей феромагнітної природи виникнення (наприклад, зменшення товщини ФП) розроблено модель магніто-індуктивного СЗ. Феноменологічною основою функціонування ПЕ МРБП є формування ПЗ завдяки

магнітній взаємодії (за допомогою магнітного поля $\hat{H}$) елементів ФП з полюсами ПЕ. Кожна компонента поля H_ζ (координатний індекс ζ приймає значення x , y або z) створює відповідну складову зусиль, розподілених по всій площі полюсної грані зі щільністю (15):

$$f_\zeta(x_k, y_k) = \sigma_m(x_k, y_k) H_\zeta(x_k, y_k), \quad (15)$$

де точка (x_k, y_k) – центр k -ї елементарної ділянки полюса магніту, σ_m – щільність "магнітних зарядів", H_ζ – відповідні компоненти магнітного поля в точках (x_k, y_k) . Для ПЕ σ_m є функцією координат полюсної грані (x_k, y_k) , яка визначається рішенням польової задачі. Для цього до складу СЗ додається запрограмований процесор, який реалізує алгоритм обчислення магнітного потоку та магнітної провідності на основі розв'язання рівняння Лапласа для потенціалу магнітного поля у специфічній формі, перетвореного за методом Фур'є (16):

$$U(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n e^{\frac{n\pi}{b_M} x} + B_n e^{-\frac{n\pi}{b_M} x} \right) \sin \frac{n\pi}{b_M} y + \left(C_n e^{\frac{n\pi}{a_M} y} + D_n e^{-\frac{n\pi}{a_M} y} \right) \sin \frac{n\pi}{a_M} x, \quad (16)$$

де a_M та b_M – розміри прямокутного полюсу (див. рисунок 8), а невідомі коефіцієнти A_n , B_n , C_n та D_n визначаються зі специфічних крайових умов. Отримані результати експериментів для запропонованого СЗ одного порядку з модельними, що підтверджує природу електромагнітних явищ і особливості взаємодії ПЕ з ФП.

Крім того, запропоновано мультисенсорні системи контролю і керування ПЗ магніто-керованих мобільних роботів з нейро-нечітким та магніто-індуктивним СЗ.

У четвертому розділі розроблено функціональну структуру ієрархічної комп'ютеризованої системи контролю і керування МРБП. Описано основні програмно-апаратні засоби експериментальної моделі системи дистанційного керування гусеничним МРБП. Розроблено технічні засоби контролю проковзування об'єкта маніпулювання в адаптивному захваті МРБП та самого МРБП на похилій ФП на основі ємнісних та резистивних ДП. Для останніх розвинуто метод контролю проковзування, який дозволяє визначати його напрям.

Функціональна схема комп'ютеризованої системи контролю і керування гусеничним МРБП наведена на рисунку 10, де прийнято наступні позначення: ГДС – група датчиків навколишнього середовища; ГДД – група додаткових датчиків; ГОД – група основних датчиків; ДС – датчик притискної сили; ДК – датчик кута; ДШ – датчик швидкості; ПЕ1, ПЕ2 – перший і другий ПЕ; Р1, Р2 – перший та другий рушії; БКП – блок керування переміщенням; БКПЗ – блок керування ПЗ; МКП – модуль керування позиціонуванням; МКТ – модуль керування траєкторією; ВМ – виконавчі механізми робота; НМІ/ММІ – людино-машинний інтерфейс. Застосування САК із запропонованою функціональною структурою дає змогу автоматизувати процеси контролю і керування основними координатами МРБП та подібних робототехнічних комплексів. В якості експериментальної моделі вищенаведеної системи для контролю і керування МРБП розроблено систему дистанційного керування гусеничним мобільним роботом (рисунок 11), яка дозволяє керувати його просторовим рухом з будь-якої точки світу при наявності доступу до мережі Інтернет.

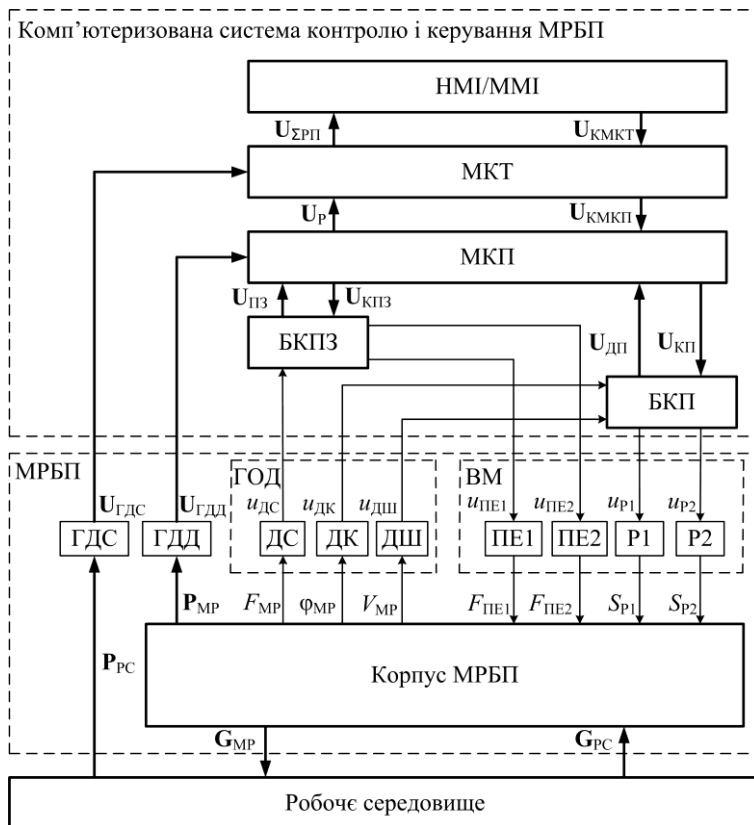


Рисунок 10 – Функціональна структура комп'ютеризованої системи контролю і керування гусеничним МРБП

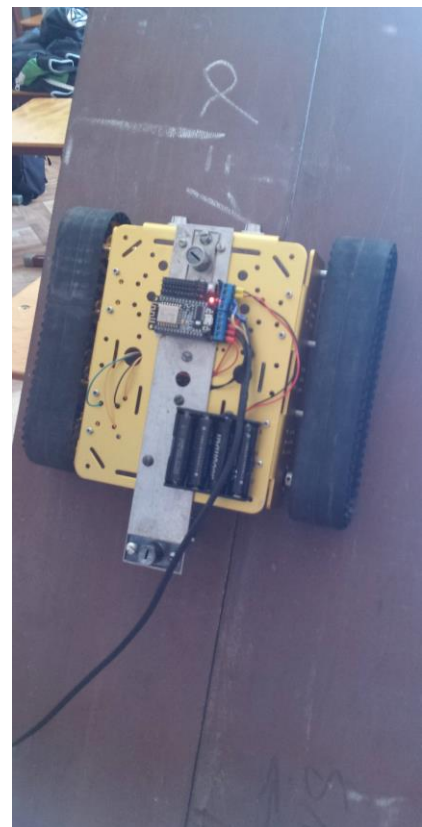


Рисунок 11 – Зовнішній вигляд експериментального МРБП в лабораторії

Керуючими пристроями даної системи є мобільний пристрій оператора (смартфон, планшет) та плата NodeMCU, які використовуються в IoT-системах з дослідницькою метою. Для організації людино-машинного інтерфейсу в розробленій системі використано додаток Blynk, що дозволило організувати динамічний інтерактивний інтерфейс для задання напрямку просторового руху.

Для забезпечення функцій багатоцільового мобільного робота, зокрема можливість захоплення деякого об'єкту маніпулятором, а також контролю достатності ПЗ ПЕ розроблено моделі засобів очулення МРБП на основі ДП. Запропоновано серію ДП на основі ємнісних та резистивних реєструвальних елементів з покращеною захищеністю від зовнішніх впливів, що розширює їх область застосування у запилених або агресивних середовищах функціонування.

Схема системи реєстрації сигналів проковзування з ДП на основі пластин з електропровідної гуми в якості реєструвального елемента, з'єднаних за мостовою вимірювальною схемою, наведена на рисунку 12, де позначено: 1 – конічний паз; 2 – адаптивний захват робота; 3 – стрижень; 4 – сферичний шарнір; 5 – наконечник; 6 – пружина; 7,8,9,10 – пластини з електропровідної гуми; 11 – поверхня наконечника; 12 – блок корекції стискального зусилля; 13 – багатовходовий вимірювальний блок; 14 – перший суматор; 15 – другий суматор; 16 – пороговий елемент; 17 – елемент затримки; φ_c – кут відхилення поздовжньої осі стрижня від положення N до N' .

Розвинутий метод контролю проковзування об'єкта маніпулювання в адаптивному захваті МРБП та МРБП на похилій ФП з ідентифікацією напрямку проковзування на основі вихідних напруг $U_1(t)$ та $U_2(t)$ вимірювального блоку представлений схематично на рисунку 13, де позначено: 1, 5 – елементи затримки; 2, 6 – суматори; 3, 4, 7, 8 – порогові елементи; 9 – блок визначення напрямку проковзування на базі FPGA.

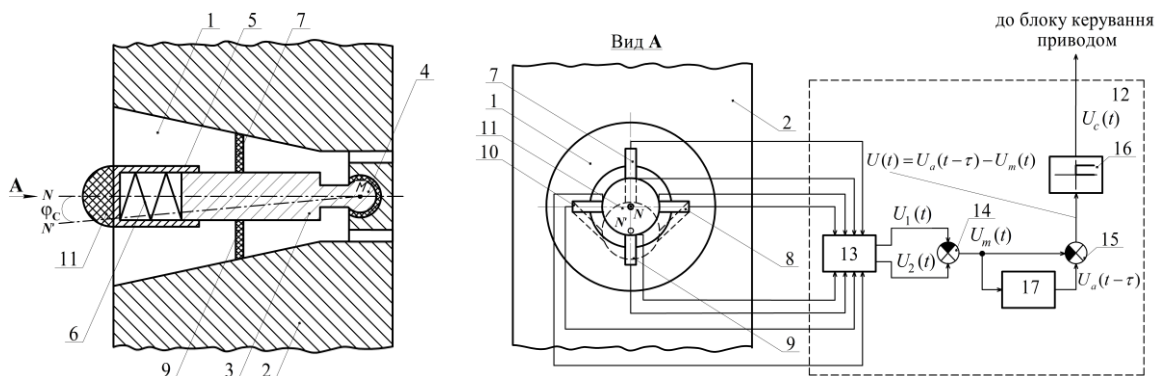


Рисунок 12 – Модель системи з ДП на основі електропровідних пластин

Запропонована система ефективно враховує технічні особливості ДП (наявність двох зон реєстрації напрямку проковзування) та вимірювальної схеми, на основі сформульованих баз продукційних правил «IF-THEN», які реалізуються мовою апаратного опису обладнання VHDL. Скорочення часу між спробними рухами захвату робота досягається за рахунок збільшення чутливості реєструвальних елементів та вибраних схемотехнічних рішень. Інтелектуальні властивості запропонованої сенсорної системи дозволяють скоротити час між серіями спробних рухів за рахунок збільшення максимально можливого

переміщення захвату, отже, загалом процес створення стискального зусилля пришвидшується на 7,1 %.

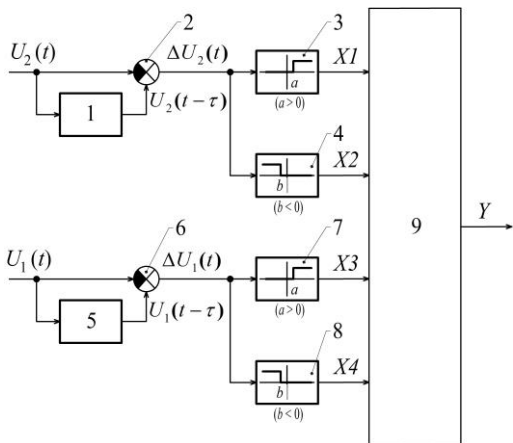


Рисунок 13 – Схема ідентифікації напрямку проковзування

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальних науково-практичних задач розробки моделей та різнотипних засобів для підвищення ефективності систем контролю і керування МРБП. Шляхом аналізу об'єкта досліджень встановлено, що підвищення ефективності процесів переміщення та виконання заданих технологічних операцій МРБП на ФП можливе шляхом розробки нових та удосконалення існуючих моделей, методів та засобів систем контролю і керування.

Запропоновані математичні моделі та технічні засоби систем контролю і керування забезпечують підвищення продуктивності, енергоефективності та безпеки процесів переміщення та виконання заданих технологічних операцій МРБП на ФП, врахування невизначеностей робочої ФП, розробку нових та удосконалення існуючих методів контролю і керування такими об'єктами. Основні результати роботи полягають у наступному:

1. У результаті проведеного критичного аналізу більшості типів існуючих МРБП для виконання робіт на ФП визначено, що найбільш перспективними є мобільні роботи на основі гусеничних та крокуючих рушіїв, які оснащені ПЕ. Поліпшені конструкції МРБП в цілому дозволяють підвищити ефективність та надійність процесів переміщення та виконання заданих технологічних операцій на похилих ФП. В результаті аналізу властивостей МРБП як багатокоординатного об'єкту керування формалізовані основні завдання контролю і керування такого робота. Найбільш важливими керованими координатами робота, здатного рухатися по похилих ФП, визначено швидкість, курсовий кут та ПЗ.

2. Вперше розроблено математичні моделі МРБП з гусеничними та магнітокерованими рушіями, які враховують взаємозв'язок напрямку та швидкості руху з величинами ПЗ та нахилу робочої ФП. Розроблений механізм визначення потрібного значення ПЗ в залежності від поточного нахилу поверхні, коефіцієнта тертя та сили опору від технологічної операції, який дозволяє підвищити енергоефективність процесів переміщення гусеничного МРБП на 6,3%. Отримані моделі враховують вплив конструктивних параметрів на параметри руху, що дозволяє досліджувати поведінку МРБП в динамічних режимах та підвищує ефективність вибору основних конструктивних параметрів при проектуванні.

3. Запропоновано структуру багатозв'язної САК просторовим рухом МРБП для переміщення та виконання заданих технологічних операцій на похилих та вертикальних ФП. Розроблена система враховує взаємний вплив координат робота,

а саме: значення курсу і швидкості руху по ФП – і показує недостатність можливостей традиційних регуляторів для досягнення високої якості керування.

4. Синтезовано нейронний регулятор просторового руху МРБП, який, по суті, поєднує в собі окремі регулятори швидкості та кута в одному комплексному регуляторі у взаємозалежній двоканальній структурі системи керування роботом. Запропонований регулятор розроблений шляхом структурного-параметричного синтезу нейронної мережі з її подальшим навчанням на основі генетичного алгоритму з використанням комплексної фітнес-функції та з урахуванням якості керування для обох вихідних координат (швидкості і кута). Розроблена система показує значно кращі результати у порівнянні з САК роботом на базі традиційних регуляторів, оскільки значно зменшився час перехідного процесу за швидкістю та кутом (на 55 % та 19 % відповідно), відсутнє перерегулювання за швидкістю (було 27 %) та суттєво зменшилася статична помилка за кутом (у 8 разів). МРБП з розробленою САК дозволяє замінити до 12 робітників для виконання операції очищення, до 8 зварювальників або до 5 мулярів у одну робочу зміну (для операції очищення продуктивність вища на 5,2 % в порівнянні з аналогами).

5. Вперше синтезовані нейро-нечіткі математичні моделі спостерігачів ПЗ для ПЕ МРБП на основі ННОС з різними типами функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних (трикутною, трапецієвидною, Гаусівською 1-го роду, Гаусівською 2-го роду, π -типу), які здатні адаптуватися до невизначеностей робочої поверхні неферромагнітної природи виникнення і дозволяють попередньо ідентифікувати величину ПЗ, що формується перед безпосереднім зчепленням магніту робота з робочою ФП в зоні ПЕ та перед виконанням чергового кроку роботом. Порівнюючи результати комп'ютерного моделювання вказаних моделей СЗ з нейронними математичними моделями СЗ на основі 3-шарової архітектури класичної нейронної мережі зі змінюваною кількістю нейронів у прихованому шарі показав, що найвищу адекватність реальним процесам має модель ННОС ПЗ з Гаусівського типу 2-го роду функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних ($R^2 = 0,974$).

6. На основі засобів теорії поля розроблено модель магніто-індуктивного СЗ ПЕ, яка дозволяє враховувати ферромагнітні та неферромагнітні невизначеності робочої ФП. Результати експериментальних досліджень одного порядку з модельними, що підтверджує природу електромагнітних явищ і виявлені особливості взаємодії ПЕ з ФП.

7. Розроблено мультисенсорні системи дистанційного контролю і керування ПЗ МРБП, оснащеного магнітокерованими колесами-рушіями, з нейро-нечіткими та магніто-індуктивним СЗ. Застосування цих мультисенсорних систем в цілому підвищує надійність процесів руху робота перед виконанням чергового кроку.

8. Розроблено функціональну структуру комп'ютеризованої системи контролю і керування МРБП для автоматизації процесів переміщення робочого інструменту по ФП. Застосування системи із запропонованою функціональною структурою дозволяє автоматизувати процеси контролю ПЗ, керування швидкістю та курсом, як основними координатами МРБП та подібних робототехнічних комплексів.

9. Розроблено експериментальну модель системи дистанційного керування гусеничним мобільним роботом, яка дозволяє керувати просторовим рухом робота з будь-якої точки світу при наявності доступу до мережі Інтернет. Застосування такої системи робить можливим віддалений доступ до процесів керування стороннім експертам при недостатній кваліфікації чергового оператора.

10. Розвинуто метод контролю проковзування об'єкта маніпулювання в адаптивному захваті МРБП та самого МРБП на похилій ФП на основі ДП з ємнісними та резистивними реєструвальними елементами з покращеною захищеністю від зовнішніх впливів, що розширює їх область застосування у запилених або агресивних середовищах функціонування. Ефективність розробленої системи контролю проковзування з резистивним ДП підтверджується експериментальним тестуванням її апаратної реалізації в реальному часі. Інтелектуальні властивості запропонованої системи дозволяють скоротити час між серіями спробних рухів за рахунок збільшення максимально можливого переміщення захвату, що збільшує на 7,1 % результуючу швидкість адаптації стискального зусилля захвату та ПЗ МРБП до апріорно невідомої маси об'єкта.

11. Результати дисертаційних досліджень стосовно розробки моделей та різнотипних засобів удосконалення систем контролю і автоматичного керування МРБП впроваджено на підприємстві ТОВ "Респект Бізнес", при виконанні міжнародних європейських проектів за програмами DAAD-Ostpartnerschaftsprogramm (проект з Саарландським університетом, ФРН) та TEMPUS (Cabriolet), Erasmus+ (Aliot), а також в Національному університеті кораблебудування ім. адмірала Макарова при виконанні наукових завдань держбюджетних тем (ДР № 0117U007282, ДР № 0115U000301). Основні положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використовуються у навчальному процесі Навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Герасін, О.С. Аналіз особливостей мобільних роботів багатоцільового призначення / О.С. Герасін // Наукові праці: Науково-методичний журнал, Серія "Комп'ютерні технології". – Миколаїв: ЧДУ ім. П. Могили, 2014. – Том 250, Випуск 238. – С. 25 – 32. [включена до МНБ Ulrichsweb (Ulrich's Periodical Directory)].

2. Kondratenko, Y. A simulation model for robot's slip displacement sensors / Y. Kondratenko, O. Gerasin, A. Topalov // International Journal of Computing. – Volume 15, Issue 4, 2016. – P. 224 – 236. [включена до МНБ Scopus].

3. Кондратенко, Ю.П. Нейро-нечіткі спостерігачі для ідентифікації притискового зусилля магнітокерованих рушіїв мобільних роботів / Ю.П. Кондратенко, Й. Рудольф, О.В. Козлов, Ю.М. Запорожець, О.С. Герасін // Технічна електродинаміка. – № 5, 2017. – С. 53 – 61. [включена до МНБ Scopus, COMPENDEX, ELIBRARY, EBSCO, PROQUEST].

4. Kozlov, O.V. Complex of tasks of monitoring and automatic control of mobile robots for vertical movement / O.V. Kozlov, **O.S. Gerasin**, G.V. Kondratenko // International Journal “SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE”. – No. 2 (8), 2017. – P. 77 – 87. [включена до *Electronic Journals Library*].

5. **Герасін, О.** Функціональні особливості спеціалізованої комп'ютерної системи керування колісним мобільним роботом багатоцільового призначення / **О. Герасін**, О. Козлов, Г. Кондратенко, М. Таранов, Й. Рудольф, Ю. Кондратенко // Технічні вісті. – 2017/1(45), 2(46). – С. 54 – 58. [включена до *МНБ Index Copernicus, EZB, OAJI*].

6. Kozlov, O.V. Modeling of an automatic control system for a multipurpose mobile robot's spatial motion / O.V. Kozlov, G.V. Kondratenko, **O.S. Gerasin**, H. Mingxin // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – № 28 (104), 2018. – С. 248 – 256. [включена до *МНБ Index Copernicus, Ulrichsweb, Electronic Journals Library, PIHЦ, Google Scholar*].

7. **Gerasin, O.S.** Synthesis and study of the mathematical model of a caterpillar mobile robot for vertical movement / **O.S. Gerasin**, O.V. Kozlov, G.V. Kondratenko, H. Mingxin // Проблеми інформаційних технологій. – No. 1 (23), 2018. – С. 87 – 97. [включена до *МНБ Index Copernicus, Research Bible, Open Academic Journals Index (OAJI), Directory of Open Access Journals (DOAJ), PIHЦ*].

8. Kozlov, O.V. Automation of the monitoring and control processes of a mobile robot for processing of large inclined surfaces / O.V. Kozlov, **O.S. Gerasin**, Y.P. Kondratenko, V.O. Kushnir // International Journal “SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE”. – No. 1 (9), 2018. – P. 59 – 66. DOI: 10.15589/SMI.2018.01.08 [включена до *Electronic Journals Library*].

9. Kondratenko, Y. Modeling of clamping magnets interaction with ferromagnetic surface for wheel mobile robots / Y. Kondratenko, Y. Zaporozhets, J. Rudolph, **O. Gerasin**, A. Topalov, O. Kozlov // International Journal of Computing. – 17(1), 2018. – P. 33 – 46. [включена до *МНБ Scopus*].

10. Патент на корисну модель 93671 України, МПК В25J 19/02. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування / Ю.П. Кондратенко, А.М. Топалов, **О.С. Герасін** (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – № u2014 04989; заявл. 12.05.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. №19.

11. Патент на корисну модель 93997 України, МПК В25J 19/02. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування / Ю.П. Кондратенко, Г.В. Кондратенко, А.М. Топалов, **О.С. Герасін** (Україна); заявник і патентовласник ЧДУ ім. П. Могили. – № u2014 04715; заявл. 05.05.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. №20.

12. Патент на корисну модель 95803 України, МПК В25J 19/02. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування / Ю.П. Кондратенко, Г.В. Кондратенко, А.М. Топалов, **О.С. Герасін** (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – № u2014 07322; заявл. 01.07.2014; опубл. 12.01.2015, Бюл. №1.

13. Патент на корисну модель 97831 України, МПК В25J 19/02. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування / Ю.П. Кондратенко, Г.В. Кондратенко, **О.С. Герасін**, А.М. Топалов (Україна); заявник і патентовласник ЧДУ ім. П. Могили. – № u2014 10537; заявл. 26.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7.

14. Патент на корисну модель 100341 України, МПК В25J 19/00. Мобільний робот для механічного очищення корпусу судна / В.О. Кушнір, Ю.П. Кондратенко, А.М. Топалов, **О.С. Герасін** (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – № u2015 00063; заявл. 05.01.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

15. Патент на корисну модель 104222 України, МПК В25J 19/00, В25J 21/00. Мобільний робот для очищення підводних поверхонь суден / В.О. Кушнір, Ю.П. Кондратенко, **О.С. Герасін**, А.М. Топалов (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – № a2015 06778; заявл. 08.07.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

16. Патент на корисну модель 104113 України, МПК В25J 9/00, В25J 15/00. Мобільний робот для переміщення по довільно орієнтованим у робочому просторі поверхням / В.О. Кушнір, Ю.П. Кондратенко, А.М. Топалов, **О.С. Герасін**, М.М. Тростинський, Р.С. Рижков (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – № u2015 06969; заявл. 13.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. № 1.

17. Патент на корисну модель 125523 України, МПК В63В 59/00, В60В 19/00, В60F 3/00. Колесо-рушій мобільного робота / Ю.П. Кондратенко, Ю.М. Запорожець, **О.С. Герасін**, Г.В. Кондратенко (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – № u 2017 12633; заявл. 19.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9.

18. Патент на корисну модель 126444 України, МПК В25J 9/10. Спосіб магнітокерованого переміщення мобільного робота / Ю.П. Кондратенко, Ю.М. Запорожець, **О.С. Герасін**, М.О. Таранов (Україна); заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – № u 2017 12632; заявл. 19.12.2017; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12.

Наукові праці апробаційного характеру та праці, в яких опубліковані додаткові наукові результати

19. Kondratenko, Y.P. Automation of Control Processes in Specialized Pyrolysis Complexes Based on Industrial Internet of Things / Y.P. Kondratenko, O.V. Kozlov, A.M. Topalov, O.V. Korobko, **O.S. Gerasin** // in: V. Kharchenko, A.L. Kor, A. Rucinski (Eds.), Dependable IoT for Human and Industry. Modeling, Architecting, Implementation. Series in Information Science and Technology. River Publishers, Gistrup, Delft, pp. 367-387, 2018.

20. Коробко, О.В. Експериментальні випробування вогнестійкого покриття інтумісцентного типу з використанням комп'ютеризованого вимірювального комплексу / О.В. Коробко, В.Ю. Кочанов, **О.С. Герасін**, А.М. Топалов // Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти, 2014. – Т. 5. Вип. 1. – С. 40 – 47.

21. Кондратенко, Ю.П. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для контролю рівня і об'єму рідини в резервуарах зі складною геометрією / Ю.П. Кондратенко, О.В. Коробко, О.В. Козлов, А.М. Топалов, **О.С. Герасін** // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – № 18 (94), 2015. – С. 114 – 121. [включена до МНБ Index Copernicus, Ulrichsweb, Electronic Journals Library, PIIIC, Google Scholar].

22. Kondratenko, Y. Analysis and Modeling of the Slip Signals' Registration Processes Based on Sensors with Multicomponent Sensing Elements / Y. Kondratenko, A. Topalov, **O. Gerasin** // Proceedings of XIIIth International Conference The experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics CADSM 2015. – Lviv-Poljana, Ukraine, February 24 – 27, 2015. – P. 109-112. *[включена до МНБ Scopus]*.

23. Kondratenko, Y.P. Modern Sensing Systems of Intelligent Robots Based on Multi-Component Slip Displacement Sensors / Y.P. Kondratenko, **O.S. Gerasin**, A.M. Topalov // Proceedings of the 2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Volume 2, Warsaw, Poland, September 24 – 26, 2015. – P. 902 – 907. *[включена до МНБ Scopus]*.

24. Kondratenko, Y.P. Synthesis and Research of Neuro-Fuzzy Observer of Clamping Force for Mobile Robot Automatic Control System / Y.P. Kondratenko, O.V. Kozlov, **O.S. Gerasin**, Y.M. Zaporozhets // Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, August 23 – 27, 2016. – P. 90 – 95. *[включена до МНБ Scopus]*.

25. Taranov, M. Advanced Approaches to Reduce Number of Actors in a Magnetically-Operated Wheel-Mover of a Mobile Robot / M. Taranov, J. Rudolph, C. Wolf, Y. Kondratenko, **O. Gerasin** // Proceedings of the 2017 13th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Polyana, Ukraine, April 20 – 23, 2017. – P. 96–100. *[включена до МНБ Scopus]*.

26. Kondratenko, Y.P. Features of clamping electromagnets using in wheel mobile robots and modeling of their interaction with ferromagnetic plate / Y.P. Kondratenko, Y.M. Zaporozhets, J. Rudolph, **O.S. Gerasin**, A.M. Topalov, O.V. Kozlov // in Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Bucharest, Romania, 2017, Vol. 1, P. 453 – 458. *[включена до МНБ Scopus]*.

27. Kondratenko, Y.P. Automation of Control Processes in Specialized Pyrolysis Complexes Based on Web SCADA Systems / Y.P. Kondratenko, O.V. Kozlov, **O.S. Gerasin**, A.M. Topalov, O.V. Korobko // in Proc. of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Bucharest, Romania, 2017, Vol. 1, P. 107 – 112. *[включена до МНБ Scopus]*.

28. **Gerasin, O.** Models of Magnetic Driver Interaction with Ferromagnetic Surface and Geometric Data Computing for Clamping Force Localization Patches / **O. Gerasin**, Y. Zaporozhets, Y. Kondratenko // IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), August 21-25, 2018, Lviv, Ukraine, P. 44 – 49. *[включена до МНБ Scopus]*.

29. **Gerasin, O.** Dependable Robot's Slip Displacement Sensors Based on Capacitive Registration Elements / **O. Gerasin**, Y. Kondratenko, A. Topalov // The 9th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT'2018, 24-27 May, 2018, Kyiv, Ukraine, P. 378 – 383. *[включена до МНБ Scopus]*.

30. Kushnir, V.O. Mobile robot for technological cleaning of ferromagnetic surfaces / V.O. Kushnir, **O.S. Gerasin** // Матеріали XXII міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика 2015” (10-11 вересня 2015 р., м. Одеса)/НАН України. ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова та ін., Одеськ. нац. політех. ун-т. – Одеса: ТЕС, 2015. – С. 95 – 96.

31. **Герасін, О.С.** Розробка підсистеми автоматичного керування притискним зусиллям для мобільного робота / **О.С. Герасін**, О.В. Козлов, Ю.М. Запорожець, Ю.П. Кондратенко // Матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2016), м. Суми, 22-23 вересня 2016 року. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – С. 112 – 113.

32. Кондратенко, Ю.П. Проектування пристроїв та систем управління : Методичні вказівки до практичних занять / Ю.П. Кондратенко, О.В. Козлов, **О.С. Герасін**. – Миколаїв : НУК, 2017. – 108 с.

33. Герасін, О.С. Математична модель колеса-рушія очисного мобільного робота / **О.С. Герасін** // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ-ОДЕСА-2015), м. Одеса, 22-24 вересня 2015 р., відп. ред. В.В. Вичужанін, 2015. – С. 308 – 311.

34. Кондратенко, Ю.П. Моделювання динаміки колісно-крокуючого рушія мобільного робота для задач автоматичного керування / Ю.П. Кондратенко, **О.С. Герасін**, О.В. Козлов, Ю.М. Запорожець // Матеріали 3-ї Міжнародної конференції з автоматичного управління та інформаційних технологій ICASIT-2015, м. Київ, 11-13 грудня 2015 р. – К., 2015. – С. 214 – 217.

35. **Герасін, О.С.** Особливості побудови математичних моделей мобільних роботів на базі притискних гусеничних рушіїв / **О.С. Герасін**, О.В. Козлов, Ю.М. Запорожець, Ю.П. Кондратенко // «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»: Міжнародна наук.-техн. конф., Дніпропетровськ, Національна металургійна академія України 29-31 березня 2016 р. : тези доп. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2016. – 97 с. – Бібліогр.: в кінці тез. – С. 75.

36. **Герасін, О.С.** Система автоматичного керування просторовим рухом гусеничного мобільного робота / **О.С. Герасін**, О.В. Козлов // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Матеріали Третьої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2016); Київ, НТУУ «КПІ», 20–21 квітня 2016 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – С. 115 – 116.

37. Кондратенко, Ю.П. Мобільний робот для технологічного очищення складних просторових феромагнітних поверхонь / Ю.П. Кондратенко, Й. Рудольф, Ю.М. Запорожець, **О.С. Герасін** // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 318 – 319.

38. Коробко, В.В., Московко А.А., **Герасин А.С.**, Топалов А.М. Разработка системы терморегулирования нагревателя термоакустического двигателя / В.В. Коробко, А.А. Московко, **А.С. Герасин**, А.М. Топалов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: XI міжнародна науково-технічна конференція, 2016. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: goo.gl/ERWA6L.

39. **Герасін, О.С.** Комплекс задач контролю та автоматичного управління мобільним роботом багатоцільового призначення / **О.С. Герасін** // Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції «Могилянські читання – 2014: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти». – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. – С. 29 - 31.

40. **Герасін, О.С.** Система автоматичного керування очисним мобільним роботом гусеничного типу на базі постійних магнітів / **О.С. Герасін, О.В. Козлов, Ю.М. Запорожець** // Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції «Могилянські читання – 2015: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти». – Том 1. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. – С. 35 – 37.

41. Кондратенко, Ю.П. Метод синтезу притискного зусилля мобільного робота з магнітокерованими колесами-рушіями / Ю.П. Кондратенко, Й. Рудольф, Ю.М. Запорожець, О.В. Козлов, Г.В. Кондратенко, **О.С. Герасін, М.О. Таранов** // Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції «Могилянські читання – 2016: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти». – Том 5. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. – С. 34 – 35.

42. **Герасин, А.С.** «Умный» почтовый ящик, как компонент «Умного дома» / **А.С. Герасин, Б.А. Килиманов** // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки, 4-5 квітня, Миколаїв, Україна, 2019, Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2019. – С. 7.

АНОТАЦІЯ

Герасін О. С. Моделі та засоби систем контролю і керування мобільними роботами багатоцільового призначення на феромагнітних поверхнях. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Одеський національний політехнічний університет МОН України, Одеса, 2019.

Дисертаційне дослідження присвячене актуальним питанням розробки моделей та різнотипних засобів для підвищення ефективності систем контролю і керування мобільними роботами багатоцільового призначення (МРБП), які здатні переміщувати робочий інструмент по феромагнітних поверхнях (ФП). Уперше розроблено математичні моделі МРБП з гусеничними та магнітокерованими рушіями, які враховують взаємозв'язок напрямку та швидкості руху з величинами притискного зусилля (ПЗ) та нахилу робочої ФП. Удосконалено структуру багатозв'язної системи керування гусеничним МРБП, яка містить перехресні зв'язки у каналах керування курсом і швидкістю та спільний нейронний регулятор просторового руху, який забезпечує досягнення високих показників якості керування. Вперше синтезовані нейро-нечіткі математичні моделі спостерігачів ПЗ для притискних електромагнітів МРБП на основі нейро-нечітких обчислювальних систем з різними типами функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних,

які здатні адаптуватися до невизначеностей робочої поверхні не ферромагнітної природи виникнення і дозволяють попередньо ідентифікувати величину ПЗ перед виконанням чергового кроку роботом. Набув подальшого розвитку метод контролю проковзування об'єкта маніпулювання в адаптивному захваті МРБП та самого МРБП на похилій ФП, що дозволяє визначати напрям проковзування з використанням резистивного датчика проковзування, збільшити швидкість адаптації стискального зусилля захвата та ПЗ МРБП до апріорно невідомої маси об'єкта.

Ключові слова: автоматизація, багатозв'язна система автоматичного керування, комп'ютеризована система контролю і керування, нейро-нечіткі технології, мобільний робот багатоцільового призначення, ідентифікація притискного зусилля, датчик проковзування.

ABSTRACT

Gerasin O. S. Models and means of the control systems of multipurpose mobile robots on ferromagnetic surfaces. – Manuscript.

The thesis for the obtaining the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by the specialty 05.13.07 – automation of control processes. – Odessa National Polytechnic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2019.

Thesis is devoted to actual issues of development of models and different means for increasing the efficiency of multipurpose mobile robots (MMRs) control systems capable of moving a working tool on ferromagnetic surfaces (FSs).

Mathematical models of MMR with caterpillar and magnetically operated mowers, which take into account the interrelation between direction and speed with the values of clamping force (CF) and the slope of the working FS, were developed for the first time. The structure of the caterpillar MMR's interrelated control system contains cross-couplings in the course and speed control channels as well as the joint neural regulator of spatial movement, which ensures achievement of high quality control indicators, has been improved. Neuro-fuzzy mathematical models of CF observers for MMR's clamping electromagnets are newly synthesized on the basis of neuro-fuzzy computing systems with different types of membership functions of the linguistic terms of input variables that are able to adapt to the non-ferromagnetic nature uncertainty of the working surface of and allow to pre-identify the CF value before performing another step by the robot. The method of the manipulation object slipping control in the adaptive gripper of the MMR and the MMR itself on the sloping FS has been further developed, which allows to determine the slippage direction using a resistive slip sensor, increase the speed of adaptation of gripping compressive force and the MMR's CF to the a priori unknown mass of the object.

Key words: automation, interrelated automatic control system, computerized control system, neuro-fuzzy technologies, multipurpose mobile robot, identification of clamping force, slip displacement sensor.

АННОТАЦИЯ

Герасин А.С. Модели и средства систем контроля и управления мобильными роботами многоцелевого назначения на ферромагнитных поверхностях. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Одесский национальный политехнический университет МОН Украины, Одесса, 2019.

Диссертационное исследование посвящено актуальным вопросам разработки моделей и разнотипных средств для повышения эффективности систем контроля и управления мобильными роботами многоцелевого назначения (МРМН), способными перемещать рабочий инструмент по ферромагнитным поверхностям (ФП).

В результате анализа свойств МРМН как многокоординатного объекта управления формализованы основные задачи контроля и управления такого робота. Наиболее важными управляемыми координатами робота, способного двигаться по наклонным ФП, определены скорость, курсовой угол и прижимное усилие (ПУ). Впервые разработаны математические модели МРМН с гусеничными и магнитоуправляемыми движителями, которые учитывают взаимосвязь направления и скорости движения с величинами ПУ и наклона рабочей ФП. Разработан механизм определения требуемого значения ПУ в зависимости от текущего наклона поверхности, коэффициента трения и силы сопротивления от выполняемой технологической операции, который позволяет повысить энергоэффективность процессов перемещения МРМН. Полученные модели учитывают влияние конструктивных параметров на параметры движения, позволяют исследовать поведение МРМН в динамических режимах и повышают эффективность выбора основных конструктивных параметров при проектировании.

Усовершенствована структура многосвязной системы управления гусеничным МРМН, которая содержит перекрестные связи в каналах управления курсом и скоростью с синтезированным общим нейронным регулятором пространственного движения МРМН, выполняющим функции отдельных регуляторов скорости и угла. Регулятор разработан путем структурно-параметрического синтеза нейронной сети, обученной на основе генетического алгоритма с использованием комплексной фитнес-функции, учитывающей качество управления для двух выходных координат (скорости и угла). Разработанная система показывает значительно лучшие результаты по сравнению с САУ роботом на базе традиционных регуляторов.

Впервые синтезированы нейро-нечёткие математические модели наблюдателей ПУ для прижимных электромагнитов МРМН на основе нейро-нечетких вычислительных систем с различными типами функций принадлежности лингвистических термов входных переменных (треугольной, трапецевидной, гауссовской 1-го рода, гауссовской 2-го рода, π -типа), которые способны адаптироваться к неопределенностям рабочей поверхности неферромагнитной природы возникновения и позволяют предварительно идентифицировать величину ПУ, что формируется перед непосредственным сцеплением магнита робота с

рабочей ФП в зоне прижимного электромагнита и перед выполнением очередного шага роботом.

Разработана экспериментальная модель системы дистанционного управления гусеничным мобильным роботом, которая позволяет управлять пространственным движением робота из любой точки мира при наличии доступа к сети Интернет. Применение такой системы делает возможным удаленный доступ к процессам управления сторонним экспертам при недостаточной квалификации дежурного оператора.

Получил дальнейшее развитие метод контроля проскальзывания объекта манипулирования в адаптивном захвате МРМН и самого МРМН на наклонной ФП на основе датчиков проскальзывания (ДП). В частности, разработана серия ДП на основе емкостных и резистивных регистрирующих элементов с улучшенной защищенностью от внешних воздействий. Для резистивного ДП разработана система очувствления, эффективность которой подтверждается экспериментальным тестированием ее аппаратной реализации в реальном времени. На основании предложенной базы продукционных правил решена задача идентификации направления проскальзывания с помощью языка аппаратного описания оборудования VHDL. Разработанная система очувствления МРМН на основе резистивного ДП позволяет увеличить скорость адаптации сжимающего усилия захвата и ПУ МРМН к априорно неизвестной массе объекта.

Ключевые слова: автоматизация, многосвязная система автоматического управления, компьютеризированная система контроля и управления, нейро-нечёткие технологии, мобильный робот многоцелевого назначения, идентификация прижимного усилия, датчик проскальзывания.