

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

Герасін Олександр Сергійович

УДК 681.516:004.896(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.С. Герасін

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор,
Заслужений винахідник України
Кондратенко Юрій Пантелійович

Миколаїв – 2019

АНОТАЦІЯ

Герасін О.С. Моделі та засоби систем контролю і керування мобільними роботами багатоцільового призначення на феромагнітних поверхнях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв; Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, 2019.

Дисертаційне дослідження присвячене актуальним питанням розробки моделей та різнотипних засобів для підвищення ефективності систем контролю і керування мобільними роботами багатоцільового призначення (МРБП) для переміщення робочого інструменту по феромагнітних поверхнях (ФП).

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.

В дисертаційній роботі проведено аналіз схемотехнічних рішень та систем дистанційного керування роботами різного функціонального призначення, які можуть переміщуватися похилими поверхнями. 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.

Основними науковими результатами роботи є наступні. У результаті проведеного критичного аналізу більшості типів існуючих МРБП для виконання робіт на ФП визначено, що найбільш перспективними є роботи на основі гусеничних та крокуючих рушіїв, які оснащені притискними електромагнітами. Розроблені покращення конструкції МРБП в цілому дозволяють підвищити ефективність та безпеку 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 притискне зусилля (ПЗ).

В роботі вперше розроблено математичні моделі МРБП з гусеничним 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 виконуваної 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 на етапі проектування.

Автором запропоновано структуру багатозв'язної системи автоматичного керування (САК) просторовим рухом гусеничного МРБП для переміщення та виконання заданих технологічних операцій на похилих та вертикальних ФП. Розроблена система враховує взаємний вплив параметрів робота, а саме: значення курсу і швидкості руху по ФП – і показує недостатність традиційного підходу до налаштування параметрів регуляторів.

Для вказаної багатозв'язної САК 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 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 дає змогу 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).

В роботі вперше синтезовані нейро-нечіткі математичні моделі спостерігачів ПЗ для притискних електромагнітів (ПЕ) МРБП на основі нейро-нечітких обчислювальних систем (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 спостерігачів зусилля (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 ($R^2 = 0,974$).

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

Автором 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 безпеку процесів руху робота перед виконанням чергового кроку.

В рамках дисертаційної роботи розвинуто метод контролю проковзування об'єкта маніпулювання в адаптивному захваті МРБП та самого МРБП на похилій ФП на основі датчиків проковзування (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 очулення для резистивного ДП підтверджується тестуванням її експериментальної 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 захвата та ПЗ МРБП до апріорно невідомої маси об'єкта.

Автором сформовано функціональну структуру комп'ютерної 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 параметрами гусеничного МРБП та подібних робототехнічних комплексів.

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.

Результати дисертаційних досліджень стосовно розробки моделей та різнотипних засобів удосконалення систем контролю і автоматичного керування параметрами 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.

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 Science by the specialty 05.13.07 – automation of control processes. – Odessa National Polytechnic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2019.

The dissertation is devoted to the actual issues of developing models and various means for increasing the effectiveness of control systems of multipurpose mobile robots (MMRs) for moving the working tool on ferromagnetic surfaces (FSs).

Increasing labor productivity and reducing the cost of finished products or services is achieved by increasing the level of automation of production, including through the use of robotic systems and complexes that replace humans during the execution of time-consuming and dangerous for human life and health technological operations in modern conditions. Flexible MMRs able to move the working tool on even and on complex inclined surfaces are particularly important as well. In particular, it is promising to use MMRs on FSs of ship hulls in shipbuilding and ship repair for automation of multi-purpose technological operations and tasks: cleaning of large area surfaces, painting, cutting, welding, inspection, diagnostics, emergency and rescue operations. aggressive and high-temperature environments, in inaccessible places, etc.

The dissertation analyzes the schematics solutions and systems of remote control of robots of various functional purpose able to move on inclined surfaces. The characteristic features and disadvantages of existing MMRs capable of moving through inclined FSs are the low level of automation of the motion control processes and the lack of means of forecasting and determining the required clamping force (CF) of a mobile robot to a non-stationary FS, which leads to not very efficient and safety MMRs using in many cases, in particular when changing the angles of inclination of the working surface, the type of current technological operation, the

mass of the object of manipulation, the thickness of the layer of fouling of the hull of the vessel by water organisms etc. Thus, the development and improvement of models and means that will increase the efficiency and reliability of the MMR control systems when operating in non-stationary conditions is an urgent task.

The main scientific results of the paper are as follows. It has been determined that the most promising are robots on the basis of caterpillars and walking mowers equipped with clamping electromagnets as a result of the critical analysis of most types of existing MMRs for performing works on FSs.

The developed MMR design improvements in general allow to increase the efficiency and safety of the processes of moving and execution of given technological operations on inclined FSs. The main tasks of control of such robot are formalized as a result of the analysis of the properties of MMR as a multi-coordinate control object. The most important coordinates of the robot that can move along the sloping FSs are speed, course angle and clamping force (CF).

Mathematical models of MMRs with caterpillar and magnetically operated mowers, which take into account the interrelation between the direction and speed of motion with the CF values and the inclination of the working FS, are developed in the paper for the first time. The mechanism for determining the required CF value is developed, depending on the current surface slope, the coefficient of friction and the resistance force from the performed technological operation, which allows to increase the energy efficiency of the caterpillar MMR moving by 6.3%. The obtained models take into account the influence of structural parameters on the parameters of motion, which allows to study the behavior of MMRs in dynamic modes and increases the efficiency of the basic constructive parameters choice at the design stage.

The author proposes a structure of an interrelated automatic control system (ACS) of the caterpillar MMR spatial motion for moving and execution of specified technological operations on sloping and vertical FSs. The developed system takes into account the mutual influence of the robot's parameters, namely: the value of the course angle and speed of movement on the FS – and shows the lack of a traditional approach to setting the parameters of the regulators.

A neural regulator of the MMR spatial motion is synthesized for a given interrelated ACS, which essentially combines separate speed and angle regulators in a single complex controller in the interrelated dual-channel structure of the robot's control system. The proposed regulator is developed by structural-parametric synthesis of the neural network with its further training on the basis of the genetic algorithm using a comprehensive fitness function, taking into account the quality of control for both output coordinates (speed and angle). The developed system shows significantly better results compared to the robot's ACS based on traditional regulators, since the time of the transients was significantly reduced for speed and angle (by 55% and 19% respectively), there was no overshoot for the speed (it was 27%) and the static error was decreased to a great extent (8 times). The MMR with the developed ACS makes it possible to replace up to 12 workers to perform a cleaning operation, up to 8 welders or up to 5 stonemasons in one working shift (the performance is higher by 5.2% compared to analogues for the cleaning operation).

In the paper for the first time neuro-fuzzy mathematical models of CF observers for MMRs clamping electromagnets (CE) are synthesized on the basis of neuro-fuzzy computing systems (NFCSs) with different types of the membership functions of the linguistic terms of input variables (triangular, trapezoidal, Gaussian 1, Gaussian 2, π -like) that are able to adapt to the non-ferromagnetic nature uncertainty of the working surface and allow to pre-identify the CF value, which is formed before the direct CE adhesion with the working FS in the zone of CE and before performing another step by the robot. Comparing the results of computer modeling of these models of force observers (FOs) with neural mathematical models of FOs based on the 3-layer architecture of the classical neural network with varying number of neurons in the hidden layer, the model of the CF NFCS with Gaussian 2 membership functions of the linguistic terms of the input variables is the highest adequacy to real processes ($R^2 = 0,974$).

A model of magneto-inductive FO of CE was proposed on the basis of the field theory means that allows to consider ferromagnetic and non-ferromagnetic uncertainties of the working FS. The results of experimental studies are of the same

order with modeling, confirming the nature of electromagnetic phenomena and the revealed features of the CE interaction with FS.

The author developed the multisensory systems of the MMR CF remote control, equipped with magnetically operated wheel-mowers, with neuro-fuzzy and magneto-inductive FOs. The use of those multisensory system as a whole increases the safety of the robot's moving processes before executing the next step.

The method of the manipulation object slipping control in the adaptive gripper of the MMR and the MMR itself on the inclined FS has been further developed in the course of the dissertation thesis, based on slip displacement sensor (SDS) with capacity and resistive registration elements with improved immunity from external influences, expands their application in dusty or aggressive environments. The effectiveness of the developed sensing system for a resistive SDS is confirmed by experimental testing of its real-time hardware realization. The intellectual properties of the proposed system can reduce the time between the series of gripper's trial motions by increasing the maximum possible movement of the gripper, so the resulting speed of adaptation of the gripper's compressive force and MMR's CF to the a priori unknown mass of the object increases by 7.1%.

The functional structure of the MMR computer control system to automate the processes of moving the working tool along FS is formed by the author. The application of the system with the proposed functional structure enables automation of CF, speed and course angle control processes, as the main parameters of caterpillar MMR and similar robotic complexes.

The experimental model of the system for crawler mobile robot remote control is developed, which allows to control the spatial movement of the robot from any place of the world in the presence of access to the Internet. The use of such a system makes it possible to remotely access to the control processes of outside experts while insufficient qualifications of an attendant.

The results of the dissertation research on the development of models and various means of improving the control systems of the MMR parameters are implemented in the enterprise LLC "Respect Business", with the execution of

international European projects under the programs DAAD-Ostpartnerschaftsprogramm (project with Saarland University, Germany) and TEMPUS (Cabriolet), Erasmus + (Aliot), as well as at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding during the execution of scientific projects of state budget orders (SR № 0117U007282, SR № 0115U000301). The main concepts, conclusions and recommendations set out in the dissertation work are used in the educational process of the Educational and Scientific Institute of Automation and Electrical Engineering of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

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

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Герасін О. С. Аналіз особливостей мобільних роботів багатоцільового призначення. *Науково-методичний журнал, Серія “Комп’ютерні технології”*. Миколаїв : ЧДУ ім. П. Могили, 2014. Т. 50, № 238. С. 25–32.
2. Kondratenko Y., Gerasin O., Topalov A. A simulation model for robot’s slip displacement sensors. *International Journal of Computing*. 2016. V. 15, № 4. P. 224–236.
3. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Герасін О. С. Нейро-нечіткі спостерігачі для ідентифікації притискного зусилля магнітокерованих рушіїв мобільних роботів. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 53–61.
4. Kozlov O. V., Gerasin O. S., Kondratenko G. V. Complex of tasks of monitoring and automatic control of mobile robots for vertical movement. *International Journal “SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE”*. 2017. № 2(8). P. 77–87.

5. Герасін О., Козлов О., Кондратенко Г., Таранов М., Рудольф Й., Кондратенко Ю. Функціональні особливості спеціалізованої комп'ютерної системи керування колісним мобільним роботом багатоцільового призначення. *Технічні вісті*. 2017. № 1 (45), № 2 (46). С. 54–58.
6. Kozlov O. V., Kondratenko G. V., Gerasin O. S., Mingxin H. Modeling of an automatic control system for a multipurpose mobile robot's spatial motion. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2018. № 28 (104). С. 248–256.
7. Gerasin O. S., Kozlov O. V., Kondratenko G. V., Mingxin H. Synthesis and study of the mathematical model of a caterpillar mobile robot for vertical movement. *Проблеми інформаційних технологій*. 2018. № 1 (23). С. 87–97.
8. Kozlov O. V., Gerasin O. S., Kondratenko Y. P., Kushnir V. O. Automation of the monitoring and control processes of a mobile robot for processing of large inclined surfaces. *International Journal "SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE"*. 2018. № 1 (9). P. 59–66.
9. Kondratenko Y., Zaporozhets Y., Rudolph J., Gerasin O., Topalov A., Kozlov O. Modeling of clamping magnets interaction with ferromagnetic surface for wheel mobile robots. *International Journal of Computing*. 2018. № 17 (1). P. 33–46.
10. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 93671 Україна: МПК В25J 19/02. № u2014 04989; заявл. 12.05.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19. 7 с.
11. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 93997 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 04715; заявл. 05.05.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 20. 7 с.
12. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 95803 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 07322; заявл. 01.07.2014; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1. 8 с.
13. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 97831 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 10537; заявл. 26.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. 9 с.

14. Мобільний робот для механічного очищення корпусу судна: пат. 100341 Україна: МПК В25J 19/00. № у 2015 00063; заявл. 05.01.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 8 с.

15. Мобільний робот для очищення підводних поверхонь суден: пат. 104222 Україна: МПК В25J 19/00, В25J 21/00. № а 2015 06778; заявл. 08.07.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2. 8 с.

16. Мобільний робот для переміщення по довільно орієнтованим у робочому просторі поверхням: пат. 104113 Україна: МПК В25J 9/00, В25J 15/00. № у 2015 06969; заявл. 13.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. № 1. 8 с.

17. Колесо-рушій мобільного робота: пат. 125523 Україна: МПК В63В 59/00, В60В 19/00, В60F 3/00. № у 2017 12633; заявл. 19.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9. 13 с.

18. Спосіб магнітокерованого переміщення мобільного робота: пат. 126444 Україна: МПК В25J 9/10. № у 2017 12632; заявл. 19.12.2017; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 8 с.

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

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

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

21. Кондратенко Ю. П., Коробко О. В., Козлов О. В., Топалов А. М., Герасін О. С. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для

контролю рівня і об'єму рідини в резервуарах зі складною геометрією. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2015. № 18 (94). С. 114–121.

22. Kondratenko Y., Topalov A., Gerasin O. Analysis and Modeling of the Slip Signals' Registration Processes Based on Sensors with Multicomponent Sensing Elements. *Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці* : матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції CADSM 2015. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. С. 109–112.

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

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

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

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

27. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V., Gerasin O. S., Topalov A. M., Korobko O. V. Automation of Control Processes in Specialized Pyrolysis Complexes

Based on Web SCADA Systems. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* : Proceedings of the 9th IEEE International Conference. Bucharest, Romania, 2017. Vol. 1. P. 107–112.

28. Gerasin O., Zaporozhets Y., Kondratenko Y. Models of Magnetic Driver Interaction with Ferromagnetic Surface and Geometric Data Computing for Clamping Force Localization Patches. *Data Stream Mining & Processing (DSMP)*: Proc. of the *IEEE Second Int. Conf.* (Lviv, Ukraine, August 21-25, 2018). Lviv, 2018. P. 44–49.

29. Gerasin O., Kondratenko Y., Topalov A. Dependable Robot's Slip Displacement Sensors Based on Capacitive Registration Elements. *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2018)*: Proceedings of the 9th IEEE Int. Conf. (Kyiv, Ukraine, 24-27 May, 2018). Kyiv, 2018. P. 378–383.

30. Kushnir, V. O., Gerasin O. S. Mobile robot for technological cleaning of ferromagnetic surfaces. *Автоматика 2015* : матеріали XXII міжнар. конф. з автоматичного управління (м. Одеса, 10-11 вересня 2015 р.) 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., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П. Розробка підсистеми автоматичного керування притискним зусиллям для мобільного роботу. *Автоматика 2016* : матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління (м. Суми, 22-23 вересня 2016 р.). Суми : Сумський державний університет, 2016. С. 112–113.

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

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

34. Кондратенко Ю. П., Герасін О. С., Козлов О. В., Запорожець Ю. М. Моделювання динаміки колісно-крокуючого рушія мобільного робота для

задач автоматичного керування. *ICACIT-2015* : матеріали 3-ї міжнародної конференції з автоматичного управління та інформаційних технологій (м. Київ, 11-13 грудня 2015 р.). Київ, 2015. С. 214–217.

35. Герасін О. С., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П. Особливості побудови математичних моделей мобільних роботів на базі притискних гусеничних рушіїв. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., Національна металургійна академія України (м. Дніпропетровськ, 29-31 березня 2016 р.). Дніпропетровськ : НМетАУ, 2016. С. 97.

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

37. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Запорожець Ю. М., Герасін О. С. Мобільний робот для технологічного очищення складних просторових феромагнітних поверхонь. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали VII міжнар. наук.-техн. конф., м. 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. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : XI міжнародна науково-технічна конференція. 2016. URL : <https://goo.gl/ERWA6L>.

39. Герасін О. С. Комплекс задач контролю та автоматичного управління мобільним роботом багатоцільового призначення. *«Могилянські читання – 2014: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти»* : матеріали всеукр. наук.-метод. конф., м. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 29–31.

40. Герасін О. С., Козлов О. В., Запорожець Ю. М. Система автоматичного керування очисним мобільним роботом гусеничного типу на базі постійних магнітів. *«Могилянські читання – 2015: досвід та тенденції*

розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти» : матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. Т. 1. С. 35–37.

41. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Запорожець Ю. М., Козлов О. В., Кондратенко Г. В., Герасін О. С., Таранов М. О. Метод синтезу притискного зусилля мобільного робота з магнітокерованими колесами-рушіями. *Могиланські читання – 2016: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти* : матеріали всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. Т. 5. С. 34–35.

42. Герасин А. С., Килиманов Б. А. «Умный» почтовый ящик, как компонент «Умного дома». *Сучасні проблеми автоматики та електротехніки* : матеріали всеукр. наук.-техн. конф. (м. Миколаїв, 4–5 квітня 2019 р.). Миколаїв : НУК, 2019. С. 7.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	29
1.1. Аналіз роботизованих технологічних процесів.....	29
1.2. Особливості та основні компоненти мобільних роботів, здатних переміщуватися по похилих та вертикальних поверхнях.....	36
1.3. Аналіз систем керування мобільними роботами для автоматизованого виконання технологічних операцій на феромагнітних поверхнях	41
1.4. Узагальнена структура мобільного робота багатоцільового призначення.....	49
1.5. Висновки за розділом та постановка завдань дослідження.....	53
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЯК ОБ’ЄКТІВ КЕРУВАННЯ РУХОМ.....	56
2.1. Розробка та модифікація конструктивних особливостей мобільних роботів для підвищення ефективності технологічних операцій на похилих та стельових поверхнях.....	57
2.1.1. Мобільний робот з гусеничним рушієм та окремими самоорієнтуючимися притискними магнітами.....	57
2.1.2. Мобільний робот з магнітокерованими колесами-рушіями...	62
2.2. Формалізація завдань керування МРБП	64
2.3. Синтез математичних моделей компонентів мобільних роботів на основі магнітокерованих коліс-рушіїв	65
2.4. Математична модель рушійного комплексу гусеничного мобільного робота багатоцільового призначення	81
2.5. Висновки за розділом 2.....	104

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	106
3.1. Системи автоматичного керування основними параметрами гусеничного МРБП з традиційними регуляторами	107
3.2. Багатозв'язна система автоматичного керування МРБП з нейрорегулятором просторового руху.....	116
3.3. Синтез гібридних нейро-нечітких спостерігачів для керування зусиллям притискних магнітів МРБП.....	131
3.4. Магніто-індуктивний спостерігач притискного зусилля МРБП на основі теорії поля.....	147
3.5. Висновки за розділом 3.....	151
РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ ЗАСОБИ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	154
4.1. Структурна організація та програмно-технічні засоби комп'ютеризованої системи контролю і керування МРБП.....	154
4.2. Експериментальна модель комп'ютеризованої системи дистанційного керування переміщенням гусеничного мобільного робота на основі засобів «Інтернету речей».....	159
4.3. Інформаційні системи очулення для забезпечення функцій багатоцільових мобільних роботів на основі датчиків проковзування.....	164
4.4. Висновки за розділом 4.....	188
ВИСНОВКИ.....	190
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	194
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	217
Додаток Б. Акти впровадження та патенти, що підтверджують практичне значення наукових результатів дисертаційної роботи.....	224
Додаток В. Аналіз особливостей колеса-рушія МРБП для робіт на складних поверхнях.....	242

Додаток Г. Навчальна та контрольна вибірки гібридного нейро-нечіткого спостерігача для обчислення притискного зусилля МРБП.....	248
Додаток Д. База правил нейро-нечіткого спостерігача притискного зусилля МРБП.....	270
Додаток Е. Система контролю і керування притискним зусиллям з магніто-індуктивним спостерігачем на основі теорії поля.....	278
Додаток Ж. Технічні характеристики апаратних засобів для дистанційного керування експериментальним МРБП.....	291

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГА	Генетичний алгоритм
ДП	Датчик проковзування
ДПС	Двигун постійного струму
ЕМК	Еталонна модель для кута
ЕМШ	Еталонна модель для швидкості
ЕРС	Електрорушійна сила
ЗС	Зусилля стискання
ККД	Коефіцієнт корисної дії
КСКК	Комп'ютеризована система контролю і керування
МРБП	Мобільний робот багатоцільового призначення
МРС	Магніторушійна сила
НМ	Нейронна мережа
НРПР	Нейронний регулятор просторового руху
ПЕ	Притискний електромагніт
ПЗ	Притискне зусилля
ПК	Персональний комп'ютер
ПП	Притискний пристрій
САК	Система автоматичного керування
СЗ	Спостерігач зусилля
ТО	Технічне обладнання
ФП	Феромагнітна поверхня

ВСТУП

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-Reña 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 ФП;
- 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, нейромережевих 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

високоєфективних 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Удосконалення технологій та підвищення продуктивності праці в різних галузях економіки належать до найважливіших завдань технічного прогресу всього суспільства. Вирішення цих важливих завдань можливе завдяки широкому впровадженню систем автоматичного керування окремими об'єктами, виробництвом та всією галуззю в цілому [43, 44].

1.1. Аналіз роботизованих технологічних процесів

Світовий досвід створення нового і модернізації діючого технологічного обладнання вказує на стрімкий розвиток керованих електроприводів, комп'ютерних засобів автоматизації, розширення сфер використання інформаційних засобів. Збільшується частка виробництва комплектних рішень, коли виконавчі механізми узгоджуються з відповідними комп'ютерними засобами автоматизації у вигляді гнучко програмованих систем, призначених для широкого використання, через високу швидкість окупності [44].

Характерною рисою сучасного виробництва є постійно зростаючі вимоги до якості готової продукції та наданих послуг, що призводить до необхідності технологічного ускладнення та збільшення трудомісткості. Крім того, тенденція дрібносерійного характеру виробництва міцно зайняла своє місце – 70..85% виробів обробляються в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва [45, 46]. Відтак, висока динаміка оновлення вимагає автоматизації дрібносерійного, зокрема механообробного, виробництва. що необхідно враховувати при виконанні необхідних за технічними умовами та стандартами технологічних процесів. Необхідно відзначити, що в таких умовах підвищення рівня автоматизації сучасних виробничих та супровідних їх систем і комплексів досягається за рахунок застосування таких основних засобів: обладнання з числовим програмним керуванням, промислових роботів, гнучких виробничих

систем, що характеризуються поєднанням технологічних одиниць і роботів, що керуються ЕОМ, оснащені засобами для переміщення оброблюваних деталей та зміни інструменту [46, 47].

Будь-який технологічний процес містить послідовність технологічних операцій, необхідних для отримання готового виробу або виконання певного виду робіт. Одночасно, робочий технологічний процес повинен забезпечувати: реалізацію значень базових показників технологічності конструкцій виготовленого виробу; дотримання правил техніки безпеки і промислової санітарії, викладених в системі стандартів безпеки праці, стандартах на типові технологічні процеси, інструкціях та інших нормативних документах по техніці безпеки і промислової санітарії [48, 49]. Відповідно, цим вимогам мають відповідати і окремі технологічні операції та робочі прийоми (складові технологічної операції). Враховуючи, що в основі автоматизації процесів лежить часткове або повне відсторонення людини від безпосередньої участі у виробничому процесі (зазвичай на ділянках з небезпечними, шкідливими для здоров'я, важкими або монотонними умовами праці) [45, 50, 51], розглянемо більш детально основні технологічні операції, для автоматизованого виконання яких застосовуються або можуть бути застосовані промислові роботи та роботизовані технологічні комплекси [52].

В наш час робототехнічні системи застосовують практично у всіх галузях економіки країн світу, однак найбільше поширення вони одержали в промисловості, перш за все – в машинобудуванні. Так, за характером виконуваних операцій [53] промислових роботів класифікують як:

1) технологічні (виробничі) роботи, які виконують основні операції технологічного процесу (в якості виробничих та оброблювальних машин), такі як гнуття, зварювання, складання, фарбування і т. п.;

2) допоміжні роботи, які виконують підйомно-транспортні операції, використовуються при обслуговуванні основного технологічного обладнання для автоматизації допоміжних операцій установки-зняття деталей, інструменту заготовок, живлення конвеєрів, транспортно-складських та інших операціях;

3) універсальні роботи, які виконують різноманітні технологічні операції (основні і допоміжні), поєднуючи в собі ознаки перших двох груп.

Роботи часто оснащують технологічними маніпуляторами, одним або декількома, в залежності від виконання технологічних завдань, наприклад, кінцевою ланкою маніпулятора мобільного робота можуть бути діагностичне обладнання, датчики, перетворювачі фізичних параметрів, технологічний інструмент або обладнання [1, 54-57].

Все більшого поширення набувають виробництва та підприємства, на яких для забезпечення виконання заданого технологічного процесу (або спільної задачі) знаходять застосування декілька промислових роботів. Тоді для узгодженого керування цими роботами використовують стратегії групового керування [58]. Загальний випадок такого керування – синхронізація виконуваних окремими роботами або іншими засобами робототехніки операцій, узгодження їх дій в часі. Таким чином, спільний технологічний процес розділяється на технологічні операції, які виконуються послідовно (або паралельно) окремими роботами [59]. При цьому необхідно забезпечувати виключення ситуації перетинання робочих зон цих роботів, щоб уникнути небезпеки їх зіткнення (наприклад, керування групою роботів на складальній лінії, де роботи послідовно виконують поопераційне складання виробу [58]).

Більш складна задача групового керування полягає у запобіганні зіткнень маніпуляторів або мобільних роботів. Зіткнення роботів при одночасній роботі можливе, коли їх робочі зони перекриваються (наприклад, сумісне керування у складі складального центру). В такому разі зазвичай застосовують системи децентралізованого керування як системи безпеки від зіткнення або централізовані без контролю відносних координат або з їх контролем, але вже в якості додаткової системи аварійної блокування [58].

Забезпечення спільної роботи маніпуляторів з координацією рухів одночасно і в просторі, і в часі, тобто при координації траєкторій руху в реальному масштабі часу, є розвитком попередньої задачі. Наступна за складністю задача групового керування роботами для забезпечення виконання

технологічного процесу – керування гнучкими виробничими системами, в яких спільно з різнотипним технологічним обладнанням транспортною та складською системами функціонують промислові роботи. Склад такої гнучкої виробничої системи показаний на рисунку 1.1, де фігурними стрілками показані матеріальні потоки: «Вхід» позначає надходження матеріально-технічного забезпечення (сировини, комплектуючих елементів), а «Вихід» – готову продукцію (як результат роботи системи).

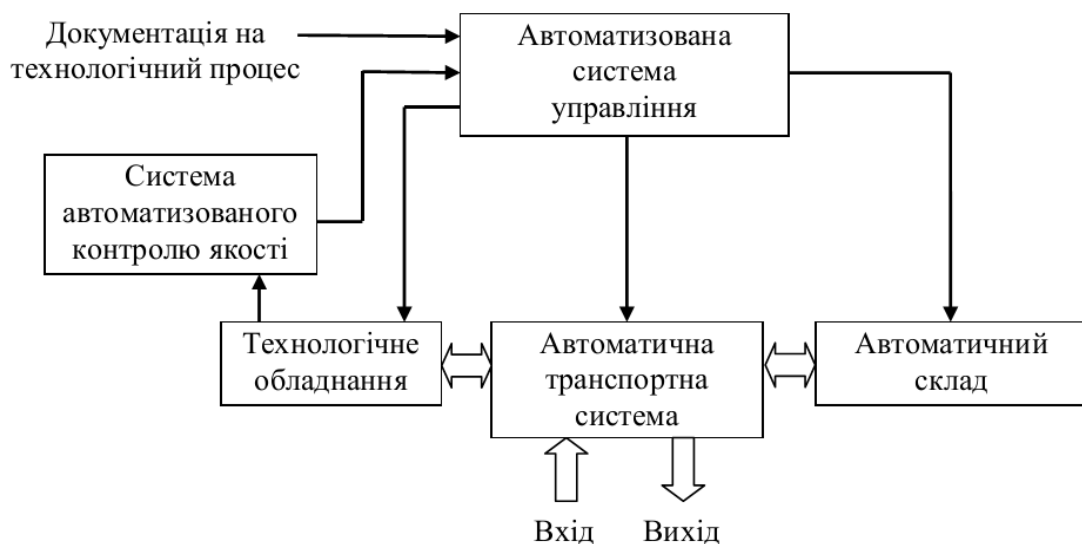


Рисунок 1.1 – Схема гнучкої виробничої системи

Кожна з показаних на рисунку 1.1 систем має багаторівневу структуру. Рівні всередині системи з'єднуються один з одним по вертикалях, а між системами – по горизонталях. Виділяють чотири рівні: одиниця технологічного обладнання, технологічна ланка, технологічна ділянка і цех. У технологічних ланках роботи і інші засоби робототехніки можуть застосовуватися на основних і допоміжних операціях з обслуговування основного технологічного устаткування (роботизована технологічна ділянка). У першому випадку всі частини ділянки керуються пристроєм керування робота. У другому випадку пристрій керування робота зазвичай підпорядковується пристрою керування основного технологічного устаткування (можливий і зворотний взаємозв'язок).

У транспортних системах роботи застосовуються безпосередньо як транспортний засіб або тільки для виконання вантажно-розвантажувальних

операцій. У цьому випадку він керується пристроєм керування відповідної транспортної системи. У складських автоматизованих системах засоби робототехніки знайшли застосування, перш за все у вигляді штабелерів, які обслуговують осередки стелажів складів [54, 60].

Останні роки в розвинених країнах світу ведуться інтенсивні дослідження, спрямовані на створення мобільних телекерованих або дистанційно-керованих роботів, які можуть переміщуватися по горизонтальних, похилих або вертикальних поверхнях за допомогою різнотипних притискних пристроїв [1, 4, 61]. Однак особливості притискних пристроїв обмежують застосування більшості типів таких роботів через неможливість долати складні поверхні. Такі роботи мають долати або обходити перешкоди, що зустрічаються на шляху їх слідування, виходити в необхідну початкову (стартову) позицію, підготовлюватися до виконання необхідних технологічних операцій і здійснювати їх виконання.

Необхідність створення подібних роботів і робототехнічних комплексів обумовлюється виникаючими екстремальними ситуаціями, збільшеними вимогами виконання технологічних операцій і створюваними умовами, в яких людині небезпечно знаходитися або складно виконувати дії самому. Екстремальні умови визначаються, перш за все, зовнішніми умовами роботи (висота, радіація, загазованість, електромагнітними полями, екстремальні значення температури, тиску і т.д.) [53].

В екстремальних ситуаціях, небезпечних чи шкідливих для людей, часто виключається їх присутність, мобільні роботи, здатні переміщуватися по похилим та вертикальним поверхням, можуть виконувати різні технологічні операції, такі як [1, 4, 53]:

- моніторинг навколишнього середовища, проведення розвідки у важкодоступних місцях за допомогою систем технічного зору, пристроїв радіаційного, хімічного або іншого контролю;
- інспекція конструкцій аварійних об'єктів і стану технологічного обладнання з метою виявлення місць і технічної діагностики пошкоджень;

- транспортні, вантажно-розвантажувальні роботи, доставка технічних засобів і матеріалів, видалення небезпечних предметів, розбір завалів, укріплення або руйнування нестійких конструкцій;
- технологічні роботи за допомогою бортових маніпуляторів з монтажу та демонтажу устаткування, очищення поверхонь, фарбування, нанесення покриттів, видалення задирок, полірування, зварювання та різання;
- дезактивація приміщень атомних електростанцій, включаючи стіни і стелі, всередині або поза будівлями;
- розвідка і пожежогасіння осередків пожежі в будівлях і резервуарах, проведення аварійно-рятувальних робіт на висоті, транспортування і порятунк людей через вікна з охоплених вогнем споруд, відчинення дверей, люків, засовок і т. ін.

В подальшому мобільного робота для виконання принаймні двох технологічних операцій з переліку вище будемо називати мобільним роботом багатоцільового призначення (МРБП). Багатоцільові роботи призначені для виконання різних основних або допоміжних операцій, в тому числі і таких, виконання яких здійснюється різнотипними прийомами за допомогою змінних робочих інструментів [53].

Найважливіше призначення автоматизації та, зокрема робототехніки, полягає у виконанні роботами різного роду робіт в екстремальних зовнішніх умовах або небезпечних і шкідливих для людини, або взагалі повне виключення її присутності [54]. Для якісного і надійного виконання перерахованих та інших робіт в екстремальних умовах транспортні системи роботів забезпечуються датчиками положення, тиску, вбудованими в притискні пристрої, що генерують сигнали в колі зворотного зв'язку системи керування про виконання рухів за допомогою пристроїв контактування з робочими поверхнями, по яких відбувається процес переміщення, і пристроїв системи пневматичних, гідравлічних або електричних приводів [62-64].

Одна з основних переваг МРБП – можливість швидкого перенастроювання для виконання завдань, що розрізняються послідовністю і

характером маніпуляційних дій. Тому застосування МРБП найбільш ефективно в умовах часткої зміни об'єктів, на яких виконуються технологічні операції, а також для автоматизації ручної низькокваліфікованої праці [65-69]. Такі роботи дають можливість автоматизувати не тільки основні, але і допоміжні операції зі значною економією коштів (через гнучкість технічних і організаційних рішень, зниження термінів комплектації і пуску), чим і пояснюється постійно зростаючий інтерес до них з боку суднобудівних та судноремонтних підприємств, фірм, що займаються обслуговуванням трубопроводів, турбін вітрогенераторів, елеваторів, корпусів суден в сухих доках та на плаву, резервуарів великої місткості, корпусів плавучих споруд, тощо [4, 8].

Для виконання розглянутих завдань на поверхнях великої площі може бути доцільним одночасне використання декількох МРБП, що є дуже складною задачею для керування. Стратегія і тактика вирішення таких задач більшою мірою досліджується і відпрацьовуються на групових іграх роботів, на імітаційних та фізичних моделях [54, 70, 71]. За таких умов вже поряд із застосуванням програмного, адаптивного та інтелектуального способів керування, які використовуються в системах керування окремих роботів, виникають специфічні завдання, пов'язані зі спеціалізацією роботів в групах і їх кооперацією. Для комп'ютеризованого керування колективами роботів застосовують мультиагентні системи з розподіленням на їх основі інтелектом між кожним роботом та системами окремих роботів [54, 63, 72, 73].

Отже, МРБП, здатні переміщуватися по складних нахилених поверхнях, є автоматизованими технічними засобами екстремальної робототехніки. Вирішення задачі їх автоматизації призводить до підвищення продуктивності праці, скорочення потреби в робочій силі і зниження рівня виробничого травматизму. Доцільно розглянути нові науково-технічні рішення щодо створення подібних роботів на основі вимірювально-інформаційних і керуючих систем, для підвищення ефективності процесів переміщення та виконання заданих різнотипних технологічних операцій МРБП в екстремальних умовах.

1.2. Особливості та основні компоненти мобільних роботів, здатних переміщуватися по похилих та вертикальних поверхнях

Для забезпечення переміщення по зовнішнім поверхням будівель і споруд мобільні роботи можуть оснащуватися різнотипними притискними пристроями (ПП): механічними, магнітними, адгезійними, пневматичними, вакуумними, магнітокерованими [1]. Особливості існуючих ПП обмежують застосування більшості типів таких роботів через неможливість долати складні поверхні, тому розглянемо системи керування мобільних роботів за типом ПП.

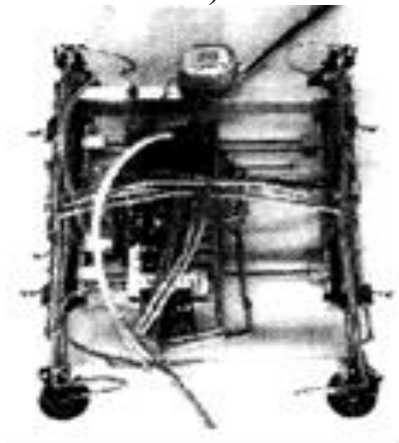
Вакуумні ПП на базі ущільнювачів. У роботів, що застосовуються для робіт у вертикальному положенні, в якості притискних пристроїв для зчеплення з вертикальними та стельовими поверхнями найчастіше використовуються пневматичні пристрої з ущільнювачами універсального застосування (які не залежать від матеріалу поверхні) [74-77]. Так, очисні мобільні роботи можуть будуватися на основі колісних рушіїв зі страховкою (рисунок 1.2, а) [75] на базі мобільного колісного комплексу з телескопічним важелем (див. рисунок 1.2, б) [76], або мати вигляд крокуючих роботів з пневмоциліндровими рушіями (див. рисунок 1.2, в) [77]. Для зменшення масогабаритних показників в таких роботах застосовуються багатоцільові ПП, які дозволяють не тільки утримуватися в заданій позиції, а ще й очищувати робочу поверхню. В такому разі зусилля для кріплення вакуумного зачисно-притискного пристрою має бути достатньо, щоб утримувати робота в заданому положенні на вертикальній поверхні і забезпечують нормальну силу, необхідну для переміщення. Якщо робот має занадто малу притискну силу вакууму, він впаде з вертикальної поверхні, а при занадто великому значенні притискного зусилля його важко зрушити з місця, хоча це значення може забезпечувати необхідне притискне зусилля [75].

Тому мобільні роботи такого типу слабкокеровані, рухаються повільно, ривками, що часто призводить до необхідного повторного очищення пропущених областей. Крім того, вакуумні притискні пристрої ненадійні при проходженні неоднорідних поверхонь (наприклад, зварних швів), які деформують вакуумне ущільнення і можуть призвести до падіння. Робота в

будь-якому режимі, окрім зачистки фарби, такими МРБП виконується дуже важко, крім того майже неможливий рух на високих швидкостях, необхідних для підвищення продуктивності виконання очисних операцій. При використанні вакуумних притискних пристроїв можливо забезпечити потрібне притискне зусилля, однак вони досить чутливі до якості або неоднорідності самої поверхні та вимагають значних витрат на часте обслуговування та заміну.



а)



в)



б)

Рисунок 1.2 – Мобільний робот для очищення похилих та вертикальних поверхонь з вакуумними притискними пристроями:

а – з колісними рушіями та страховкою; б – на базі мобільного колісного комплексу з телескопічним важелем; в – з пневмоциліндровими рушіями

Вакуумні ПП на базі гвинтів-пропелерів. Альтернативою розглянутим вище ПП можуть виступати притискні пристрої на базі гвинтів-пропелерів (рисунок 1.3, а), поміщених у замкнену всмоктуючу камеру, що не залежать від матеріалу робочої поверхні [15, 78]. Завдяки своїй багатофункціональності

вони можуть коректувати напрямок та швидкість руху мобільного робота під водою, дозволяють йому виходити на поверхню у випадку втрати адгезії з корпусом судна. Однак такі притисно-рушійні пристрої мають великі масогабаритні показники через наявність редукторного двигуна постійного струму та потребують ретельної герметизації валів для підводних робіт. Для роботи в напіваавтономному режимі без нагляду система керування крокуючого очисного робота містить енкодери на кожній обертовій частині, акселерометри, диференціальні датчики тиску для вимірювання всередині всмоктуючої камери, датчик абсолютного тиску для визначення глибини та елементів зондування місцевого середовища.

Система керування МРБП [78] є ієрархічною та містить три рівні. В основному модулі верхнього рівня обчислюється шлях, за яким робот повинен слідувати вздовж корпусу, щоб адекватно його очистити. Конфігурація цього модуля може змінюватися в залежності від стратегії, яка використовується (випадкова або на основі макета корпусу). Система середнього рівня відповідає за автономне подолання перешкод та виконання місцевих маневрів (на базі сенсорної інформації). Контролер низького рівня реалізований з використанням Simatic S7-300 PLC, і для якого розроблений GUI оператора, який відповідає за роботу двигунів. Цей контролер низького рівня може бути доступний безпосередньо для оперативного моніторингу людиною-оператором.

Основу іншого МРБП – VertiGo [79] складає рама, виготовлена з легкого вуглецевого волокна. Робот містить чотири колеса, передні два з яких можуть повертатися, подібно переднім колесам автомобілів. Здатність переміщуватися по вертикальним поверхням робота VertiGo дають два пропелери, що приводяться в дію електродвигунами, встановленими на рухомий підвісці (див. рисунок 1.3, б). На рамі робота встановлений мікроконтролер, який отримує інформацію від інерційних датчиків і двох інфрачервоних датчиків. Завдяки цим датчикам робот завжди знає своє поточне становище в просторі і відстань до перешкоди, яку йому буде необхідно подолати. Використовуючи ці дані, процесор обчислює кути нахилу пропелерів і швидкість їх обертання для того,

щоб створюваний ними потік повітря надійно утримував легку конструкцію робота, притискаючи її до вертикальної поверхні. За допомогою таких роботів [16, 79] можна проводити огляд цілісності конструкцій незалежно від матеріалу її виготовлення у важкодоступних місцях будівель і споруд. Більш енергоємні операції, поки що, залишаються для них недосяжними.

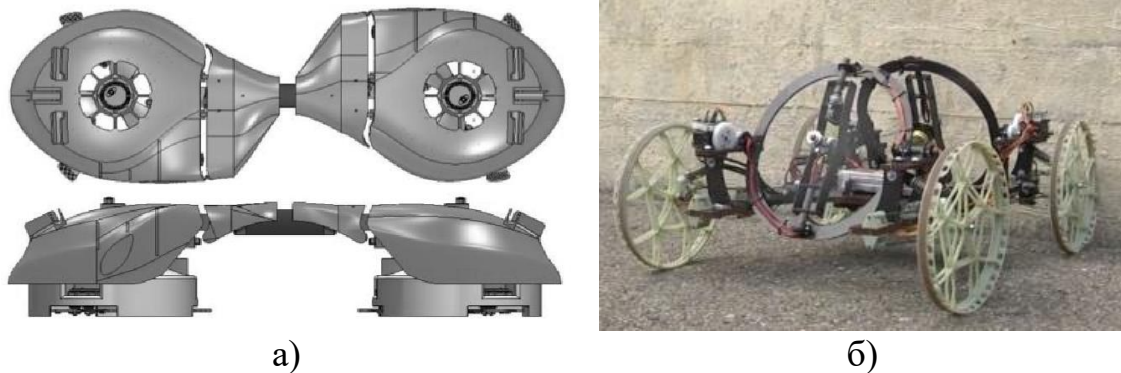


Рисунок 1.3 – Мобільні роботи на базі вакуумних притискних пристроїв:
а – підводний крокуючий очисний; б – наземний колісний

Адгезійні ПП. Одним із способів зчеплення роботів з поверхнею є хімічне та молекулярне зчеплення. Крокуючий робот, який використовує розплавлений пластик для переміщення [80], може закріплюватися на вертикальних поверхнях, несучи певний вантаж, що може перевищувати його власну вагу. На кінцівках робота знаходяться нагрівальні елементи, які встановлені в майданчиках його кінцівок. Нагріваючись, ці елементи розплавляють спеціальний полімерний склад, який затікає навіть у найдрібніші тріщини і нерівності поверхні, по якій піднімається робот (рисунок 1.4, а). Кожен цикл, крок робота, являє собою послідовність, що включає в себе розігрів матеріалу, прикріплення кінцівки до поверхні, невелике охолодження матеріалу, пересування і сильне охолодження, що дозволяє кінцівці відокремитися від поверхні. Такі роботи можуть використовуватися в якості передових розвідників для гірничо-рятувальних служб, надавати допомогу будівельникам при зведенні висотних будівель або займатися художнім оформленням вертикальних стін і фасадів. Однак підігрів, розплавлення та подальше охолодження полімерної суміші клейкого матеріалу, що використовується для

забезпечення зчеплення з робочими поверхнями, потребує значних енергетичних витрат, крім того певна частина цієї суміші залишається на робочій поверхні, тому дані роботи повинні бути додатково оснащені запасною ємністю із клейкою сумішшю. Необхідно також відзначити, що значення сили хімічного зчеплення має тенденцію до зниження відразу після кількох застосувань, у зв'язку з наявністю пилу на поверхнях [4].

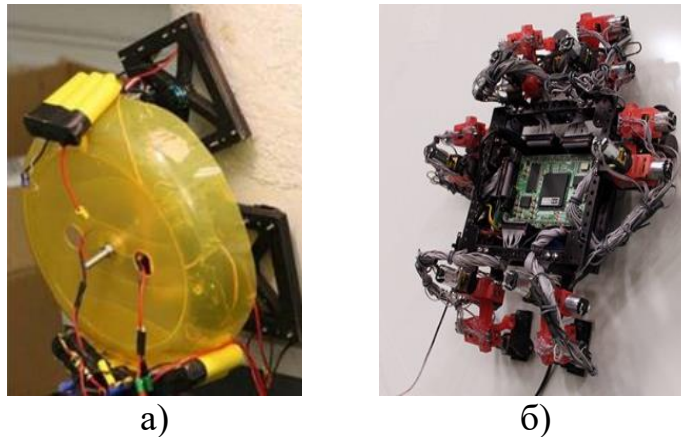


Рисунок 1.4 – Крокуючі мобільні роботи оснащені адгезійними притискними пристроями: в а) використовується розплавлений пластик, в б) – дрібні волокна

Використання сил молекулярного тяжіння, відомих як сили Ван-дер-Ваальса (Van der Waals force) як, наприклад, роботом "Abigail" [81], який позиціонується як робот для робіт у космічному просторі виглядає перспективним (див. рисунок 1.4, б). Робот Abigail, здатний переміщуватися по вертикальним і горизонтальним поверхням за рахунок використання принципів зчеплення з поверхнею кінцівок ящірки-гекона. Поверхня кінцівок робота покрита мільйонами сухих дрібних волокон зі скловолокна, що закінчуються плоскими майданчиками, моделлю для яких стали волоски, які рясно покривають пальці кінцівок ящірки-гекона, яка здатна пересуватися по вертикальних абсолютно гладких поверхнях без використання клейких речовин. Плоскі закінчення мільйонів волосків вступають у взаємодію з матеріалом поверхні і дозволяють утримати досить великий вантаж. Перевагою такої технології є придатність для використання в умовах вакууму, різких температурних змін і інших екстремальних умовах, які присутні у відкритому

космічному просторі, а недоліком – є складність виготовлення притискних пристроїв та їх висока вартість.

Для виконання заданих технологічних операцій на феромагнітних конструкціях, типових у суднобудуванні, судноремонті та деяких інших застосуваннях, природною альтернативою до вже розглянутих є притискні пристрої на базі постійних магнітів, електромагнітів або їх комбінацій [3, 24, 31, 82-85]. Прикладами таких конструкцій є феромагнітні корпуси суден, стінки резервуарів, опори мостів, конструкції трубопроводів та ін. Тому, далі доцільно розглянути більш детально комп'ютерні системи сучасних зразків МРБП, здатних переміщуватися феромагнітними поверхнями з різними кутами нахилу, алгоритми та обладнання для їх автоматизації.

1.3. Аналіз систем керування мобільними роботами для автоматизованого виконання технологічних операцій на феромагнітних поверхнях

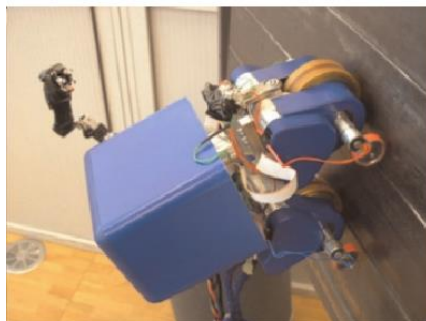
За аналогією з попереднім пунктом розглянемо особливості мобільних роботів для виконання робіт на феромагнітних поверхнях за типами ПП.

Магнітні притискні пристрої. Для задач діагностики та інспекції широко використовуються колісні мобільні роботи з постійними магнітами на колесах для робіт у важкодоступних місцях (MINOAS Crawler, рисунок 1.5, а, Magnetbike, рисунок 1.5, б [84], HR-MP20, рисунок 1.5, в [86]). У роботів MINOAS Crawler та Magnetbike застосовуються датчики шорсткості, товщини та інструментальні засоби вимірювання концентрації кисню і ширококутні CCD камери високої роздільної здатності. Для забезпечення орієнтації інспекційного робота в нього інтегровані мініатюрний гіроскоп IPY XSENS MTi і направлена система координат. Внутрішній сигнальний процесор з низьким енергоспоживанням забезпечує дрейфову 3D-орієнтацію мобільного робота без значних витрат енергії, а також калібрує прискорення 3D-графіки, 3D-курс повороту і 3D магнітно-польові дані землі. Такі роботи високопрохідні, можуть працювати автономно, але вони мають обмежену область застосування через низьку вантажопідйомність. Якщо інспекційний робот не може діяти повністю

автономно, існує необхідність у комунікації між оператором та роботом. Навіть якщо робот діє з високим ступенем автономності, оператору необхідно отримувати інформацію про стан робота. Однак деякі з датчиків вимагають високої пропускної здатності для передачі даних в режимі реального часу. Наприклад, GE2450C Prosilica може генерувати зображення з роздільною здатністю 2448 X 2050 пікселів з 15,1 кадрів/с, 1900 X 1080 (Full HD) з 24,6 кадрів/с. Це призводить до коефіцієнта навантаження 90 % для 1000BASE-T (Gigabit-Ethernet). У будь-якому випадку, основним недоліком комунікації на основі Ethernet-зв'язку є необхідність використання кабелю для з'єднання головної станції керування з роботом. Бездротові Bluetooth і WLAN стандарти через їх відносно високу швидкість передачі даних (наприклад, до 450 Мбіт/с для IEEE 802.11 проект «N» [84]) можуть використовуватися при роботі на відкритому повітрі, оскільки робота в сталевих приміщеннях значно ускладнює обробку отриманих даних. Тому МРБП повинен вміти збирати дані автономно і зберігати їх локально під час інспекційної місії або з використанням ретрансляторів [54] передавати обмежену кількість даних, які відповідають за основний стан і контроль робота, наприклад, робот застряг, завдання закінчено, запустити або зупинити завдання.



а)



б)



в)

Рисунок 1.5 – Колісні інспекційні мобільні роботи, оснащені магнітними притискними пристроями: а – MINOAS Crawler; б – Magnetbike, в – HR-MP20

Дистанційно керований робот HR-MP20 [86] для діагностики прихованих дефектів і тріщин в металі конструкцій турбін вітрогенераторів виконаний на

базі чотириколісного візка. За рахунок потужних неодимових магнітів, встановлених в колесах, він безперешкодно може пересуватися по вертикальним поверхням опор турбін і по складним кривим поверхням лопатей (див. рисунок 1.5, в). У деяких випадках для проведення огляду конструкції не потрібно повної зупинки вітрогенератора, сила магнітів і потужність електричних приводів робота дозволяють йому утримуватися навіть на поверхні обертових лопатей, долаючи вплив відцентрових сил. П'ять неодимових магнітів дозволяють роботі утримуватися на плоских і кривих поверхнях, що мають радіус кривизни до 1,2 метри в будь-якому напрямку, обраному оператором з максимальною швидкістю 13,3 м/хв.

Розглянуті інспекційні мобільні роботи з магнітними ПП високопрохідні, можуть працювати автономно, але вони мають обмежену область застосування через низьку вантажопідйомність.

Підводний очисно-інспекційний МРБП гусеничного типу з постійними магнітами на траках («Fugro», Aberdeen, GB [87]) зображений на рисунку 1.6, а, б. Такий робот містить гідравлічний привод та управляється дистанційно з поверхні за допомогою ноутбука. Очищення відбувається за допомогою комбінованого впливу на робочу поверхню струменів води і обертових щіток. Якість керування процесами очищення та діагностики підвищується за допомогою різних методів контролю: камер HD, вимірювання ультразвуковим товщиноміром, моніторингу катодного захисту, вимірювання товщини покриття, виявлення тріщин, 3D-візуалізації Sonar, лазерного сканування. Перевагою такого МРБП є високі швидкодія, мобільність та прохідність завдяки великій площі зчеплення з робочою поверхнею. Недоліками такого МРБП є: невисока надійність та невеликий термін експлуатації через те, що під час руху гусениць переміщення постійно відбуваються ударні механічні зіткнення (або співудари) постійних магнітів з робочою поверхнею, що призводять до розмагнічування та поступового руйнування магнітів; низька енергоефективність процесу переміщення пристрою, оскільки при кожному наступному елементарному (одиничному) переміщенні пристрою, що

еквівалентне розміру ширини одного постійного магніту гусеничної стрічки, відбувається відрив останнього в протилежному від напрямку руху постійного магніту в стрічці кожної гусениці переміщення, що призводить до виникнення додаткового опору руху пристрою і втрат додаткової енергії.

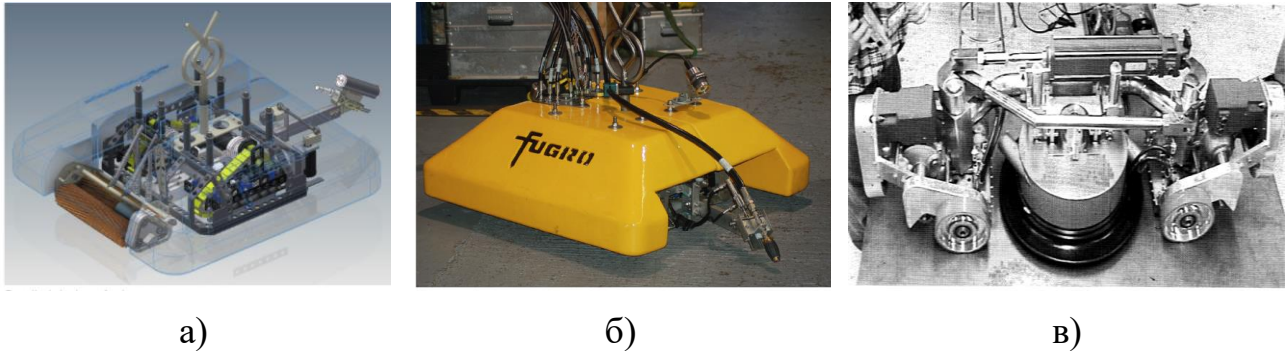


Рисунок 1.6 – Очисні мобільні роботи з постійними магнітами:

а, б – підводний; в – надводний

На рисунку 1.6, в зображений колісний очисний МРБП М2000 вагою 216 кг з постійними магнітами [75]. Він виконаний з корозійно-стійких матеріалів, таких як: титан, нержавіюча сталь і різних пластмас. Двигуни, датчики і електричні роз'єми повністю герметизовані таким чином, що весь робот може бути облитий або навіть короткотерміново занурений у воду. М2000 містить два великих магніти, які закріплені під передньою і задньою осями машини. Робот призначений для очищення фарби товщиною до 6,3 мм, що відповідає найбільшому зазору між встановленим магнітом і сталеву поверхню. При збільшенні зазору значно знижується магнітна сила, яка утримує робот на місці. Велике нормальне притискне зусилля магніту дозволяє МРБП впевнено їздити на гладких, вологих і навіть масляних поверхнях. Робот керується за допомогою блоку радіокерування в промисловому виконанні. Сигнали від блоку радіокерування опрацьовуються за допомогою вбудованого мікроконтролера, який перетворює сигнали джойстика і кнопок входів у відповідні сигнали для виконавчих механізмів МРБП і повітряних клапанів. Підсистема низького рівня на базі мікроконтролера також забезпечує функції безпеки, які включають в себе автоматичну зупинку при виникненні будь-якої

апаратної або програмної несправності і автоматичне закриття сопел очисного пристрою, коли робот вже зупинився. Швидкість очищення поверхні визначається за допомогою комп'ютерної системи технічного зору, яка фотографує вже очищену поверхню за допомогою камери та порівнює отриману фотографію зі статичними зображеннями сталеві поверхні, які знаходяться в пам'яті. Після цього система приймає рішення щодо збільшення або зменшення швидкості переміщення МРБП [75].

Отже, магнітні ПП для зчеплення є дуже перспективними для робіт на ФП, застосовуються навіть в конструкціях великогабаритних МРБП, але в них відсутня можливість керування притискним зусиллям та при деяких конструктивних розміщеннях (наприклад, на траках гусеничного рушія) мають обмежену кількість циклів зіткнення з робочою поверхнею [1, 82, 87, 88], що в цілому знижує надійність та енергоефективність процесів переміщення та виконання заданих технологічних операцій.

Цікава концепція запропонована в роботі [89], згідно з якою інспекційний мобільний робот SCID (Catania, Italy, рисунок 1.7, а) з електромагнітними утримувачами у вигляді двох потужних притискних електромагнітів (ПЕ) не містить рушійного привода, а пересувається під дією сили тяжіння по будь-якій траєкторії (рисунок 1.7, б). Стратегія керування полягає в модуляції сили тертя між електромагнітом і поверхнею для отримання заданої траєкторії. В мобільному роботі використані два види датчиків: два потенціометри (стандартні однообертні лінійні) для вимірювання кутового положення та акселерометр ADXL 202 для визначення абсолютного кута відхилення робота.

На рисунку 1.7, в показана архітектура системи керування роботом SCID. Користувальницький інтерфейс, який працює на класичному персональному комп'ютері (ПК), використовується тільки для регулювання параметрів керування і перепрограмування даних для відпрацювання траєкторії. Це посилення реалізовується за допомогою з'єднання по інтерфейсу RS-232. Після програмування система SCID є автономною. Робот оснащений гібридним нечітко-цифровим мікроконтролером ST52E420 (ST Microelectronics), який

містить 3 програмованих таймери, 8-бітовий АЦП з 8 мультиплексованими каналами і три порти введення/виведення, 4Кбайти ПЗУ, 128 байт ОЗУ. Три аналогові входи використовуються для отримання сигналів від двох потенціометрів і акселерометра, а два цифрові виходи з'єднані з двома силовими біполярними транзисторами для керування електромагнітами. Для зберігання траєкторних даних, а також деяких параметрів керування траєкторією виділяються 512 байт EEPROM. Ця пам'ять має послідовний двухпроводний інтерфейс використовуючи стандартний I²C протокол. Цей стандарт використовує двонаправлену лінію передачі даних (SDA) і лінію синхронізації передачі даних (SCL). Кожен ведений на шині (наприклад, пам'ять) має адресу, що ідентифікує його під час зв'язку, причому мікроконтролер є ведучим шини. Програмне забезпечення контролера складається з процедури низького рівня для зв'язку, користувацького інтерфейсу, виконавчого блоку та алгоритму керування.

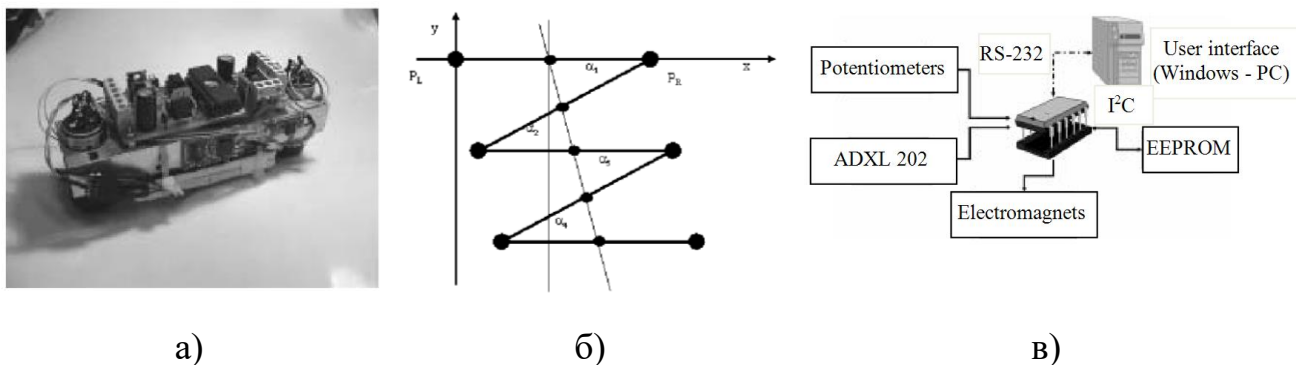


Рисунок 1.7 – Інспекційний мобільний робот SCID: а – зовнішній вигляд; б – траєкторія переміщення; в – архітектура системи керування

Перевагами такого робота є висока енергоефективність та невелика маса, а недоліками є обмеженість застосування через можливість пересування лише зверху вниз, що відповідно не дозволяє працювати на стельових поверхнях, невисока надійність системи через появу неконтрольованого ковзання в процесі переміщення по складних вертикальних поверхнях.

Морський колісний МРБП Octopus (French, рисунок 1.8, а) [90] здатний пересуватися по вертикальних, горизонтальних або похилих сталевих

поверхнях за допомогою потужних магнітів. Система керування «Ніе» може бути попередньо запрограмована слідувати по заздалегідь визначеному шляху або управлятися дистанційно в режимі реального часу за допомогою джойстика. Такий робот має низьку швидкість та прохідність через невелику площу зчеплення з робочою поверхнею.

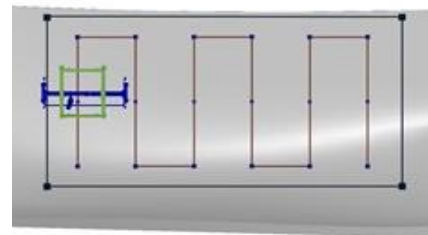
Судновий очисний МРБП крокуючого типу з ручним, напівавтоматичним та автоматичним керуванням зображений на рисунку 1.8, б, в [87, 91]. Комбіновані притискні пристрої виконані на базі постійних магнітів NdFeB, які здатні уникнути накопичення феромагнітного пилю під час роботи очисного обладнання за рахунок додаткових електромагнітів. Ці електромагніти також розфіксують ноги МРБП від робочої ФП при переміщенні шляхом створення магнітних полів, протилежних до магнітних полів постійних магнітів. Такі притискні пристрої дозволяють регулювати значення притискного зусилля, коли це необхідно. Конструкція робота заснована на двох чотириногих рамах або модулях, пов'язаних між собою комплексом суглобів, які переміщуються один відносно одного за допомогою пневматичного привода, чим забезпечується процес пересування робота по корпусу судна (рисунок 1.8, в).



а)



б)



в)

Рисунок 1.8 – Очисні мобільні роботи: а – з електромагнітними ПП;
б – з комбінованими ПП та в – траєкторія переміщення робота по ФП

Структура системи керування складається з двох основних частин: бортова система керування, яка перевіряє датчики і приймає рішення в режимі реального часу, щодо стану виконавчих механізмів; і система керування переміщенням, розташована на базовій станції на землі. У функції системи керування переміщенням входять: дозвіл взаємодії з операторами, планування

шляху, щоб покрити площу, яка має бути очищена, і перевірка якості обробки поверхні за допомогою інформації, отриманої з двох інтелектуальних камер. Причому одна камера знаходиться до, а друга – позаду очисного інструменту. Дві підсистеми керування з'єднані одна з одною через лінію зв'язку, причому така система керування містить чотири рівні керування, один з яких розташований на самому роботі і три – на базовій станції.

Бортова система керування МРБП базується на мікроконтролері PIC24HJ256GP206, який призначений для роботи в промислових умовах. Він зв'язується з базовою станцією через шину з інтерфейсом RS485 для отримання інструкцій та передачі інформації від датчиків. Система включає в себе чотири види датчиків: лінійні датчики, які вимірюють положення пневматичного приводу і дозволяють оцінювати в реальному часі кінематичну конфігурацію робота; тривісний акселерометр, який вимірює локальну гравітацію і використовується для оцінки просторової орієнтації робота, і відповідно коректує оцінку положення робота на корпусі судна, яке забезпечується системою позиціонування; і дві відеокамери для відстеження якості очищеної поверхні і додаткового позиціонування робота [87].

Підсистема керування переміщенням побудована на стандартному ПК з інтерфейсом RS485 для зв'язку з підсистемою керування роботом, а також з відповідним входом для інформації, переданої з відеокамер відстеження якості очищення. Керування переміщенням базується на трьох ієрархічних рівнях, які відповідають трьом різним режимам. Нижні рівні підпорядковуються верхнім рівням, і кожен рівень доступний для оператора за допомогою графічного інтерфейсу користувача. У цьому інтерфейсі, користувач може вибирати між трьома режимами роботи: ручний, напіваавтоматичний і автоматичний [87].

Перевагами такого МРБП є його висока прохідність та надійність зчеплення з ФП завдяки додатковим електромагнітам, наявність ієрархічної системи керування з використанням засобів інтелектуалізації, а недоліком – обмеженість областей застосування, тому що через велику кількість дротів він може опрацьовувати лише зовнішні поверхні корпусу судна.

Далі доцільно узагальнити результати аналізу існуючих МРБП та засобів для їх автоматизації у вигляді узагальнених структур такого мобільного робота та його системи керування.

1.4. Узагальнена структура мобільного робота багатоцільового призначення

Дослідження і розробки роботів ведуться в лабораторіях і дослідницьких центрах, в розвинених у технологічному напрямку країнах світу [1, 63, 65-69]. Однак будь-який мобільний робот може бути представлений у вигляді сукупності трьох великих систем – транспортної, спеціальної та керування (рисунок 1.9) [64].

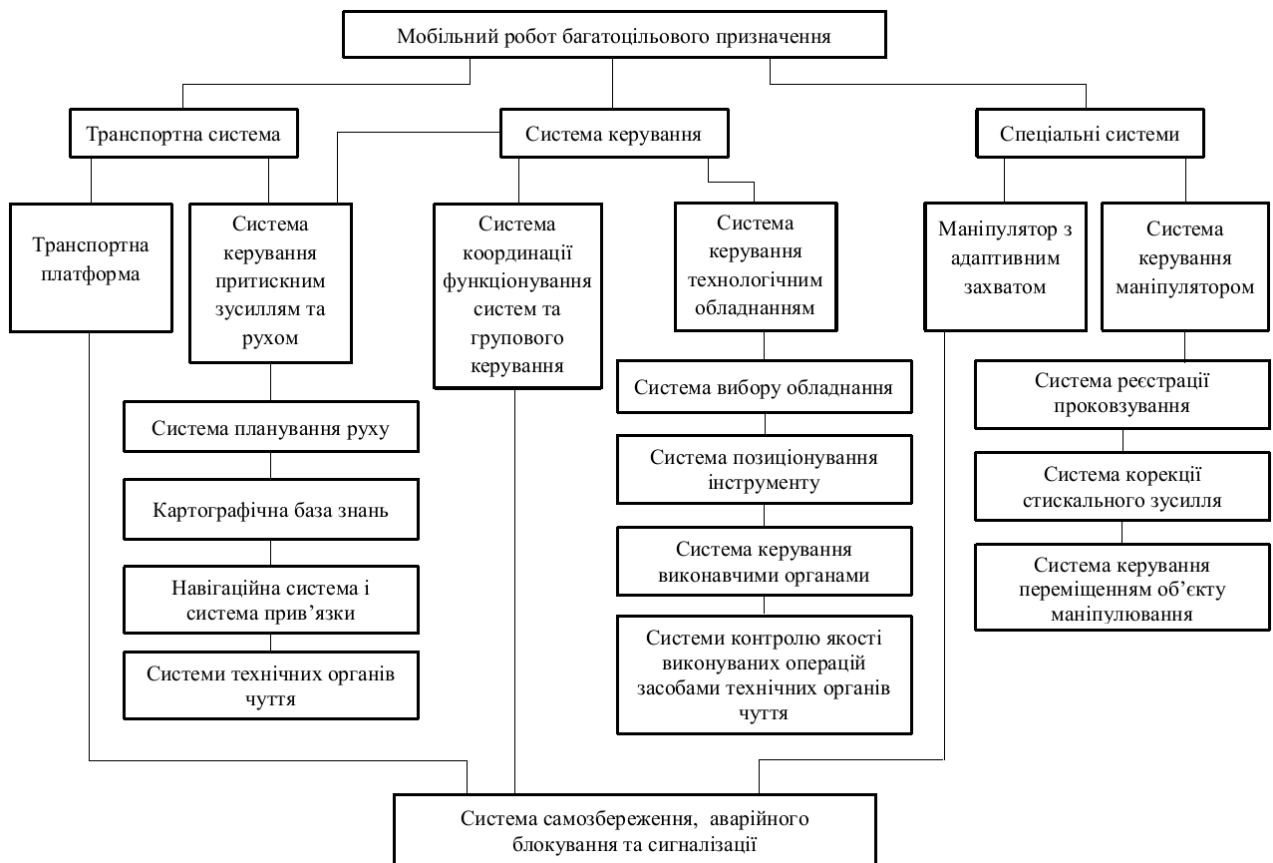


Рисунок 1.9 – Узагальнена структура МРБП

Транспортна система (рисунок 1.9) являє собою транспортну платформу, яка призначена для доставки спеціального та технологічного обладнання до місця виконання технологічної операції. Транспортна платформа складається з ходової частини, притискних пристроїв, корпусу та енергетичної

установки. Як правило, система керування переміщенням встановлюється всередині корпусу. Залежно від типу середовища експлуатації ходова частина може бути гусенична, колісна, колісно-гусенична, напівгусенична, крокуюча, колісно-крокуюча, гвинтовим, водометним і реактивним рушіями.

При створенні нового робота вибір типу його рушія залежить від багатьох факторів: властивостей робочої поверхні, необхідності переміщення по елементам споруд і всередині будівель. Так, в якості рушія МРБП, призначеного для використання на нерівній місцевості, вибирають гусеничний рушій як найбільш універсальний, або крокуючий. При переважному використанні мобільних роботів на дорогах зазвичай обирають колісний рушій [64]. При конструюванні звичайних транспортних засобів параметри рушія оптимізуються для найбільш характерних умов застосування і поверхонь руху. Однак, для мобільного робота така оптимізація є дуже складним завданням в силу невизначеності умов руху. Тому в даний час рушії роботів конструюються з можливістю адаптації до поверхні руху [4, 64]. Крім того, система керування рухом повинна забезпечувати контроль притискного зусилля притискних пристроїв робота, планування руху в недетермінованих умовах на основі картографічної бази з урахуванням інформації, що безперервно надходить в систему керування від технічних органів чуття і навігаційної системи.

Спеціальні системи служать для керування спеціалізованим технологічним обладнанням, зокрема технологічним маніпулятором з адаптивним захватом. Для надійного та не руйнуючого захоплення об'єкта маніпулювання необхідно керувати стискальним зусиллям губок адаптивного захвату – збільшувати при появі сигналів проковзування (детальніше в розд. 4.4), позиціонуванням цього об'єкту та ланок маніпулятора в просторі. Спеціальна система може містити і інше специфічне обладнання.

Система керування забезпечує керування роботою технологічного устаткування, живленням і рухом з урахуванням взаємодії транспортної системи з навколишнім середовищем. При наявності на борту МРБП різнотипного технологічного обладнання система керування має здійснювати

поточний вибір робочого інструменту, позиціонувати та керувати його роботою у відповідності до вимог технологічного процесу з подальшим контролем якості виконаних робіт. Система керування включає в себе інформаційно-керуючу частину (апаратура керування роботом, датчики, система технічного зору та мікропроцесори попередньої обробки інформації), розташовану на мобільному роботі; пост оператора мобільного робота (пульт керування, пристрої відеоспостереження; ЕОМ для обробки інформації) і комплект приймально-передавальної апаратури, що забезпечує передачу інформації від МРБП на пост оператора і керуючих команд від поста оператора на МРБП. Складність системи керування визначається складністю розв'язуваної задачі, ступенем невизначеності зовнішнього середовища і необхідним ступенем автономності робота.

У загальному випадку системи керування МРБП містять чотири рівні керування: вищий, стратегічний, тактичний і виконавчий, які мають вбудовані механізми взаємодії, що працюють на основі оцінки якості реалізації планів різного рівня в реальному фізичному світі (рисунк 1.10) [65, 73].

На *вищому рівні* абстракції відбувається формування та обробка інформації про умови функціонування МРБП, а також вибір оптимального алгоритму виконання технологічного завдання з набору існуючих. *Стратегічний рівень* визначає, на підставі обраного алгоритму керування, послідовність елементарних дій платформи МРБП. На *тактичному рівні* відбувається розподіл сформованої послідовності дій між певними ступенями свободи робота, за якими формуються дані про рух на *виконавчому рівні*.

Організація взаємодії рівнів керування повинна дозволяти приймати рішення на тому рівні, який в даний момент володіє найбільш достовірною інформацією без передачі керування на більш високий рівень. Людина (оператор) в даний час є невід'ємною частиною системи керування. Функції людини в системі керування визначають її складність. У роботах першого покоління оператор активно бере участь в управлінні мобільним роботом на всіх трьох рівнях, аж до безперервного ручного керування виконавчими

механізмами [53]. Це спрощує конструкцію системи керування, але ускладнює роботу оператора. У режимі дистанційного керування розпізнавання дорожніх сцен, планування маршруту і формування команд керування здійснюється оператором через стаціонарний або мобільний пульт керування.

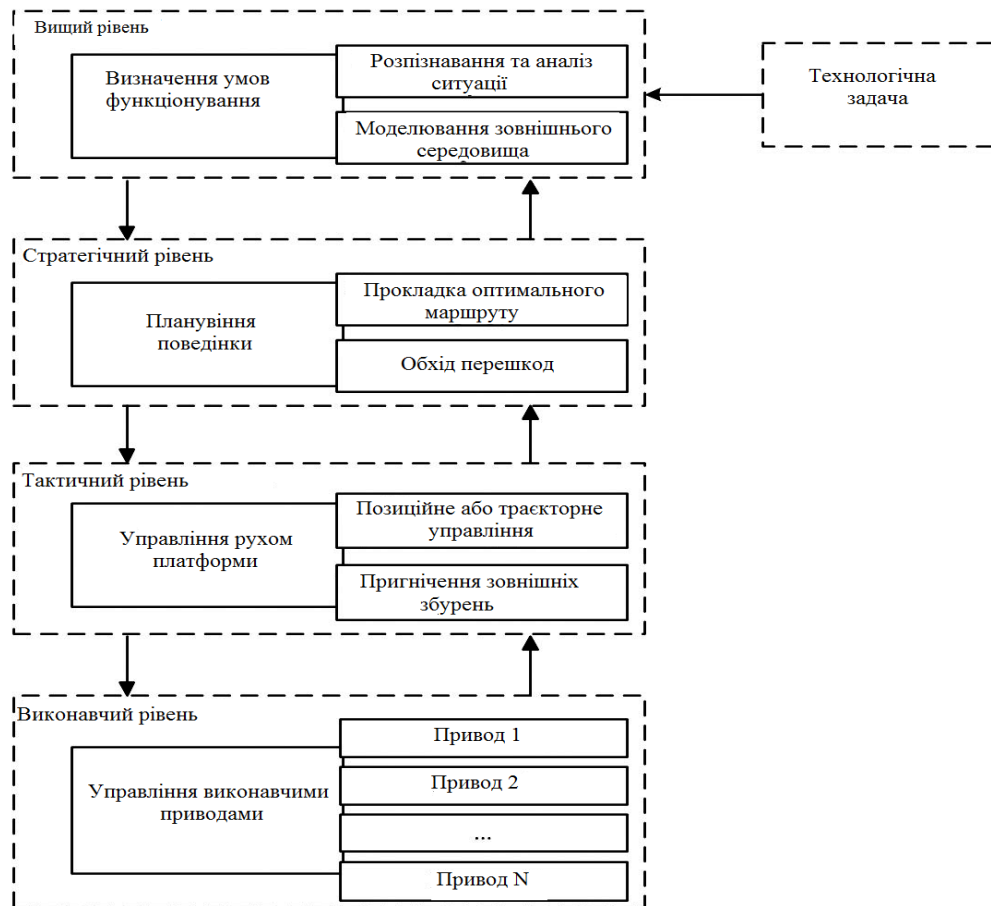


Рисунок 1.10 – Ієрархічна структура керування МРБП

Основні недоліки дистанційного керування обумовлені наявністю телевізійного та радіоканалів зв'язку, їх невисокою перешкодостійкістю, небезпекою несподіваного припинення зв'язку в зонах радіотіні. У роботах другого покоління керування нижнього рівня покладено на бортову систему керування роботом. Загальним для роботів другого покоління є використання зворотного зв'язку як у відповідності з поточним станом робота, так і у відповідності до стану зовнішнього середовища. Третє покоління роботів залишає людині тільки стратегічний рівень: система спілкування з оператором зводиться до видачі завдання і прийняттю звіту про його виконання [64].

Однак, в цьому випадку автоматична система повинна володіти універсальністю, гнучкістю і широтою інтелектуальних можливостей. При цьому будь-яке додаткове завдання, що вирішується засобами штучного інтелекту, вимагає не тільки розробки спеціальних алгоритмів розв'язання, але і спеціалізованих технічних засобів – нових технічних органів чуттів, спецобчислювача і виконавчих органів, тобто кожна така задача являє собою складну науково-технологічну проблему [92].

В даний час найбільш доцільною представляється розробка комбінованих систем з можливостями автоматичного і дистанційного супервізорного керування. Наприклад, визначення та задання орієнтирів на місцевості поверхні здійснюється оператором, а подальший рух – бортовою системою керування. Виключення людини з процесу безпосереднього керування різко скорочує обсяг переданої через ефір інформації, а можливість його втручання в складних ситуаціях розширює коло вирішуваних завдань. САК забезпечує продовження виконання завдання або евакуацію робота з небезпечних зон при порушенні зв'язку через відмову обладнання. Використання МРБП більш ефективно при включенні його до складу робототехнічного комплексу, утвореного групою мобільних роботів, засобами доставки, енергозабезпечення та технічного обслуговування, центральним постом керування і обробки даних. МРБП універсальні і тому можуть бути використані в різних областях. При застосуванні робототехніки в промисловості пріоритетне значення мають технічні можливості роботів, економічна ефективність, придатність до експлуатації в жорстких і екстремальних умовах і здатність забезпечити захист обслуговуючого персоналу [1, 4, 93], що забезпечується складними системами управління, зокрема з використанням інтелектуальних технологій [94].

1.5. Висновки за розділом та постановка завдань дослідження

Мобільні роботи набули широкого розповсюдження в сьогоденні у зв'язку з пошуково-дослідницькою діяльністю у найрізноманітніших сферах та в таких місцях, де використовувати працю людини небезпечно або недоцільно.

Застосування роботів значно спрощує виконання поставлених завдань, дозволяє автоматизувати складні виробничі процеси.

Великий інтерес викликає використання роботів, здатних переміщуватися по вертикальних поверхнях, для робіт на фасадах будівель, судах, резервуарах, опорах мостів. Робота людини на вертикальних поверхнях і великих висотах завжди пов'язана з ризиком, тому реалізація цілеспрямованих дій в екстремальних умовах за допомогою роботів є актуальним завданням.

Для забезпечення переміщення по зовнішніх поверхнях мобільні роботи можуть оснащуватися різнотипними ПП: вакуумними, адгезійними, магнітними, магнітокерованими. Найчастіше ПП характеризується високим енергоспоживанням, а також висуває високі вимоги до якості робочої поверхні (перепади висот, деформації, нерівності, значна шорсткість).

Для якісного і надійного виконання технологічних операцій в екстремальних умовах транспортні системи роботів забезпечуються датчиками положення, притискного зусилля (тиску, сили), вбудованими в притискні пристрої, що генерують сигнали в колі зворотного зв'язку системи керування.

У сучасних МРБП не залежно від конструкції та типу системи керування знаходять широке застосування невеликі та універсальні вбудовані контролери, які кожен робот несе на борту. Разом з тим, необхідно відзначити, що особливості об'єкта керування у вигляді МРБП призначення додають специфічні завдання для вирішення, тому найбільш перспективними виглядають саме адаптивні та інтелектуальні системи. Адаптивно-інтелектуальне керування передбачає формування моделей зовнішнього середовища; прийняття рішень і планування подальших дій; керування рухом; створення інтелектуального інтерфейсу між оператором і роботом. Однак такі способи керування малопоширені через складність розробки подібних систем.

У результаті проведеного критичного аналізу більшості типів існуючих МРБП для виконання робіт на ФП найбільш перспективними виглядають роботи з гусеничним рушієм, які оснащені магнітними або магнітокерованими ПП. МРБП із ПП на базі електромагнітів і постійних магнітів здатний

забезпечити більшу швидкодію та надійність при переміщенні по похилих та вертикальних ФП при виконанні заданих технологічних операцій (як мінімум двох), на відміну від інших типів ПП. Однак, в результаті аналізу особливостей і перспектив розробки МРБП для автоматизації процесів переміщення та виконання заданих технологічних операцій виявлено, що дослідженнями в даній сфері займаються переважно іноземні вчені, а задачі розробки функціональних структур, математичних моделей, програмно-технічних засобів систем для контролю і керування МРБП, для підвищення енергоефективності, надійності та економічних показників робота залишаються предметом досліджень ряду наукових колективів як в Україні, так і за кордоном.

Враховуючи вищевказане можна сформулювати наступні першочергові завдання дисертаційних досліджень:

- 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 багатокординатного 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.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЯК ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ РУХОМ

Як зазначалося в розділі 1, для реалізації процесів переміщення робочого інструменту та виконання заданих технологічних процесів та окремих операцій використовуються спеціалізовані високотехнологічні рухомі комплекси – МРБП, які, в свою чергу, являють собою складні багатокomпонентні технічні об'єкти. Автоматизація робототехнічних комплексів даного типу дозволяє значно підвищити їх надійність, ефективність роботи та економічні показники.

Для дослідження показників ефективності систем контролю і керування для різнотипних МРБП на стадії їх проектування доцільно використовувати методи математичного, комп'ютерного та імітаційного моделювання, які дають змогу отримати характеристики реального об'єкта чи системи [95]. Методи математичного моделювання засновані на здатності математично описувати рівняннями різноманітні за природою явища (процеси) і виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи [96] з використанням принципу аналогії теорії подібності. Практично не обмеженими можливостями для опису особливостей функціонально складної системи, якою є МРБП та його САК, мають відносно низьковартісні (в порівнянні з експериментальними та іншими підходами) методи моделювання. Зокрема, комп'ютерне та імітаційне моделювання окремих елементів МРБП полягає у формуванні моделі реакції системи і проведенні на ній чисельних експериментів з метою виявлення шляхів її вдосконалення і ефективного використання.

Узагальнені моделі МРБП та його САК можна отримати шляхом структурного моделювання. Для задачі розробки САК МРБП структурне моделювання допомагає формалізувати структури різних типів (окремих елементів робота та його САК) на основі операторного методу з

представленням окремих компонентів у вигляді передаточних функцій [6, 97]. Тому, вирішення задач дисертаційного дослідження доцільно проводити за допомогою комп'ютерної техніки, зокрема програм для імітаційного моделювання [2, 6, 9, 97], які допомагають вирішувати складені диференційні рівняння математичної моделі системи, зокрема операторним методом, здійснювати структурні перетворення моделі системи, проводити параметричний синтез та аналізувати вихідні залежності параметрів МРБП.

В розділі 2.1 розглянемо більш детально перспективні конструкції МРБП, здатних переміщуватися по похилих феромагнітних поверхнях.

2.1. Розробка та модифікація конструктивних особливостей мобільних роботів для підвищення ефективності технологічних операцій на похилих та стельових поверхнях

В розділі 1 розглянуті переваги та недоліки основних типів мобільних роботів для переміщення по похилих поверхнях. Розглянемо далі перспективні технічні рішення, які отримані на основі аналізу основних недоліків існуючих рішень та запропоновані для реалізації процесу руху як відносно рівними, так і рельєфними феромагнітними поверхнями з різкими змінами кута нахилу.

2.1.1. Мобільний робот з гусеничним рушієм та окремими самоорієнтуючимися притискними магнітами.

Найбільш близьким за технічною сутністю до багатоцільового мобільного робота є робот для механічного очищення корпусу судна з постійними притискними магнітами на гусеницях, що розглянутий в [82, 88]. Основними проблемами такого робота є наступні: низька надійність та невеликий термін експлуатації через ударні механічні зіткнення магнітів з робочою поверхнею, що призводять до розмагнічування та поступового руйнування магнітів; при переміщенні вгору по ФП з тупим кутом нахилу існує загроза почергового відриву всіх притискних магнітів, починаючи з крайніх верхніх, під дією ваги конструкції робота; низька енергоефективність та швидкодія процесу переміщення робота, оскільки при кожному наступному елементарному (одиничному) переміщенні робота, що еквівалентне розміру ширини одного

постійного магніту гусеничної стрічки, відбувається відрив останнього в протилежному від напрямку руху постійного магніту в стрічці кожної гусениці переміщення, що призводить до виникнення додаткового опору руху і втрат додаткової електроенергії та вимагає застосування досить потужних двигунів з високим обертовим моментом та надвантажувальною здатністю; обмеженість областей застосування та низька надійність процесів очищення та переміщення при роботі на нерівній робочій ФП через можливий відрив однієї з гусениць від ФП, що призведе до відриву другої гусениці від площини корпусу судна, а, отже, пристрій може припинити процес очищення та від'єднається від ФП [14].

Запропонований в [14, 51] МРБП, містить суцільну двокомпонентну раму плоскої конструкції (рисунк 2.1), на якій прямокутна частина рами 1 оснащена гусеничним механізмом переміщення, на кожен гусеницю переміщення 2 якого встановлені ведуче 3 і ведене 4 колеса, між якими за допомогою натяжного пристрою гусеничних стрічок (на рисунку 2.1 не показаний) натягнута стрічка 5, що виконана з фрикційного матеріалу. На задній прямокутній частині рами 1 кожне ведуче колесо 3 (див. рисунок 2.1, а) з'єднано з електродвигуном 6 та редуктором 7, причому електродвигун 6 разом з редуктором 7 спарені через вал 8, який розміщується в радіально-упорних шарикових підшипниках 9, а кожне ведене колесо 4 з'єднане з передньою прямокутною частиною рами 1 валом 10, що розміщується в аналогічних попереднім підшипниках 9. Крім того, в гусеницях переміщення 2 (див. рисунок 2.1, б) встановлені опорні котки 11 та підтримуючі котки 12, які контактують з внутрішньою поверхнею стрічки 5 та розміщуються на нерухомих осях 13, що жорстко з'єднані з прямокутною частиною рами 1, причому опорні котки 11 з'єднані попарно, а кожна окрема пара опорних котків 11 містить амортизатор у вигляді пружини 14. Також на прямокутній частині рами 1 розміщується ємність нульової плавучості 15. На нижній поверхні прямокутної частини рами 1 закріплені сферичні шарніри 16, що утримують головні притискні магніти 17 між лівою і правою гусеницями 2 із забезпеченням відповідного зазору δ щодо ФП 18 судна (див. рисунок 2.1, б).

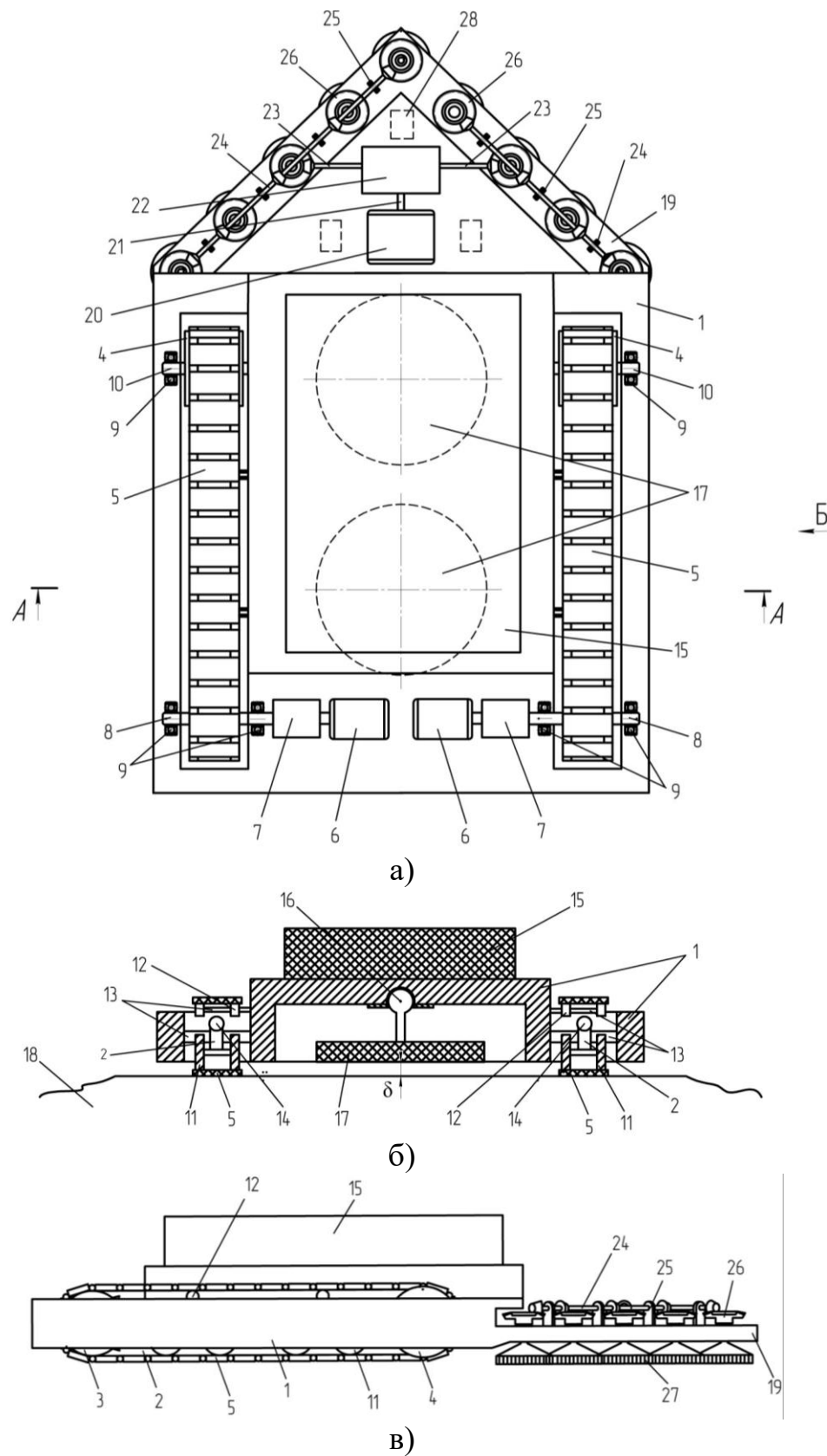


Рисунок 2.1 – Схема МРБП з інструментом для механічного очищення ФП:
 а – вигляд зверху, штриховими лініями позначені елементи, які не видно на даному вигляді; б – вигляд фіксації головного постійного магніту (переріз А-А на вигляді зверху); в – вигляд збоку (вигляд Б)

Друга частина двокомпонентної рами (див. рисунок 2.1, а) має трикутну форму 19 та містить електродвигун 20, що через вал 21, двосторонній редуктор 22 та розподільний вал 23 кінематично з'єднаний з валопроводами конічних зубчатих коліс 24, які розташовуються в радіальних шарикових підшипниках 25 по сторонам трикутної частини рами 19 і мають зубчасту передачу з конічними зубчастими колесами 26, які, в свою чергу, з'єднані зі сталевими фрезами із сталевими зачисними щітками 27 (див. рисунок 2.1, в). Крім того, на нижній поверхні трикутної частини рами 19 рівномірно по всій площині встановлені додаткові постійні магніти 28.

Мобільний робот для механічного очищення корпусу судна працює наступним чином. Спочатку налаштовуються всі фрези із сталевими зачисними щітками 27 по висоті на $1,5 \div 2$ мм від борту судна для збереження цілими (не пошкодження) шарів ґрунтовки та покриття борту. Потім мобільний робот встановлюється на поверхню 18 корпусу судна так, щоб головні притискні магніти 17 через зазор δ зорієнтувалися по ФП для забезпечення необхідного притискного зусилля. Після цього подається живлення на електродвигун 20, що через двосторонній редуктор 22 приводить до руху валопроводи конічних зубчатих коліс 24, які в свою чергу обертають конічні зубчаті колеса 26, а, відповідно, і сталеві фрези зі сталевими щітками 27. При цьому фрези 27 обертаються в різні боки з лівої і правої сторін трикутної частини рами 19, що дозволяє врівноважити крутні (обертові) моменти фрез 27 і усунути перекис мобільного робота під час переміщення та очищення борту судна. Потім подається живлення на електродвигуни 6, які через редуктори 7 починають обертати ведучі колеса 3 разом з секціями гусеничних стрічок 5, що призводить до руху кожної стрічки 5 в одній площині між ведучим 3 і веденим 4 колесами. При цьому прямокутна частина рами внаслідок взаємодії сил притягнення головних притискних магнітів 17 та пружних сил амортизаторів 14 притискається до гусеничних стрічок 5 через опорні котки 11, що забезпечує надійне зчеплення гусениць переміщення 2 з поверхнею 18, що обросла, а для усунення провисання протилежної сторони гусеничної стрічки 5 від тієї, що

рухається по поверхні 18, застосовані підтримуючі котки 12. Таким чином мобільний робот починає переміщуватися по поверхні 18 корпусу судна і механічно очищувати її від водоростей та інших організмів водного середовища існування за допомогою сталевих фрез зі сталевими зачисними щітками 27, причому процес очищення може виконуватися як під водою так і плавучому або сухому доці. Для ефективного проведення підводних очисних робіт вали редукторів 6 і електродвигунів 7 мобільного робота (з метою забезпечення водонепроникності) оснащені композитними феромагнітними і сальниковими ущільненнями (на рисунку 2.1 не показані), а сам мобільний робот споряджений відповідною ємністю нульової плавучості 15.

Мобільний робот переміщується автоматично по поверхні корпусу судна 18 в заданому програмою напрямку зі швидкістю, яка забезпечує виконання заданої технологічної операції (очищення корпусу судна). Швидкість зачистки може контролюватися людиною-оператором або системою керування у відповідності з якістю обробки робочої ФП. Крім того, два спарені двигуни 6 з редукторами 7 працюють автономно незалежно один від одного, що дозволяє мобільному роботу переміщуватися в будь-якому заданому напрямі (змінювати кут повороту робота від 0° до 360°), здійснювати реверсний рух.

Причому при переміщенні мобільного робота по нерівній поверхні 18 закріплені на сферичних шарнірах 16 притискні магніти 17 відхиляються відносно вертикальної осі шарніра 16 в межах зазору δ і тим самими орієнтують вектор утримуючої сили перпендикулярно до поверхні 18 корпусу судна, забезпечуючи рівномірний розподіл максимального притискного зусилля між магнітами 17 та поверхнею 18 корпусу судна по всій площині магнітів 17.

Застосування окремих утримувальних магнітів для створення ПЗ та встановлення сферичних шарнірних з'єднань, що закріплюють ці магніти між гусеницями на нижній поверхні рами МР, дозволяють підвищити надійність зчеплення конструкції з робочою поверхнею шляхом підвищення магнітної утримуючої сили робота. Розрахунок головного вектора ПЗ, яке в цілому діє на полюсну грань постійного магніту та його складових, наведений в роботі [88].

Наявність відповідного зазору між головними постійними магнітами та поверхнею дозволяє підвищити швидкість переміщення та прохідність мобільного робота [30], оскільки забезпечується можливість орієнтування зовнішньої площини головних утримувальних магнітів щодо площини корпусу судна. Запропонований МРБП гусеничного типу більш ефективно використовує ПП та має менше енергоспоживання процесу переміщення через відсутність додаткового опору рухові (під час руху зовнішня поверхня всіх магнітів задіяна в процесі формування ПЗ та немає необхідності у циклічному відриві постійних магнітів від ФП під час руху, на відміну від рішень в роботах [82, 87, 88].

2.1.2. Мобільний робот з магнітокерованими колесами-рушіями.

Розглянемо основні властивості та конструктивну побудову МРБП для переміщення по складних ФП. Головним елементом такого робота є магнітокерований гібридний (колісно-крокуючий) рушій у формі колеса зі змінюваною конфігурацією обводу (рисунок 2.2) [5, 37, 83, 98].

Геометрична вісь кожного колеса-рушія 1 збігається з точкою взаємного перетину бісектрис внутрішніх кутів багатокутника колеса, а конструктивна міцність колеса-рушія забезпечується жорсткими спицями 2, секціями шини 3 і маточиною 4. Стрижні 5 висунуті до оброблюваної ФП 9 через напрямні отвори в секціях шини 3 з втулками 6. Притискні електромагніти 8 закріплені за допомогою шарнірів 7 до вільних кінців стрижнів та забезпечують задане значення ПЗ [83]. МРБП (рисунок 2.2) може бути оснащений різною кількістю таких коліс-рушіїв. Всі колеса-рушії монтуються на транспортній платформі 10. Багатоцільовий робот може бути оснащений наступним технологічним обладнанням: гідроабразивна система очищення 11, зварювальний апарат 12, фарбувальна установка 13 і таке інше [5] (на рисунку 2.2).

Рушійним механізмом виступають опорно-тягові ланки, які здійснюють переміщення МРБП. Кожна така ланка складається з нерухомих елементів, які вмонтовані в маточину 4, та рухомих елементів у вигляді стрижнів 5. При прямолінійному переміщенні всі колеса працюють синхронно в одному

напрямку. У разі виконання поворотів корпусу мобільного робота регулюється швидкість обертання і поступального руху відповідних коліс [17-18].

За великої кількості розсувних спиць та ПЕ конструкція розглянутого МРБП дозволяє здійснювати безперервний рух на ФП при практично будь-яких змінах кута між окремими частинами поверхні та на поверхнях, ускладнених наявністю пошкоджень та нерівностей [68]. Однак таке рішення веде до суттєвого збільшення масогабаритних показників колеса, що вимагає нарощення потужності кожного окремого елемента. В додатку В проаналізовані можливі компонування конструкцій колеса-рушія та застосування МРБП на його основі (таблиця В.1).

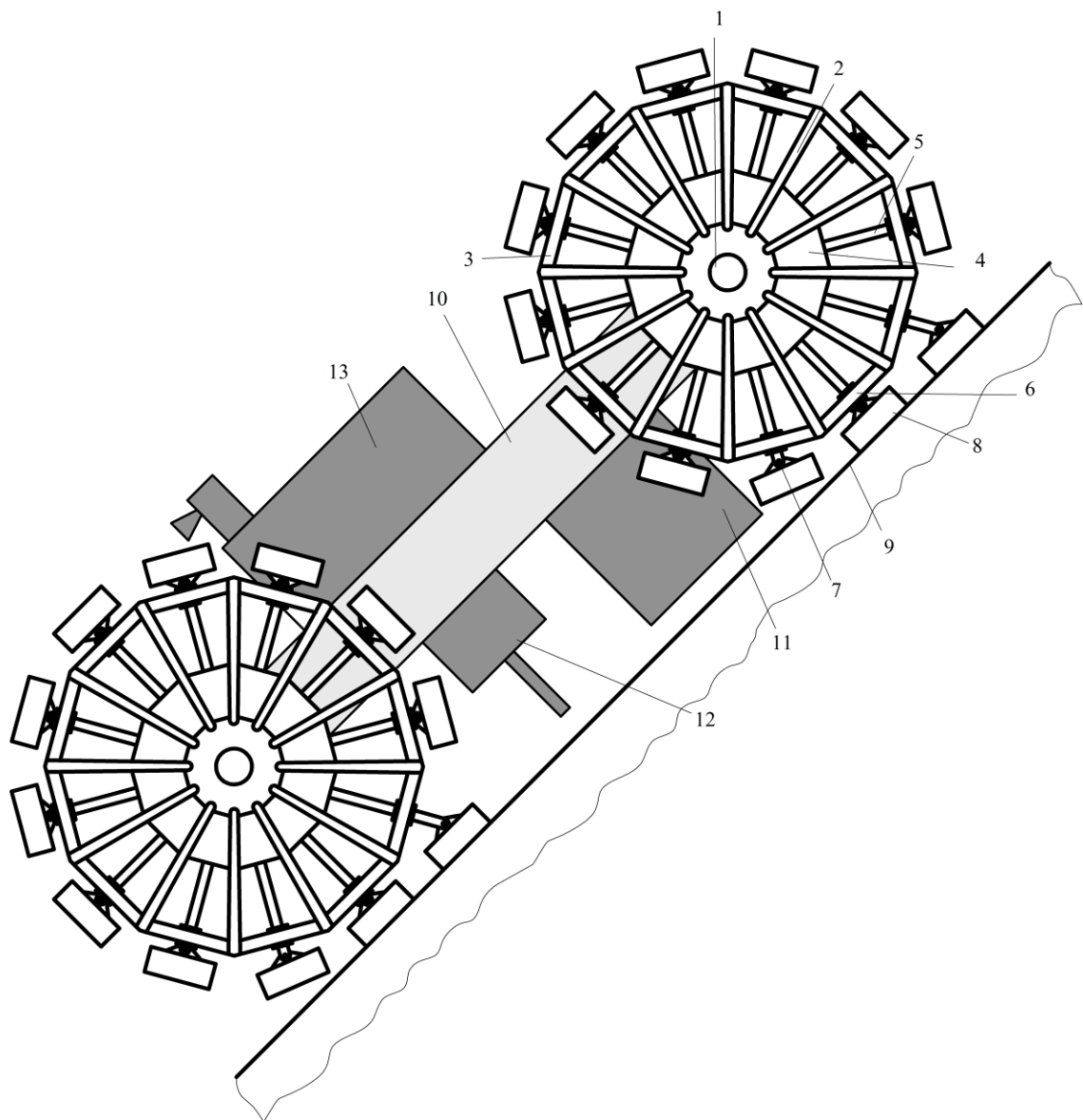


Рисунок 2.2 – Схема МРБП з магнітокерованими колесами-рушіями

Далі доцільно більш детально розглянути описані МРБП як об'єкти керування рухом на похилих ФП. для автоматизації виконуваних ними технологічних операцій.

2.2. Формалізація завдань керування МРБП

Для забезпечення виконання технологічної операції очищення поверхні, наприклад, корпусу судна та подальших за очищенням технологічних операцій на відповідному якісному рівні з одночасним забезпеченням безпеки і надійності переміщення МРБП по ФП необхідно в автоматичному режимі з певною точністю здійснювати контроль та керування основними робочими параметрами робота з технологічним обладнанням, які безпосередньо відповідають за якість та продуктивність виконуваних операцій [3, 5, 39, 99].

Розглядаючи даний робототехнічний комплекс як багатокоординатний об'єкт керування і контролю можна сформулювати наступні головні задачі його контролю та автоматичного керування:

- контроль та автоматичне керування вектором параметрів просторового руху МРБП $\mathbf{Y}_{\text{МР}}$;
- контроль та автоматичне керування значенням притискного зусилля F , створюваного ПЕ МРБП;
- контроль та автоматичне керування вектором параметрів заданих технологічних операцій МРБП $\mathbf{D}_{\text{МР}}$ (очищення, інспекція, зварювання, тощо);
- контроль та автоматичне керування вектором робочих параметрів технічного обладнання рушіїв МРБП $\mathbf{X}_{\text{УМР}}$;
- контроль та автоматичне керування вектором робочих параметрів технічного обладнання ПЕ МРБП $\mathbf{X}_{\text{ФМР}}$.

Функціональна структура МРБП як багатокоординатного об'єкта керування зображена на рисунку 2.3, де позначено: ТО – технічне обладнання робота, що застосовується для виконання заданих технологічних операцій; $\mathbf{U}_{\text{ТО}}$ – вектор сигналів керування ТО; $\mathbf{U}_{\text{Р}}$ – вектор сигналів керування рушіїв; $\mathbf{U}_{\text{ПЕ}}$ – вектор сигналів керування ПЕ МРБП; $\mathbf{Z}_{\text{Р}}$, $\mathbf{Z}_{\text{ПЕ}}$, $\mathbf{Z}_{\text{ТО}}$, $\mathbf{Z}_{\text{МР}}$ – вектори збурювальних впливів, що діють на рушії, ПЕ, ТО та корпус робота відповідно.

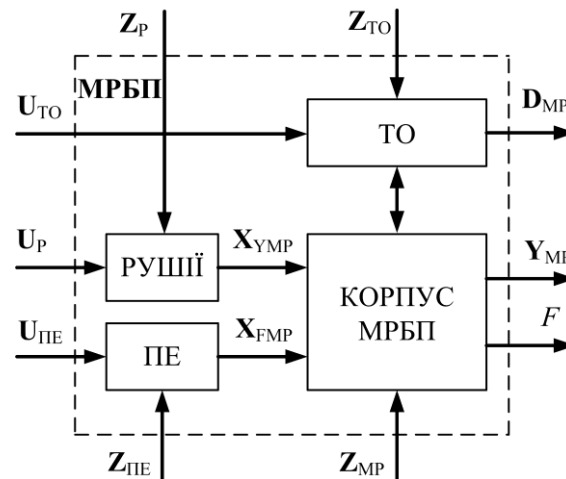


Рисунок 2.3 – Функціональна структура мобільного робота як багатокординатного об'єкта керування

Таким чином, мобільний робот для вертикального переміщення по похилих ФП являє собою складний багатокординатний об'єкт керування, для ефективного функціонування якого необхідно мати розвинену багатокординатну систему контролю та автоматичного керування. Тому, як видно з функціональної структури МРБП, наведеної на рисунку 2.3, МРБП має містити багатокординатні системи контролю та автоматичного керування рушіями, ПЕ та ТО [4]. Ефективність цих систем зростає при застосуванні інтелектуальних технологій на етапі розробки їх функціональних структур, алгоритмів керування та керуючих пристроїв.

Розглянемо далі математичний опис компонентів МРБП, оснащених гібридними колесами-рушіями, конструкція яких наведена в розд. 2.1.2.

2.3. Синтез математичних моделей компонентів мобільних роботів на основі магнітокерованих коліс-рушіїв

Колесо-рушій. Розглянемо більш детально один крок руху магнітокерованого колеса-рушія вздовж вісі X (рисунок 2.4), де позначено: α – кут між рухомими елементами сусідніх розсувних спиць; φ – кут повороту геометричної осі колеса відносно точки O_1 ; AB – задня розсувна спиця; BO_1 – проміжна розсувна спиця; BO_2 – передня розсувна спиця; AO_1 – проекція AB на вісь AX (робоча поверхня); O_1O_2 – проекція BO_2 на вісь AX ; A , O_1 , O_2 – точки закріплення заднього, проміжного та переднього притискних магнітів на

першому кроці; J – точка закріплення переднього притискного магніту перед початком наступного кроку; O_1E – висота в прямокутному ΔBO_1A ; FO_1 – висота в ΔAO_1C ; O_1G – висота в прямокутному ΔBO_1O_2 ; O_1H – висота в ΔCO_1O_2 ; BO_1 – висота, медіана і бісектриса в рівнобедреному ΔABO_2 ; DO_2 – висота, медіана і бісектриса в рівнобедреному ΔO_1DJ ; CO_1 – медіана в ΔACO_2 .

В початковий момент часу мобільний робот на базі гібридних коліс-рушіїв встановлюється на робочу ФП заднім (в точці A), проміжним (в точці O_1) та переднім (в точці O_2) ПЕ, таке положення умовно представлено трикутником ΔABO_2 . Після закінчення виконання першого кроку, робочі ПЕ чергуються (задній виключається з роботи, проміжний стає заднім в точці O_2 , а передній стає до роботи в точці J), колесо займає нове просторове положення, умовно позначене ΔO_1DJ . При цьому під «кроком» розуміється таке переміщення кола-рушії вздовж вісі X , при якому кожний робочий суміжний ПЕ, а відповідно і кожна розсувна спиця, встигають один раз змістити відлік своїх номерів (почергуватися). Для формулювання математичного опису процесу переміщення розглянемо детально деяке умовне проміжне просторове положення колеса під час виконання кроку, позначене ΔACO_2 (рисунок 2.4).

Таким чином, враховуючи рисунок 2.4, перед розробкою математичної моделі колеса вважаємо, що:

- ΔABO_2 відповідає початковому положенню рухомих елементів розсувних спиць (рухомих стрижнів) AB , BO_1 , BO_2 перед виконанням першого кроку;
- ΔO_1DJ відповідає положенню рухомих елементів розсувних спиць (рухомих стрижнів) AB , BO_1 , BO_2 перед виконанням другого кроку;
- положення точок B , D відповідають положенням геометричної осі колеса перед виконанням першого та другого кроків відповідно;
- положення точки C умовно відповідає положенню геометричної осі колеса під час виконання першого кроку;
- поворот геометричної вісі колеса упродовж всього першого кроку здійснюється відносно точки O_1 (на кут φ), причому $0 \leq \varphi < \pi/2$, що обмежується конструктивними параметрами колеса-рушії;

- центральний момент інерції колеса-рушія не змінюється впродовж руху;
- при русі проміжний подовжній тяговий привід не створює сил опору;
- при переміщенні по робочій ФП ПЕ не проковзують.

Процес переміщення геометричної осі центру рушія з положення B в положення D складається з сукупності елементарних переміщень dx осі колеса вздовж напрямленої вісі X , що відповідає відрізку BD (O_1O_2) на рисунку 2.4 при повороті центра колеса на кут $d\varphi$:

$$dx = R'd\varphi, \quad (2.1)$$

де R' – радіус повороту відносно точки миттєвого центра обертання колеса O_1 , який визначається з прямокутного ΔO_1BC (рисунок 2.4) як відрізок BO_1 :

$$R' = \frac{R}{\cos \varphi}, \quad (2.2)$$

де R – довжина проміжної розсувної спиці (відрізок BO_1 на рисунку 2.4).

Підставляючи рівняння (2.2) в (2.1), отримається вираз

$$dx = \frac{Rd\varphi}{\cos \varphi}. \quad (2.3)$$

Інтегруючи вираз (2.3), формується залежність поточної подовжньої координати x (поточне положення на вісі X) від кута повороту φ центра колеса (точки B, C, D) відносно точки миттєвого центра обертання колеса O_1 впродовж першого кроку переміщення [33, 100]:

$$x = R \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right| + x_0, \quad (2.4)$$

де x_0 – початкове положення робота на вісі X .

Трасекторія переміщення колеса-рушія вздовж вісі X для різних значень довжини розсувної спиці R при зміні кута повороту φ від 0 до $\pi/3$ зображена на

рисунку 2.5. При виконання колеса з кутами між суміжними радіальними спицями $\alpha = \pi/4$ кут повороту в межах 1 кроку буде обмежений значенням $\pi/4$.

На рисунку 2.6 зображена схема сил, що діють на колесо при русі вздовж похилої площини, де позначено: F_3 – штовхальна сила задньої спиці; F_{Π} – тягова сила передньої спиці; $F_{\Pi\Pi}$ – сила пружності стискальної пружини на рухомому елементі передньої розсувної спиці; $F_{\text{ТЯЖ}}$ – сила тяжіння; $F_{\text{ПОВ}}$ – сила опору повітря; $F_{\text{ПЗ}}$ – сила пружності стискальної пружини у вертальному вузлі задньої розсувної спиці колеса-рушія.

Нижче складено модель динаміки колеса-рушія у загальному вигляді.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_T - F_O \\ J\ddot{\phi} = M_T - M_O \end{cases}, \quad (2.5)$$

де m – маса колеса; F_T – рівнодійна рушійних сил тяги тягового приводу колеса-рушія; F_O – рівнодійна сил опору руху колеса; M_T – крутний момент сил тяги електромагнітів; M_O – крутний момент сил опору руху колеса; J – момент інерції колеса; крім того, $\ddot{x} = \ddot{\phi}R$.

З рисунку 2.6 рівнодійні рушійних сил тяги спиць F_T колеса-рушія та рівнодійна сил опору можуть бути визначені як

$$\begin{aligned} F_T &= F_3 + F_{\Pi} + F_{\Pi\Pi}, \\ F_O &= F_{\text{ТЯЖ}} + F_{\text{ПОВ}} + F_{\text{ПЗ}}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

В загальному випадку крутний момент сил тяги електромагнітів може бути визначений з рівняння (2.7).

$$M_T = F_T r, \quad (2.7)$$

де r – плече прикладення сили.

Підставивши рівняння (2.6) в (2.7), отримається

$$M_T = F_3 r_3 + (F_{\Pi} + F_{\Pi\Pi}) r_{\Pi}, \quad (2.8)$$

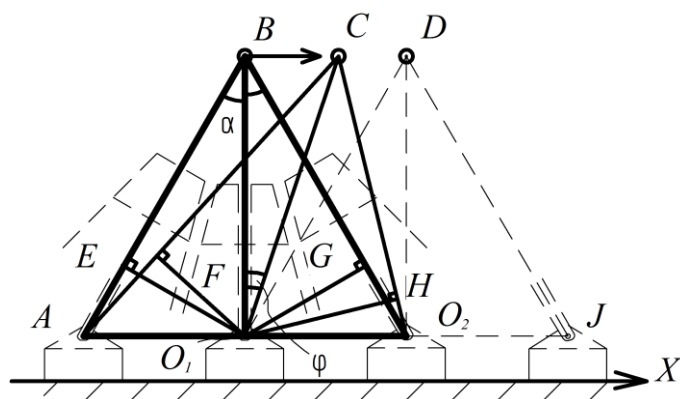


Рисунок 2.4 – Схема переміщення геометричної осі колеса-рушія вздовж поверхні з точки B в точку D

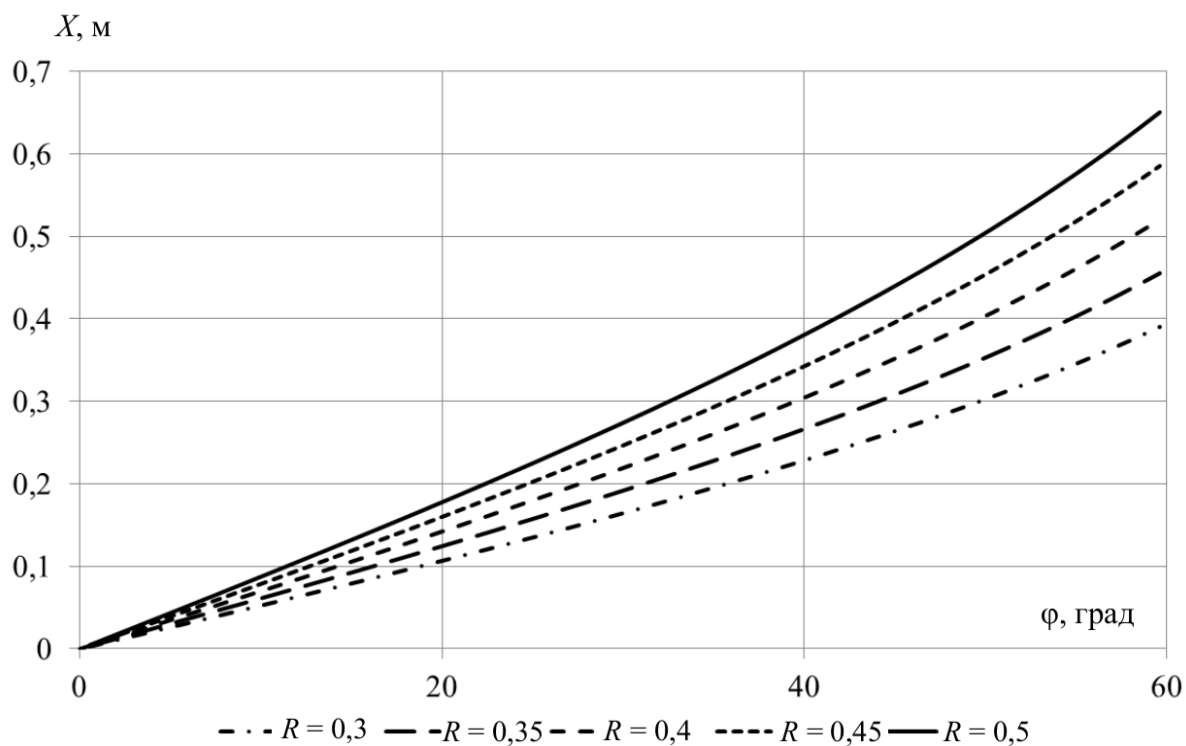


Рисунок 2.5 – Залежність переміщення центра колеса-рушія від кута повороту

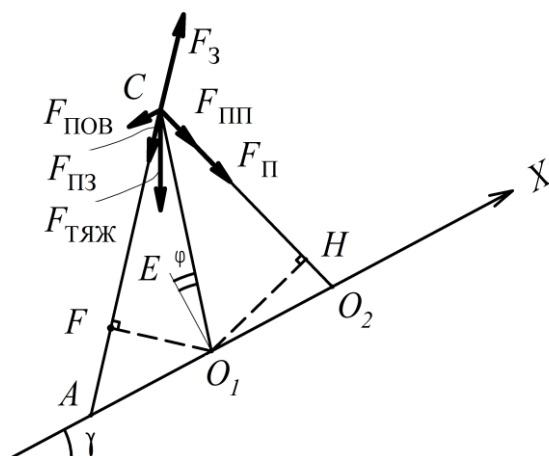


Рисунок 2.6 – Схема сил, діючих на рушій при русі вздовж похилої площини

де r_3 – плече прикладення штовхальної сили задньої спиці відносно точки O_1 (перпендикуляр O_1F на рисунку 2.6); r_{Π} – плече прикладення тягової сили передньої спиці та сили пружності стискальної пружини у вертальному вузлі передньої спиці відносно точки O_1 (перпендикуляр O_1H на рисунку 2.6).

Аналогічно записується рівняння моменту опору руху колеса

$$M_O = F_{\text{ТЯЖ}} r_{\text{ТЯЖ}} + F_{\text{ПОВ}} R + F_{\text{ПЗ}} r_3, \quad (2.9)$$

де $r_{\text{ТЯЖ}}$ – плече дії сили тяжіння (визначається з урахуванням нахилу ФП).

Підставивши рівняння (2.8), (2.9) в друге рівняння системи (2.5)

$$J\ddot{\varphi} = F_3 r_3 + (F_{\Pi} + F_{\text{ПЗ}}) r_{\Pi} - (F_{\text{ТЯЖ}} r_{\text{ТЯЖ}} + F_{\text{ПОВ}} R + F_{\text{ПЗ}} r_3 + m\ddot{x}). \quad (2.10)$$

Далі потрібно визначити невідомі складові рівняння (2.10), а саме: F_3 , F_{Π} , $F_{\text{ПЗ}}$, $F_{\text{ТЯЖ}}$, $F_{\text{ПОВ}}$, $F_{\text{ПЗ}}$, r_3 , r_{Π} , $r_{\text{ТЯЖ}}$ та J . З ΔACO_1 (рисунок 2.6) отримається

$$r_3 = O_1F = \frac{2}{AC} S_{ACO_1}, \quad (2.11)$$

де S_{ACO_1} – площа трикутника ΔACO_1 . За теоремою косинусів

$$AC = \sqrt{AO_1^2 + O_1C^2 - 2AO_1 \cdot O_1C \cos \angle AO_1C}, \quad (2.12)$$

де кут $AO_1C = \varphi + \pi/2$.

Відрізок AO_1 визначається як

$$AO_1 = BO_1 \operatorname{tg} \alpha = R \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.13)$$

Площа ΔACO_1

$$S_{ACO_1} = \frac{1}{2} AO_1 \cdot O_1C \sin(\pi/2 + \varphi) = \frac{1}{2} AO_1 \cdot O_1C \cos \varphi. \quad (2.14)$$

Підставивши рівняння (2.2), (2.12)-(2.14) в (2.11), отримається залежність

$$r_3 = \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha + 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}}. \quad (2.15)$$

Далі аналогічно з геометричної побудови знаходяться

$$O_2 C = \sqrt{O_1 C^2 + O_1 O_2^2 - 2 O_1 C \cdot O_1 O_2 \cos \angle C O_1 O_2}, \quad (2.16)$$

$$r_{\Pi} = \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha - 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}}, \quad (2.17)$$

де кут $\angle C O_1 O_2 = \pi/2 - \varphi$.

З рисунку 2.6 $r_{\text{ТЯЖ}}$ визначається як

$$r_{\text{ТЯЖ}} = R \sin \gamma, \quad (2.18)$$

де γ – кут нахилу похилої площини. Сила тяжіння визначається як $F_{\text{ТЯЖ}} = mg$, де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Момент інерції колеса J відносно точки обертання O_1 може бути знайдений за теоремою Штейнера

$$J = J_B + mR^2, \quad (2.19)$$

де J_B – центральний момент інерції колеса-рушія відносно геометричної вісі, що умовно проходить через точку B на рисунку 2.6.

Враховуючи рисунок 2.4, сили пружності стискальних пружин на рухомих елементах передньої та задньої спиць записуються за законом Гука

$$F_{\text{ПІ}} = k_{\text{ПІ}}(O_2 C - O_1 B). \quad (2.20)$$

$$F_{\text{ПЗ}} = k_{\text{ПЗ}}(AC - BO_1). \quad (2.21)$$

де $k_{\text{ПІ}}$ – коефіцієнт жорсткості пружини.

Сила опору повітря при переміщенні

$$F_{\text{ПОВ}} = k_{\text{ПОВ}} V^2, \quad (2.22)$$

де $k_{\text{ПОВ}}$ – коефіцієнт опору повітря, V – лінійна швидкість руху центру колеса (точки B на рисунку 2.4) вздовж вісі X .

При підстановці рівнянь (2.15) – (2.22) в (2.10), отримується залежність

$$\begin{aligned} (J_B + mR^2)\ddot{\phi} = F_3 \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha + 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}} + (F_{\Pi} + k_{\text{ПР}}(O_2 C - O_1 B)) \cdot \\ \cdot \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha - 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}} - (mgR \sin \gamma + k_{\text{ПОВ}} V^2 R + k_{\text{ПР}}(AC - BO_1)) \cdot \\ \cdot \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha + 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}} + m\ddot{x}R) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Враховуючи (2.2) та залежність $\ddot{x} = \ddot{\phi}R$,

$$\ddot{\phi} = \frac{\ddot{x}}{R'} = \frac{\ddot{x} \cos \varphi}{R}. \quad (2.24)$$

З рівняння (2.3) отримується

$$V = \dot{x} = \frac{R\dot{\phi}}{\cos \varphi}. \quad (2.25)$$

Підставивши (2.12), (2.19), (2.24), (2.25) в (2.23), після спрощень отримається вираз математичної моделі динаміки колеса-рушія [34]

$$\ddot{x} = \left(F_3 \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{A_K} + (F_{\Pi} + k_{\text{ПР}} \times (RB_K - \right. \\ \left. - R)) \cdot \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{B_K} - (mgR \sin \gamma + \right. \\ \left. + k_{\text{ПОВ}} \dot{x}^2 R + k_{\text{ПР}} \times (RA_K - R) \frac{R \operatorname{tg} \alpha}{A_K} \right) \frac{R}{(J_B + mR^2) \cos \varphi}, \quad (2.26)$$

де коефіцієнти A_K та B_K визначаються як

$$A_K = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha + 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}; \quad (2.27)$$

$$B_K = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \operatorname{tg}^2 \alpha - 2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}. \quad (2.28)$$

Схема моделювання переміщення магнітокерованого колеса-рушія відповідно до виразу (2.26) наведена на рисунку 2.7, де БР_А та БР_В – блоки розрахунку коефіцієнтів A_K та B_K відповідно, блоки, в яких фізична величина містить верхній індекс «2» позначають піднесення цієї величини до квадрату (R^2 , v^2). Результати комп'ютерного моделювання одного кроку колеса представлені на рисунку 2.8. Перехідний процес отриманий для довжини спиці 0,3 м, кута між сусідніми розсувними спицями 30° , маси колеса-рушія 50 кг.

Невід'ємною складовою колеса-рушія є притискний електромагніт. Тому далі доцільно розглянути математичну модель електромагніту.

Притискний електромагніт. Для переміщення по вертикальних ФП МРБП оснащується електромагнітними ПП, які здатні утримувати його на металевій поверхні з деяким коефіцієнтом запасу. Змінюючи напругу, що подається на електромагніти, можна керувати силою притиску робота і цим створювати різну силу тертя в залежності від кута нахилу робочої ФП та поточної виконуваної роботою технологічної операції.

На відміну від існуючих конструкцій електричних апаратів (в яких використовуються електромагніти для приведення в дію виконавчого органу), де якір є рухомим магнітопроводом [101], який фіксується з ярмом та котушкою допоміжними пружинами і вузлами, для вирішення задачі утримання робота якорем є ФП, а рухається ярмо з котушкою, притискаючи робота до ФП.

Показовою для ПЕ МРБП є його статична тягова характеристика [101]. Відомо, що магнітний потік, замикаючись за якорем електромагніту, створює тягове зусилля, яке залежить від магніторушійної сили (МРС) котушки, конфігурації електромагніту, взаємного розташування якоря і ярма.

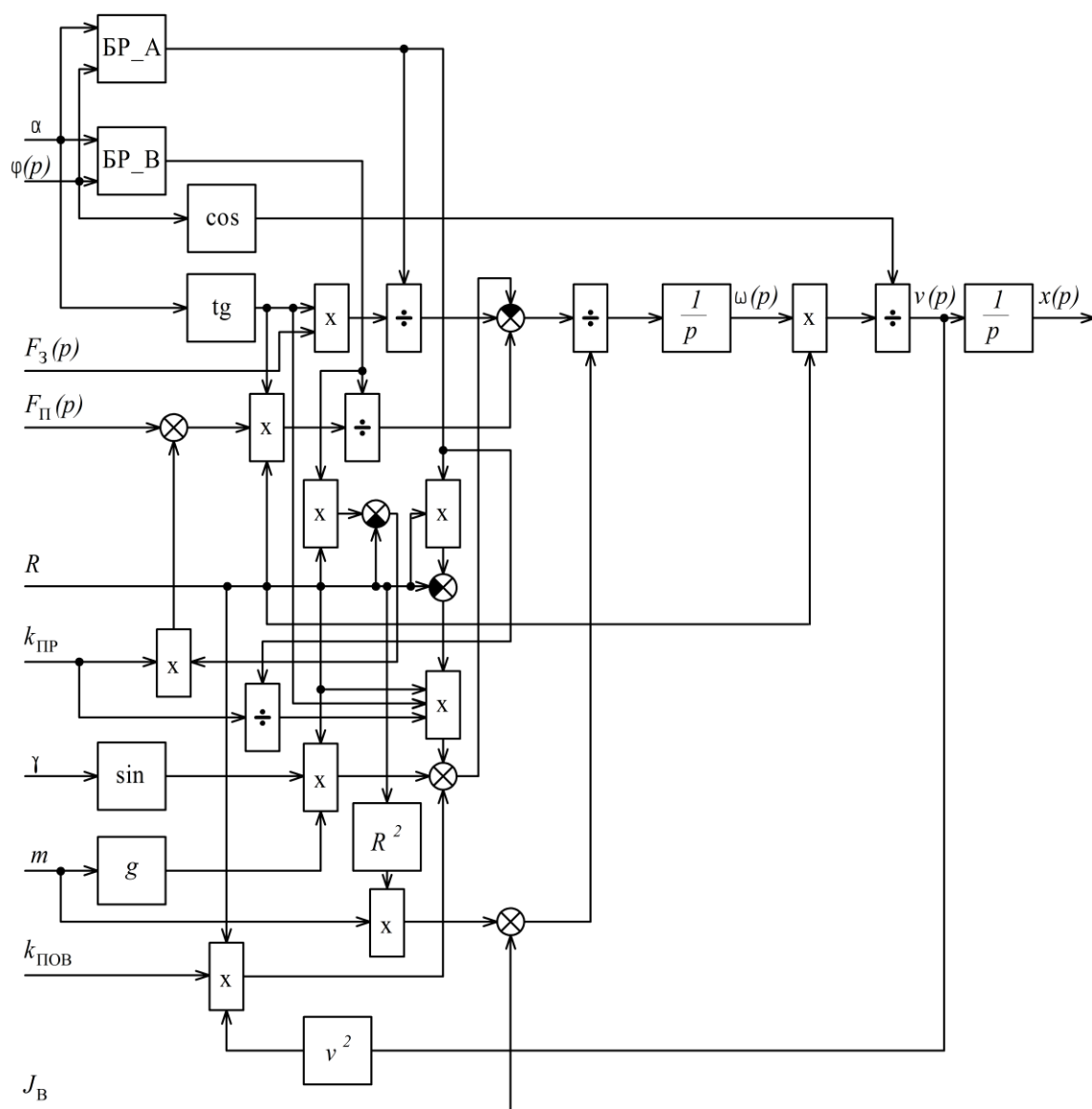


Рисунок 2.7 – Імітаційна модель магнітокерованого колеса-рушія

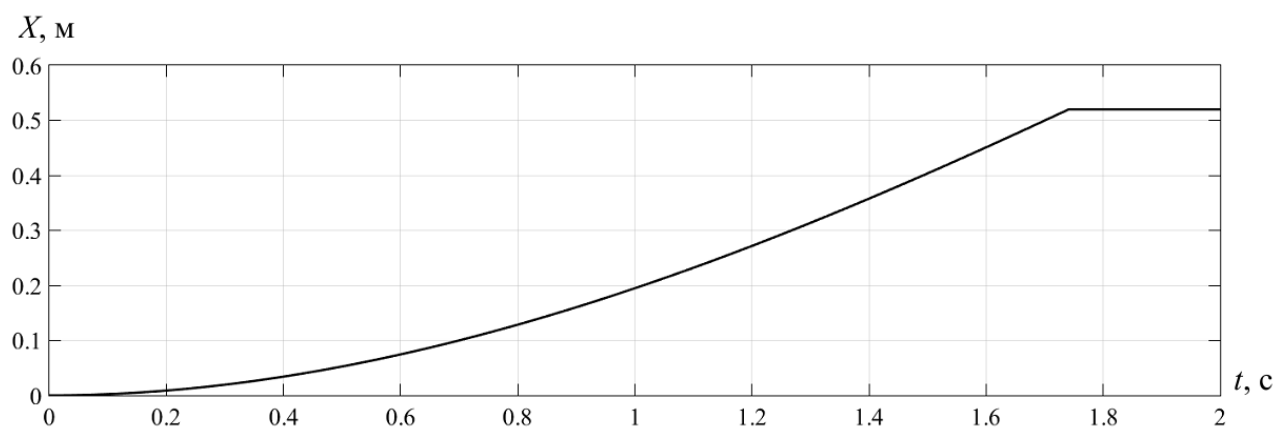


Рисунок 2.8 – Моделювання динаміки одного кроку колеса-рушія

Статична тягова характеристика електромагніту знімається при нерухомому якорі і являє собою залежність $F = f(Iw)$ при $\delta = \text{const}$, а також $F = f_1(\delta)$ при $Iw = \text{const}$, де F – електромагнітна тягова сила, що діє на якір, Н; δ – робочий повітряний зазор між якорем і осердям, м; Iw – МРС котушки, А [101].

Тягове зусилля ПЕ можна визначити за формулою Максвелла (2.29) або з енергетичного балансу електромагніту при елементарному переміщенні якоря. Якщо вектор магнітної індукції перпендикулярний до поверхні якоря (поверхні інтегрування), то тягове зусилля, що діє на якір електромагніту:

$$\bar{F} = \frac{1}{2\mu_0} \oint B^2 \bar{n} dS, \quad (2.29)$$

де B – вектор індукції на зовнішній стороні елемента поверхні dS , Тл; $\bar{n}$ – одинична зовнішня нормаль елемента поверхні dS . За цією формулою визначають електромагнітну силу, діючу на якір, якщо відомо розподіл індукції по поверхні якоря і магнітна проникність якоря багато більше μ_0 . При цьому поверхня інтегрування повинна збігатися з поверхнею якоря.

Якщо не можна зробити припущення про рівномірний розподіл магнітного потоку або невідомий закон його розподілу по поверхні якоря, електромагнітну силу можна отримати з енергетичного балансу, складеного для елементарного переміщення якоря [101]. Величина і баланс електромагнітної енергії в електромагніті з нерухомим якорем визначається при включенні його котушки на постійну напругу. Прикладена до котушки напруга $u_{\text{ПЕ}}$ в перехідному процесі врівноважується омичним падінням напруги в обмотці $i_{\text{ПЕ}} R_{\text{ПЕ}}$ і її ЕРС самоіндукції $e_{\text{ПЕ}}$:

$$u_{\text{ПЕ}} = i_{\text{ПЕ}} R_{\text{ПЕ}} + e_{\text{ПЕ}}. \quad (2.30)$$

ЕРС самоіндукції дорівнює швидкості зміни повного потокозчеплення Ψ :

$$e = d\Psi/dt = L_{\text{ПЕ}} (di_{\text{ПЕ}}/dt). \quad (2.31)$$

Залежність індукції котушки від струму для моделі ПЕ:

$$B = \frac{\mu_B \mu_0 N_K I}{l_K} = k_B I, \quad (2.32)$$

де μ_B – відносна магнітна проникність речовини; N_K – кількість витків; l_K – довжина котушки; I – діюче значення струму; k_B – коефіцієнт підсилення.

Для практичних розрахунків сили, з якою електромагніт притягує феромагнітні матеріали, в промисловості використовують емпіричну формулу, яка враховує магнітний потік Φ або індукцію B і площу перетину електромагніту S_E [102, 103]. Так, сила тяги ПЕ F визначається за виразом:

$$F = 397795,5 B^2 S_E = k_F B^2, \quad (2.33)$$

де k_F – коефіцієнти підсилення.

Тому, з урахуванням (2.30-2.33) може бути сформована структурна динамічна модель ПЕ, представлена на рисунку 2.9, де позначено: $W_{PE}(p)$ – передаточна функція електричної частини ПЕ

$$W_{PE}(p) = \frac{i_{PE}(p)}{u_{PE}(p)} = \frac{1/R_{PE}}{1 + pL_{PE}/R_{PE}} = \frac{k_{PE}}{T_{PE}p + 1}, \quad (2.34)$$

де k_{PE} , T_{PE} – коефіцієнт підсилення та електромагнітна стала часу ПЕ; p – оператор Лапласа, а величини $u_{PE}(p)$, $i_{PE}(p)$, $B(p)$, $F(p)$ – зображення по Лапласу змінних u_{PE} , i_{PE} , B , F відповідно.

Необхідно відзначити, що при переміщенні колеса-рушія похилими поверхнями ПП мають надійно утримувати всю конструкцію, не проковзувати під дією сили тяжіння або навантаження, створюваного ТО. Тому доцільно розглянути модель визначення необхідного ПЗ для колеса-рушія.

Першочерговим завданням для визначення необхідного ПЗ є визначення кута нахилу поверхні, щодо вектора сили тяжіння. На рисунку 2.10 розглянуті випадки положення ПЕ робота в нерухомому стані на похилій ФП, де позначено: $m_{PE}g$ – сила тяжіння, що діє на ПЕ; N_{PE} – сила реакції опори, що діє

на ПЕ; $F_{\text{тпе}}$ – сила тертя, що діє на ПЕ, $F_{\text{тпе}} = \mu_{\text{пе}} N_{\text{пе}}$; γ – кут нахилу поверхні, $\mu_{\text{пе}}$ – коефіцієнт тертя спокою ПЕ з ФП. В першому випадку $\gamma = 0$ (рисунок 2.10, а), ПЕ знаходиться в стані рівноваги, $F = 0$, або у випадку виконання технологічної операції F має відповідати значенню збурювальної сили $F_{\text{то}}$, створюваною цією операцією. Для випадків б (магніт на поверхні) та в (магніт під поверхнею) на рисунку 2.10 ($0 < \gamma \leq \pi$) складемо рівняння рівноваги та виразимо залежність мінімального ПЗ F , яке по суті, компенсує нестачу складової сили тяжіння, спрямованої нормально до ФП, і яка безпосередньо забезпечує необхідну силу тертя з поверхнею. Для випадків, показаних на рисунку 2.10, б та в можна записати системи рівнянь відповідно:

$$\begin{cases} m_{\text{пе}} g \sin \gamma - F_{\text{тпе}} = 0 \\ N_{\text{пе}} - F - m_{\text{пе}} g \cos \gamma = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} m_{\text{пе}} g \sin(\pi - \gamma) - F_{\text{тпе}} = 0 \\ N_{\text{пе}} - F + m_{\text{пе}} g \cos(\pi - \gamma) = 0 \end{cases}.$$

Вирішуючи кожну систему відносно F , отримається єдиний вираз:

$$F = m_{\text{пе}} g \left(\frac{\sin \gamma}{\mu_{\text{пе}}} - \cos \gamma \right). \quad (2.35)$$

Аналізуючи вираз (2.35), можна відзначити залежність сили F не тільки від кута нахилу поверхні, а і від коефіцієнта тертя $\mu_{\text{пе}}$. Найбільший кут, на якому може утримуватися ПЕ без подачі живлення на обмотку електромагніту, визначається за умови $F = 0$ як $\gamma_{\text{max}} = \arctg \mu_{\text{пе}}$. Для кутів нахилу поверхні $\gamma_{\text{max}} \leq \gamma \leq \pi$ значення F мають відповідати отриманій залежності. На рисунку 2.11 представлені графіки $F(\gamma)$ у відносних одиницях ($F_{\text{пев}}(\gamma) = F(\gamma)/m_{\text{пе}}g$) для можливих значень коефіцієнта тертя підосви магніту з поверхнею $\mu_{\text{пе}}$ без та при використанні фрикційних матеріалів для збільшення створюваної сили тертя: $\mu_{\text{пе}} = 0,15$ (метал-метал), $\mu_{\text{пе}} = 0,4$ (шкіра-метал), $\mu_{\text{пе}} = 0,8$ (резина-метал) [104]. Отримані на рисунку 2.11 графіки свідчать про нелінійний характер зміни мінімального значення F від кута нахилу поверхні та наявність двох характерних ділянок на кожному з графіків.

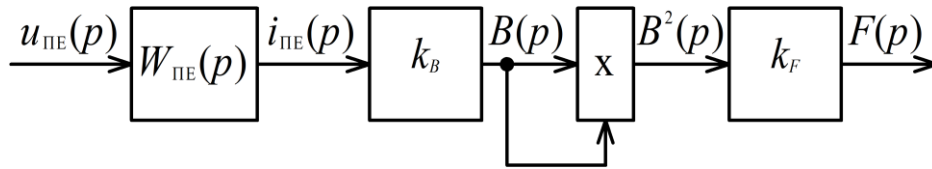
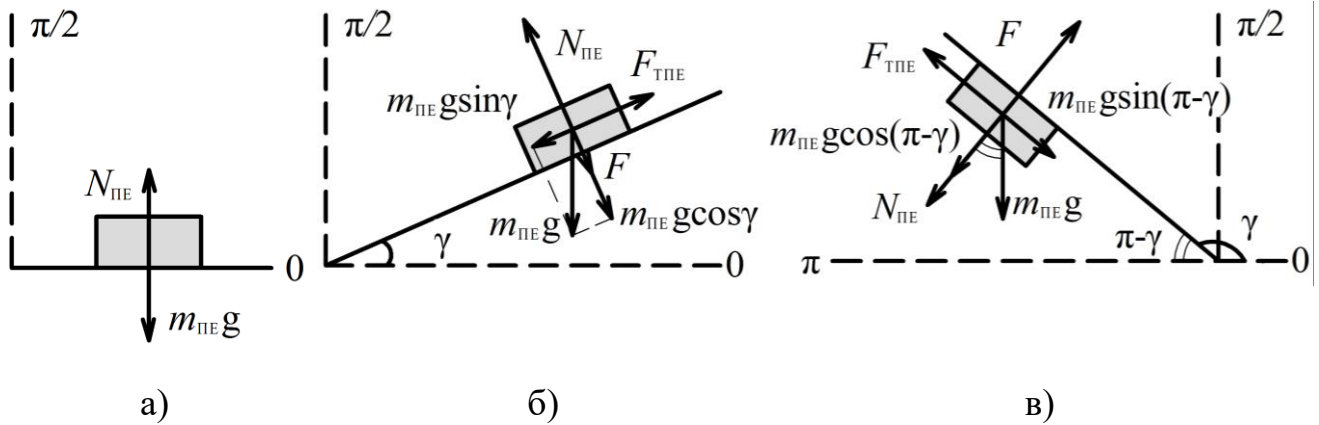
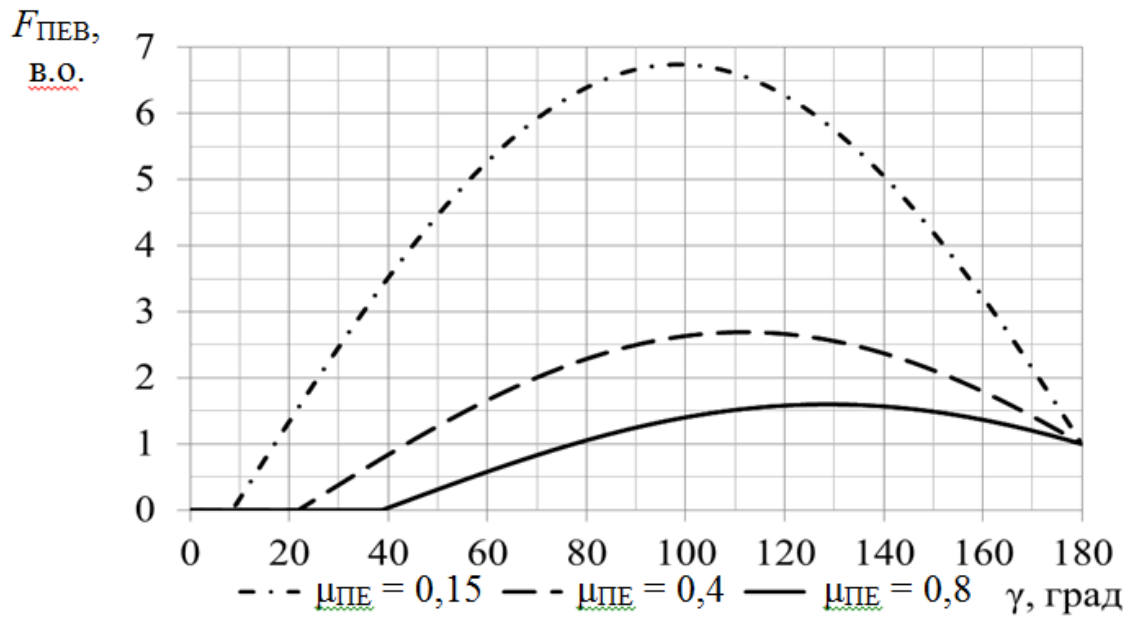


Рисунок 2.9 – Структурна модель притискного електромагніту

Рисунок 2.10 – Схеми розташування притискного електромагніту:
на поверхні при $\gamma = 0$ (а), на поверхні (б) та під поверхнею (в) при $\gamma \neq 0$ Рисунок 2.11 – Графіки залежності відносного притискного зусилля $F_{пэв}$ від
кута нахилу поверхні для різних коефіцієнтів тертя

Перша ділянка кожного з графіків ($F_{\text{ПЕВ}} = 0$) показує діапазон γ , в якому вистачає даного коефіцієнту тертя $\mu_{\text{ПЕ}}$ для утримання ПЕ на поверхні (ПЗ за умови рівноваги сил, показаних на рисунку 2.10, створювати не потрібно). Друга ділянка вказує на характер зміни ПЗ ($F_{\text{ПЕВ}} \neq 0$). При відсутності фрикційного матеріалу між підошвою та поверхнею ($\mu_{\text{ПЕ}} = 0,15$) максимальний кут, на якому можливе утримання без притиску, $\gamma_{\text{max}} = 8^\circ$; при застосуванні шкіри в якості фрикційного матеріалу ($\mu_{\text{ПЕ}} = 0,4$) $\gamma_{\text{max}} = 21,8^\circ$; при використанні гуми ($\mu_{\text{ПЕ}} = 0,8$) $\gamma_{\text{max}} = 38,4^\circ$.

При цьому максимальні значення ПЗ та кута нахилу, при якому це зусилля необхідно забезпечити, за (2.34) також суттєво залежать від $\mu_{\text{ПЕ}}$: $F = 6,74m_{\text{ПЕ}}g$ при $\gamma = 98,5^\circ$ в першому випадку; $F = 2,7m_{\text{ПЕ}}g$ при $\gamma = 111,7^\circ$ в другому випадку; $F = 1,6m_{\text{ПЕ}}g$ при $\gamma = 128,9^\circ$ в третьому випадку. Необхідно також зазначити, що у випадку дії збурювальної сили від виконуваної технологічної операції $F_{\text{ТО}}$, рекомендоване значення ПЗ $F_{\text{Р}}$ має бути більше за розрахункове F , принаймні, на цю величину: $F_{\text{Р}} = F + F_{\text{ТО}}/\mu_{\text{ПЕ}}$.

Тяговий привід. В рівнянні моделі колеса-рушія (2.26) входять тягові та штовхальні зусилля, створювані передньою та задньою (по відношенню до напрямку руху) розсувною спицею відповідно. В роботі [83] автори пропонують в якості подовжніх тягових приводів використовувати типові соленоїдні електромагніти. Однак, істотним недоліком цього рішення є невисокий хід сердечника і слабка сила. Одні з кращих знайдених промислових зразків мають невисокі технічні характеристики (хід стержня та тягове зусилля): 50 мм при 155 Н або 40 мм при 160 Н – для притискних (працюють тільки в одному напрямі), 20 мм при 100 Н – для реверсивних, 36 мм при 1,1 Н – для поляризованих довгоходових [105]. Соленоїдні електромагніти найчастіше застосовують в системах промислової автоматики, де не потрібні великі переміщення і зусилля, тому такий варіант, теоретично, може підійти для реалізації моделі, але не повноцінного прототипу.

Більш ефективним рішеннями проблеми забезпечення високих значень тягового зусилля та лінійного переміщення є використання зубчатої передачі

«шестерня-рейка» [106]. В такому випадку електричний двигун обертає шестерню, яка пересуває зубчасту рейку, переводячи обертальний рух в поступальний. Цей спосіб реалізації зворотно-поступального руху має хороший плюс – можливість забезпечення високих навантажень (тягових зусиль). Однак є й істотний недолік – габарити і сумарна вага рушія.

Синхронний лінійний двигун здатен забезпечувати достатні для переміщення описаного вище колеса-рушія значення тягового зусилля та довжину ходової частини [107], які будуть достатні для роботи колеса. Однак, стримуючим фактором широкого впровадження подібних систем є їх вартість.

Найбільш доцільним з огляду на складність конструювання, керування та вартість тягового привода колеса-рушія виглядає застосування шарикової гвинтової передачі [108], яка має прийнятні габарити при високій носівній здатності за рахунок редукції швидкості класичного привідного електродвигуна в гвинтовій передачі. Такий спосіб реалізації лінійного переміщення забезпечує високі значення коефіцієнта корисної дії та точності позиціонування, при цьому на попередньому етапі розробки колеса-рушія достатньо використовувати класичні підходи до керування цим двигуном з реалізацією системи зі зворотним зв'язком за швидкістю або положенням [109].

Математична модель механізму перетворення обертального руху валу привідного електродвигуна (шестерні) у поступальний рух рейки (розсувної спиці) в спрощеному вигляді може бути виражена як

$$dl_c = \frac{h_{TB}}{2\pi} d\rho_\Gamma, \quad (2.36)$$

де dl_c – елементарне лінійне переміщення розсувної спиці, яке відповідає елементарному куту повороту $d\rho_\Gamma$ гвинта; h_{TB} – крок різьби гвинта.

Інтегруючи (2.36), отримається вираз (2.37), що пов'язує лінійне переміщення гвинта з його кутом обертання

$$l_c = \frac{h_{TB}}{2\pi} \rho_\Gamma + l_{c0}, \quad (2.37)$$

де l_{c0} – початкове положення гвинта (розсувної спиці).

Розглянемо далі математичні моделі окремих компонентів гусеничного МРБП, конструкція якого наведена в розд. 2.1.1.

2.4. Математична модель рушійного комплексу гусеничного мобільного робота багатоцільового призначення

Привідні електродвигуни. Потрібна швидкість обертання ведучих коліс забезпечується завдяки безпосередньому керуванню привідними двигунами МРБП. У розглянутій на рисунку 2.1 конструкції в якості привідних застосовані двигуни постійного струму (ДПС), хоча такі роботи можуть комплектуватися і двигунами змінного струму. Розглянемо далі модель привідного ДПС.

Для дослідження процесів за допомогою ПК зручно використовувати структурне уявлення математичної моделі ДПС. Для цього систему лінійних диференціальних рівнянь ДПС [44, 109–111] перетворюють по Лапласу при нульових початкових умовах. У результаті використовують рівняння ДПС:

$$I_{\text{я}}(p) = \frac{U_{\text{я}}(p) - c_{\text{Е}}\omega_{\text{д}}(p)}{R_{\text{я}}(T_{\text{ЕМ}}p + 1)}; \quad (2.38)$$

$$\omega_{\text{д}}(p) = \frac{c_{\text{М}}I_{\text{я}}(p) - M_{\text{с}}(p)}{J_{\text{я}}p}, \quad (2.39)$$

де $I_{\text{я}}$ – струм якоря; $\omega_{\text{д}}$ – швидкість обертання валу двигуна; $c_{\text{М}}$ – коефіцієнт пропорційності струму якоря і електромагнітного моменту двигуна $M_{\text{ЕМ}}$, $M_{\text{ЕМ}} = c_{\text{М}}I_{\text{я}}$; $U_{\text{я}}$ – напруга живлення ДПС; $T_{\text{ЕМ}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}}$ – електромагнітна стала часу якірного ланцюга двигуна; $c_{\text{Е}}$ – коефіцієнт пропорційності постійної ЕРС двигуна; $R_{\text{я}}$, $L_{\text{я}}$ – активний опір та індуктивність якірної обмотки; $J_{\text{я}}$ – момент інерції якоря; $M_{\text{с}}$ – момент опору зовнішніх сил, прикладених до валу двигуна; величини $I_{\text{я}}(p)$, $\omega_{\text{д}}(p)$, $U_{\text{я}}(p)$, $M_{\text{с}}(p)$ – зображення по Лапласу змінних $I_{\text{я}}$, $\omega_{\text{д}}$, $U_{\text{я}}$, $M_{\text{с}}$ відповідно.

Редуктори. Якщо робочий орган системи безпосередньо пов'язаний з валом електродвигуна, то для аналізу руху електромеханічної системи: «двигун

– ведуче колесо», можна користуватися диференціальним рівнянням, що характеризує процеси в механічній частині двигуна [111]:

$$J_{\text{я}} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = M_{\text{ЕМ}} - M_{\text{С}}. \quad (2.40)$$

Така кінематична схема характерна, наприклад, для вентиляторів, насосів і ряду інших машин [110, 111]. Однак для МРБП робочий орган системи (привідне колесо) пов'язаний з валом електродвигуна через систему зубчастих передач, а саме через редуктор. Отже, безпосереднє використання рівняння (2.40) неможливо, тому що моменти $M_{\text{ЕМ}}$ і $M_{\text{С}}$ прикладені до різних валів, а інерційні маси обертаються з різними швидкостями.

Для можливості використання рівняння руху виникає завдання приведення всіх моментів опору і моментів інерції окремих кінематичних ланок до валу двигуна. Враховуючи правила приведення моментів опору і моментів інерції [111], отримається відповідно дві передаточні функції редуктора:

$$W_{\text{р1}}(p) = \frac{\omega_{\text{д}}(p)}{\omega_{\text{к}}(p)} = k_{\text{р}};$$

$$W_{\text{р2}}(p) = \frac{J_{\Sigma\text{к}}(p)}{J_{\Pi}(p)} = k_{\text{р}}^2,$$

де $k_{\text{р}}$ – передавальне число редуктора; $\omega_{\text{к}}$, $J_{\Sigma\text{к}}$ – кутова швидкість та сумарний момент інерції ведучого колеса; J_{Π} – приведений до двигуна момент інерції.

В результаті приведення статичного моменту і моменту інерції до валу двигуна замість реальної кінематичної схеми отримається розрахункова схема, на підставі якої можна користуватися модифікованим рівнянням руху [111]:

$$M_{\text{ЕМ}} - M_{\text{С}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} = (J_{\text{я}} + J_{\Pi}) \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt}.$$

Ходова частина МРБП. Для побудови моделі технічного об'єкта зазвичай розглядають його головний робочий орган [112–116]. У випадку з гусеничним

МРБП головним робочим органом є ведучі колеса (шестерні), які обертають гусениці, що призводить до обертально-поступального руху ходової частини робота по похилій площині (рисунок 2.12). Тому розгляд окремих елементів ходової частини МРБП доцільно проводити послідовно у відповідності до кутових швидкостей їх обертання.

Рівняння моментів на валу кожного з ведучих ДПС запишеться як:

$$M_2 = M_{\text{ДМД}} + M_{\text{РМД}},$$

де M_2 – корисний крутний момент двигуна, $M_2 = M_{\text{ЕМ}}\eta_{\text{Д}}$, $\eta_{\text{Д}}$ – коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна; $M_{\text{ДМД}}$ – динамічний момент ДПС, $M_{\text{ДМД}} = J_{\text{Я}}d\omega_{\text{Д}}/dt$; $M_{\text{РМД}}$ – робочий момент двигуна, що передається на редуктор.

Рівняння моментів на ведучому колесі при обертальному русі може бути записано, як

$$M_{\text{К}} = M_{\text{ДМК}} + M_{\text{РМК}},$$

де $M_{\text{К}}$ – сумарний механічний момент на привідному колесі, $M_{\text{К}} = M_{\text{РМД}}k_{\text{Р}}\eta_{\text{Р}}\eta_{\text{ГР}}$, $\eta_{\text{Р}}$ – ККД редуктора; $\eta_{\text{ГР}}$ – ККД гусеничного рушія; $M_{\text{ДМК}}$ – динамічний момент колеса, $M_{\text{ДМК}} = J_{\Sigma\text{К}}d\omega_{\text{К}}/dt$, $\omega_{\text{К}} = \omega_{\text{Д}}/k_{\text{Р}}$; $J_{\Sigma\text{К}}$ – сумарний момент інерції коліс та гусениці; $M_{\text{РМК}}$ – робочий момент ведучого колеса з гусеницею.

Визначення моментів інерції геометрично складних тіл, якими є ведучі колеса, гусениці та МРБП в цілому, пов'язане з великою складністю потрібних обчислень та необхідністю проведення експериментальних вимірів на спеціальному обладнанні [106, 117]. Однак $J_{\Sigma\text{К}}$ можна знайти наближено з використанням формул визначення моментів інерції для геометрично простих тіл: диску та кільця з прямокутним перетином [7].

Отже, момент інерції одного ведучого колеса $J_{\text{К}}$ визначається як

$$J_{\text{К}} = m_{\text{К}}R_{\text{К}}^2/2,$$

де $m_{\text{К}}$ – маса ведучого колеса; $R_{\text{К}}$ – радіус ведучого колеса.

За відомим значенням довжини робота L та радіусу ведучого колеса R_K можна визначити загальну довжину L_Γ та момент інерції J_Γ однієї гусениці

$$L_\Gamma = 2(L - 2R_K) + 2\pi R_K;$$

$$J_\Gamma = m_{\Gamma O} \left(R_K^2 + \frac{h_\Gamma^2}{2} + R_K h_\Gamma \right),$$

де $m_{\Gamma O}$ – маса тієї частини гусениці, що рухається обертально, $m_{\Gamma O} = (2\pi R_K / L_\Gamma) m_\Gamma$; m_Γ – маса гусениці; h_Γ – висота гусеничної стрічки. Тоді сумарний момент інерції колеса разом із гусеницею: $J_{\Sigma K} = 2J_K + J_\Gamma$.

ККД гусеничного рушія $\eta_{\Gamma P}$ представляє собою відношенню потужності, що витрачається на подолання зовнішніх опорів руху МРБП, до потужності, що підводиться до ведучих коліс, та для малих швидкостей [118] має вигляд

$$\eta_{\Gamma P} = 0,95 - (0,025 + 0,000003 V_{MP}^2) / f_{BK},$$

де f_{BK} – питома сила тяги на ведучих колесах, $f_{BK} = F_T / G$, при цьому F_T – сила тяги на двох ведучих колесах робота; V_{MP} – лінійна швидкість робота (у км/год); G – вага робота. Для практичних розрахунків та швидкостей 1..1,5 км/год приймають $\eta_{\Gamma P} = 0,95..0,99$, а $\eta_P \eta_{\Gamma P} = 0,86..0,88$ [119].

Нерівномірний рух мобільного робота по похилій поверхні вгору схематично показаний на рисунку 2.12, де введені натупні позначення: G – вага робота, F_f – сила опору руху, F_{TO} – сила опору від виконуваної технологічної операції та/або тяги причепа (буксирування обладнання), X_K – реакція поверхні, паралельна шляху руху робота, N – реакція поверхні, нормальна до площини поверхні, F_J – сила інерції робота, F – сила притискного магніту, M_J – сумарний момент дотичних сил інерції коліс, катків, відповідних ланок гусениці і деталей передачі, встановлених на поперечних валах [120]. На корпус робота також діє сила опору повітря (на рисунку 2.12 не показана), однак враховуючи невелику чолову площу робота та малу швидкість його переміщення (менше 70 км/год), опором повітря можна знехтувати [118].

Вага окремих частин МРБП замінюється рівнодіючою, яка дорівнює експлуатаційній вазі МРБП $G = m_{\text{МРП}}g$ ($m_{\text{МРП}}$ – маса робота), яка прикладається в його центрі ваги і спрямовується завжди вертикально вниз.

На робот, що нерухомо стоїть на горизонтальній поверхні, із зовнішніх сил діє лише вага G і викликана нею нормальна реакція поверхні N . Коли МРБП знаходиться на підйомі або ухилі, вага G може бути розкладена на дві складові, спрямовані по відношенню до поверхні шляху: паралельно – $G\sin\gamma$ й нормально – $G\cos\gamma$. Складова $G\sin\gamma$ чинить додатковий опір руху робота на підйомах. На ухилах ця сила спрямована по ходу робота і є рушійною силою, яка частково повертає енергію, витрачену на підйом. Сила $G\cos\gamma$ разом з силою F та іншими силами і моментами визначає величину і точку прикладання нормального реакції N з боку робочої ФП, та визначаються як зціпна вага [118].

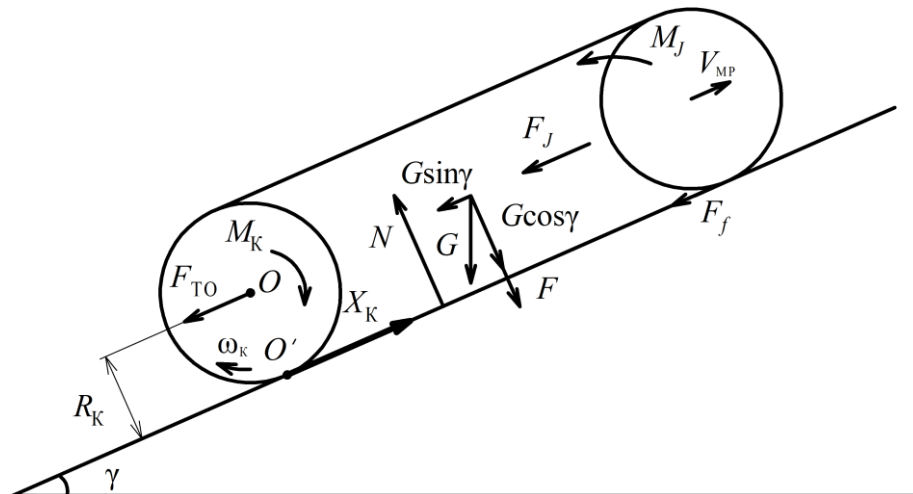


Рисунок 2.12 – Схема сил, що діють на МРБП при русі по похилій поверхні

Абсолютна величина сумарної сили F_f опору коченню МРБП при сталому русі його на горизонтальній ділянці відповідає силі, що витрачається на пересування самого робота. Сила F_f при холостому ході робота приблизно дорівнює силі, необхідній для його буксирування, і може бути заміряна динамометром при буксируванні на горизонтальній ділянці. Сила F_f завжди спрямована проти руху, а її величина залежить від ваги і положення центра ваги МРБП, конструкції рушія, стану поверхні. Приймається, що сила F_f не залежить від швидкості руху. Сила опору коченню для МРБП визначається як

$$F_f = f(G \cos \gamma + F) = F_{f1} + F_{f2}, \quad (2.41)$$

де f – коефіцієнт кочення робота, $f \approx 0,01..0,03$ для твердої ФП; F_{f1} , F_{f2} – сили опору з боку лівої та правої гусениць відповідно.

Сили інерції F_J окремих частин МРБП виникають при його нерівномірному поступальному русі і можуть бути замінені їх рівнодійною, яка додається в центрі ваги робота і спрямовується паралельно шляху руху робота в бік, протилежний прискоренню. Величина цієї рівнодійної $F_J = m_{MP} a_{MP} \lambda_M$, a_{MP} – прискорення прямолінійного поступального руху робота, λ_M – зведений коефіцієнт маси, який враховує вплив інерції обертюв частин робота під час нерівномірного поступального руху, для орієнтовних розрахунків гусеничного рушія використовують емпіричну залежність $\lambda_M = 1,15 + 0,001 k_p^2$ [117].

Обертання привідного колеса під час руху МРБП викликається привідним моментом, переданим до нього від двигуна через редуктор. При коченні ведучого колеса з гусеницею крім нормальної складової реакції ФП з'являється складова реакції поверхні X_K , спрямована в бік руху МРБП паралельно поверхні. Ця реакція є рушійною, штовхає робота з силою, що викликає переміщення робота. З достатньою для практики точністю можна вважати, що при рівномірному русі реакція поверхні X_K дорівнює окружному зусиллю на ободі ведучого колеса F_T – дотичній силі тяги, визначеної з урахуванням втрат на тертя у ведучій частині гусениці. В цьому випадку силу тяги, яку розвивають два двигуни, $F_T = F_{T1} + F_{T2}$, де F_{T1} , F_{T2} – сили тяги відстаючої і забіжної гусениць. Для горизонтальної ділянки та прямолінійно руху МРБП

$$F_{T1} = F_{T2} = \frac{M_2 k_p}{R_K} \eta_p \eta_{ГР}. \quad (2.42)$$

Аналіз витрат потужності в гусеничному рушії показує, що вони залежать від різних конструктивних параметрів, а також від швидкості і ваги робота, величини тягового зусилля на привідних колесах і ряду інших факторів, які

складно врахувати. При виконанні тягових розрахунків користуються різними емпіричними залежностями, отриманими в результаті обробки експериментальних даних [118].

Необхідно відзначити, що максимальне можливе значення привідного моменту і дотичної сили тяги залежить не тільки від двигуна і передавального числа редуктора, а й від зчеплення гусениць. На якість зчеплення МРБП, здатного переміщуватися по вертикальних, поверхнях впливає сила реакції опори N , яка може бути визначена як

$$N = G \cos \gamma + F = N_1 + N_2 = G_{зч}, \quad (2.43)$$

де N_1, N_2 – нормальні реакції поверхні, діючі на опорні ділянки відстаючої та забіжної гусениць, $G_{зч}$ – зчіпна вага робота.

Забезпечення надійного зчеплення рушія МРБП з похилою або стельовою поверхнею є дуже непростим завданням та потребує контролю ПЗ F [9]. Розглянемо більш докладно фізичну сторону виникнення сили тяги. Для натягу гусеничних стрічок силами тяги, що розвиваються на привідних колесах, необхідно створення для них зовнішньої опори, яка забезпечується зчепленням нижніх гілок гусениць з ФП, притиснутих до неї силою, рівною зчепній вазі $G_{зч}$. Відповідно, сумарна сила тяги F_T має дорівнювати силі зчеплення гусениць з поверхнею $F_{зч}$ (розрахункова сила тяги за зчепленням)

$$F_{зч} = \sum_{i=1}^m \mu' N_i \approx \phi' N,$$

де μ' – коефіцієнт тертя між опорною ділянкою трака та поверхнею, N_i – нормальне навантаження на трак, m – кількість траків опорної гілки гусениці, ϕ' – коефіцієнт пропорційності, що визначається дослідним шляхом для даних умов руху. Знак приблизної рівності свідчить про можливість в практичних розрахунках користуватися саме другою частиною виразу, коефіцієнти μ' та ϕ' не суттєво відрізняються та при взаємодії фрикційного матеріалу гусениць зі

сталевою поверхнею можуть бути прийняті по 0,5..0,9, більше значення відповідає стану поверхні з більшою шорсткістю [117, 118].

Зі збільшенням дотичної сили тяги спостерігається проковзування гусениць (буксування робота). В такому разі сила тяги МРБП перевищує силу зчеплення, а дійсне значення швидкості переміщення робота V_d стає меншим за теоретичне значення швидкості V_T (без буксування). Коефіцієнт буксування κ визначається виразом $\kappa = (V_T - V_d)/V_T$. При повному буксуванні ($V_d = 0$, $\kappa = 1$) енергія двигунів витрачається на тертя та деформацію фрикційного матеріалу гусениць. Втрати від буксування встановлюються за даними випробувань [120]. Найбільше допустиме значення κ для гусеничного рушія складає 0,04.

За допомогою рисунку 2.12 можна скласти рівняння тягового балансу (залежність між силою тяги та силами опору) для МРБП:

$$F_T = F_f \pm F_{TO} \pm G \sin \gamma \pm F_J, \quad (2.44)$$

де знак (+) для сили $G \sin \gamma$ стосується підйому, а (–) – спуску, а для сили F_J відповідно – розгону і гальмування. Враховуючи вираз для F_J , (2.41), (2.44) отримається диференціальне рівняння руху центра тяжіння МРБП

$$\ddot{x} = \pm \frac{1}{m_{MP} \lambda_M} [F_T - G(f \cos \gamma \mp \sin \gamma) - fF \mp F_{TO}],$$

де $\ddot{x}$ – прискорення робота ($\ddot{x} = a_{MP}$).

Розрахункове значення сили тяги, яку необхідно забезпечити при рівномірному русі МРБП по похилій ФП визначається з урахуванням умов подолання максимальних сил опору, що спостерігаються в основному при подоланні великих підйомів. У той же час сила тяги по двигуну (F_T) не може бути більше сили тяги по зчепленню ($F_{зч}$). Отже, сила тяги по двигуну, що розвивається при рівномірному русі робота ($F_J = 0$) повинна дорівнювати силі опору руху на максимальному підйомі та силі тяги по зчепленню [118], тобто

$$F_T = F_{TO} + F_f + G \sin \gamma = \varphi N ,$$

де φ – коефіцієнт зчеплення, для однакових умов руху (незмінюваних поверхнях тертя) $\varphi = \varphi'$. Підставляючи отримані вище залежності для сил та розділивши отриману рівність на G , отримається вираз

$$F_T^* = F_{TO}^* + f \cos \gamma + f F^* + \sin \gamma = \varphi \cos \gamma + \varphi F^* ,$$

де F_T^*, F_{TO}^*, F^* – значення питомої сили тяги двигунів, причепа та ПЕ відносно сили тяжіння G , $F_T^* = F_T / G$, $F_{TO}^* = F_{TO} / G$, $F^* = F / G$. В цьому рівнянні значення коефіцієнтів опору руху та зчеплення з ФП є обумовленими фізично та не можуть бути змінені під час руху. Однак воно пов'язує між собою кут нахилу ФП та необхідне ПЗ для забезпечення рівномірного руху без буксування:

$$F^* = \frac{F_{TO}^* + f \cos \gamma + \sin \gamma - \varphi \cos \gamma}{\varphi - f} . \quad (2.45)$$

Отримана залежність є дуже важливою, так як безпосередньо дозволяє забезпечувати умови поздовжньої та поперечної стійкості МРБП. На загальмований гусеничний мобільний робот, що рухається по похилій поверхні, діє складова ваги $G \sin \gamma$, яка прагне перекинути корпус робота, повернувши його щодо осі, що проходить через точку O' (рисунок 2.12). Складова $G \cos \gamma$ діє в зворотному напрямку і прагне притиснути робота до поверхні шляху. При збільшенні кута підйому γ перекидальна сила робота $G \sin \gamma$ й момент її щодо точки O' збільшуються, а притискна сила до поверхні шляху $G \cos \gamma$ і момент її щодо тієї ж точки зменшуються, аж до її зникнення при куті в 90° . Тому, завдяки наявності ПЗ магнітів забезпечується утримання корпусу МРБП на ФП незалежно від кута нахилу. За відсутності навантаження від ТО та ПЗ ($F_{TO} = 0$, $F = 0$) максимальний кут, який може подолати МРБП, складає: $\gamma = \arctg(\varphi - f)$.

Рівняння моментів відносно осі ведучих коліс O (рисунок 2.12) при нерівному прямолінійному русі МРБП на підйомі матиме вигляд

$$M_K = (F_f \pm G \sin \gamma \pm F_{TO} \pm F_J) R_K \pm M_J,$$

де рухомий момент M_K з урахуванням втрат у ведучій частині гусениці рівний сумі наступних моментів: від сили опору технологічної операції, паралельній поверхні шляху, $(F_{TO}R_K)$; від складової ваги робота, паралельної поверхні шляху, $(GR_K \sin \gamma)$; від сили інерції при прямолінійному поступальному русі робота, $(F_J R_K)$; від сили кочення, $(F_f R_K)$; від сил інерції обертових деталей гусеничного рушія (знак $(+)$ для M_J стосується розгону, а $(-)$ – гальмування).

Далі необхідно врахувати моменти опору повороту МРБП, які створюють додаткове навантаження на привідні двигуни. Поворот гусеничного рушія забезпечується різними силами тяги і швидкостями руху на кожній гусениці. Гусениця, що рухається з більшою швидкістю (забіжна гусениця), повертає корпус робота в бік відстаючої гусениці. При цьому мобільний робот одночасно як би бере участь в двох рухах – поступальному і обертальному навколо поточного полюса O_{Π} (рисунок 2.13).

Співвідношення взаємозв'язку кінематичних параметрів для опису повороту МРБП записуються з урахуванням [7, 35, 117] та рисунку 2.13, а як:

$$\omega_{MP} = V_{MP} / R_{\Pi} = (V_{G2} - V_{G1}) / B_{MP};$$

$$V_{MP} = (V_{G2} + V_{G1}) / 2;$$

$$V_{G1} = \omega_{MP} (R_{\Pi} - 0,5 B_{MP}) = \omega_{K1} R_K;$$

$$V_{G2} = \omega_{MP} (R_{\Pi} + 0,5 B_{MP}) = \omega_{K2} R_K,$$

де V_{G1} , V_{G2} – лінійні, ω_{K1} , ω_{K2} – кутові швидкості відстаючої та забігаючої гусениць; R_{Π} – радіус повороту робота, $R_{\Pi} = 0,5 B_{MP} (V_{G2} + V_{G1}) / (V_{G2} - V_{G1})$; ω_{MP} , φ_{MP} – кутова швидкість та курс робота, $\varphi_{MP} = d\omega_{MP}/dt$; B_{MP} – відстань між центрами гусениць.

При повороті силу опору поступальному руху кожної гусениці F_{f1} та F_{f2} можна представити як добуток навантаження від ПЗ магніту та сил тяжіння G_1 та G_2 , що припадає на цю гусеницю, на коефіцієнт кочення f .

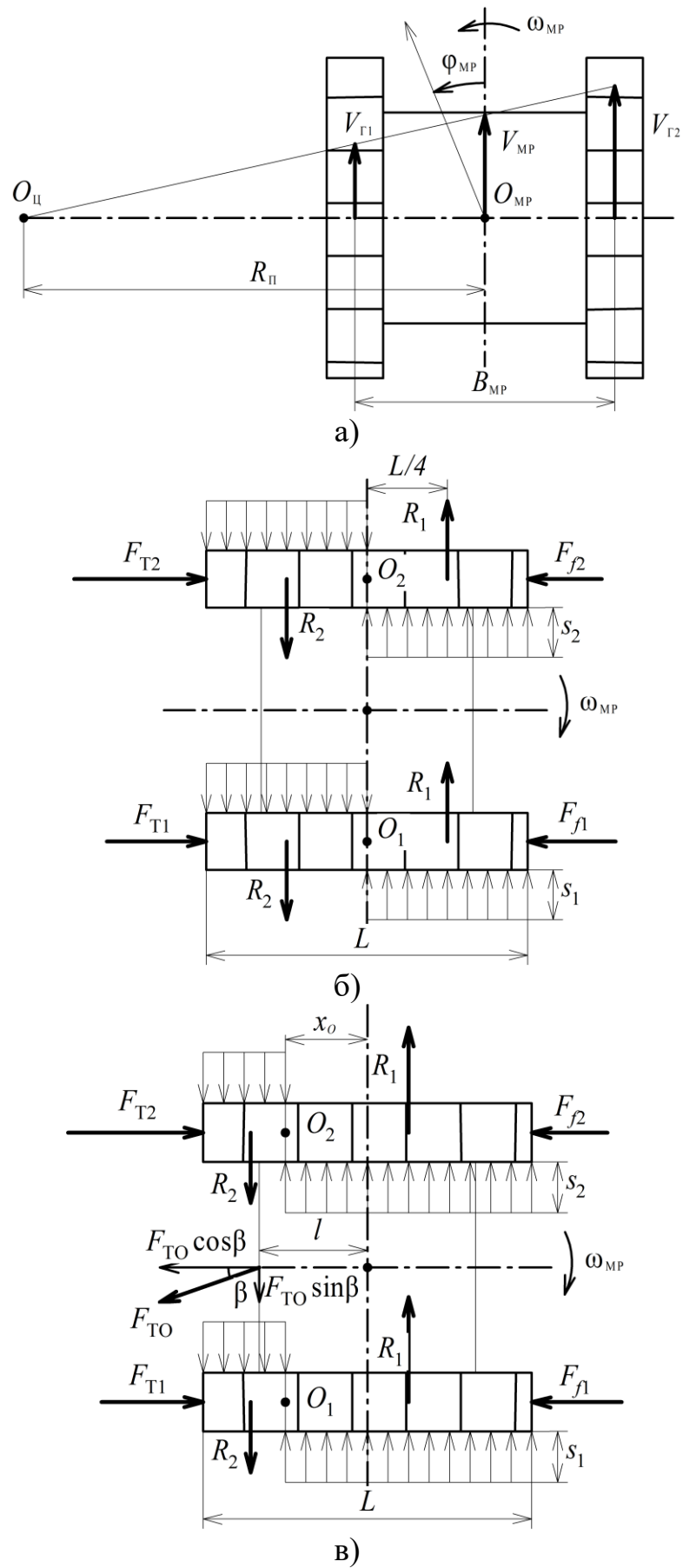


Рисунок 2.13 – Схеми повороту МРБП: кінематика (а), розподіл сил на горизонтальній поверхні без навантаження (б) та з навантаженням F_{TO} (в)

Тоді $F_f = F_{f1} + F_{f2} = f(G_1 + F_{M1}) + f(G_2 + F_{M2})$ при рівномірному повороті на горизонтальній ділянці $G_1 = G_2 = G/2$, $F_{M1} = F_{M2} = F/2$. Припустимо, що поворот робота відбувається на горизонтальній ділянці шляху в напрямку стрілки (рисунок 2.13, б) з рівномірною кутовою швидкістю ω_{MP} . Відцентрова сила відсутня, центр ваги МРБП лежить на перетині осей симетрії опорної поверхні робота, тиск на опорні поверхні гусениць розподілено рівномірно, $F_{TO} = 0$.

У цьому випадку на мобільний робот діють наступні сили: сила тяги F_{T2} на забіжній гусениці, що діє у напрямку руху; сила тяги F_{T1} на відстаючій гусениці; сили опору руху гусениць F_{f1} та F_{f2} , що діють в напрямку, протилежному руху гусениць; сили опору повороту, що діють в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху, спрямовані проти повороту. Сили опору повороту залежать від ваги МРБП, конструкції ходової частини і їх можна виразити через коефіцієнт пропорційності між поперечними реакціями поверхні та нормальним тиском опору повороту, який позначається як коефіцієнт опору повороту $\mu_{пов}$. При цьому s_1 та s_2 – питомі поперечні сили, що діють на одиницю довжини опорних поверхонь відстаючої та забіжної гусениць (на рисунку 2.13 вони рівні між собою). Рівнодійні цих сил опору R_1 та R_2 дорівнюють $\mu_{пов}(G+F)/4$ [118]. Коефіцієнт опору повороту залежить від радіусу повороту та визначається з виразу [118]:

$$\mu_{пов} = \frac{\mu_{max}}{a_{\Pi} + (1 - a_{\Pi}) \frac{R_{\Pi}}{B_{MP}}}, \quad (2.46)$$

де μ_{max} – значення $\mu_{пов}$ при $R_{\Pi} = B_{MP}$, для гусениць робота можна прийняти $\mu_{max} \approx 0,4..0,8$ – більше значення μ_{max} приймають для роботів з більшим середнім питомим тиском та з більшою довжиною опорної поверхні гусениць (за одного типу фрикційного матеріалу гусениць); a_{Π} – дослідний коефіцієнт, в розрахунках приймають $a_{\Pi} = 0,8..0,87$ [118].

З рівняння рівноваги сил і моментів відносно миттєвих центрів повороту гусениць O_1 та O_2 можна отримати вирази необхідних для повороту сил тяги:

$$F_{T1} = (G + F) \left(\frac{f}{2} - \mu_{\text{пов}} \frac{L}{4B_{\text{MP}}} \right),$$

$$F_{T2} = (G + F) \left(\frac{f}{2} + \mu_{\text{пов}} \frac{L}{4B_{\text{MP}}} \right).$$

Тому для заданих умов руху сили тяги на забіжній та відстаючій гусеницях залежать від коефіцієнта опору коченню f , коефіцієнта опору повороту $\mu_{\text{пов}}$, довжини опорної поверхні L і відстані між центрами гусениць B_{MP} . Сила тяги на відстаючій гусениці F_{T1} має знак мінус, тому що вона виникає при гальмуванні гусениці, так як $\mu_{\text{пов}} \gg f$ ($\mu_{\text{пов}} \approx 0,4..0,8$; $f \approx 0,01..0,03$) та для покращення повороткості гусеничних рушіїв при конструюванні відношення L/B_{MP} підтримують у межах 1,0 – 1,7 [120]. При рівномірному розподілі навантаження на опорну поверхню гусениці (випадок на рисунку 2.13, б) опір повороту гусеничного МРБП $M_{\text{пов}} = \mu_{\text{пов}} (G + F) L / 4$. Змінюючи розподіл навантаження по опорній поверхні гусениць цей момент можна зменшувати за рахунок зміни плечей сил опору повороту з $L/4$ на $L/6$ для розподілу навантаження за законом трикутника або на $L/5$ – за законом трапеції [120].

Нерівномірність розподілу навантаження вносить також наявність сили опору від технологічної операції $F_{\text{ТО}}$ (рисунки 2.13, в). В такому разі доцільно прийняти наступні припущення: точка прикладення $F_{\text{ТО}}$ розташована на поздовжньої осі робота і її напрямок паралельний робочій площині, деякий вплив поздовжнього зсуву центру тиску на зміщення центру повороту не враховується. Тоді рівнянь моментів щодо центрів повороту O_1 та O_2 :

$$\text{т. } O_2: (F_{f1} - F_{T1}) B_{\text{MP}} + F_{\text{ТО}} \frac{B_{\text{MP}}}{2} \cos \beta = 2R_1 \frac{x_O + L/2}{2} + 2R_2 \frac{L/2 - x_O}{2} + F_{\text{ТО}} (l - x_O) \sin \beta,$$

$$\text{т. } O_1: (F_{T2} - F_{f2}) B_{\text{MP}} = 2R_1 \frac{x_O + L/2}{2} + 2R_2 \frac{L/2 - x_O}{2} + F_{\text{ТО}} (l - x_O) \sin \beta + F_{\text{ТО}} \frac{B_{\text{MP}}}{2} \cos \beta,$$

де x_O , l – відстані від поперечної осі робота до центрів повороту гусениць та до точки закріплення технологічного обладнання (рисунки 2.13, в); β – кут відхилення лінії дії сили $F_{\text{ТО}}$ від поздовжньої вісі робота (рисунки 2.13, в).

Звідки сили тяги визначаються як:

$$F_{Ti} = \frac{G+F}{2} f - j \frac{\mu_{\text{пов}} L(G+F)}{4B_{\text{MP}}} + F_{\text{ТО}} \left(\frac{\cos\beta}{2} - j \frac{l-x_o}{B_{\text{MP}}} \sin\beta \right),$$

де $i = 1, j = 1$ – для відстаючої гусениці; $i = 2, j = -1$ – для забіжної гусениці.

Для визначення x_o спроектуємо всі сили, що діють на робот, на поперечну вісь, причому R_1 та R_2 виразимо через питомі поперечні сили, тоді отримається:

$$F_{\text{ТО}} \sin\beta = 2x_o (s_1 + s_2).$$

Враховуючи, що $(s_1 + s_2) = \mu_{\text{пов}}(G + F)/L$, отримається вираз

$$x_o = \frac{LF_{\text{ТО}} \sin\beta}{2\mu_{\text{пов}}(G + F)}.$$

На рисунку 2.13, б та в розглянуто рівномірний поворот робота на горизонтальній площині, що здійснюється з малою швидкістю і з постійним радіусом. При цьому для визначення потрібних сил тяги не враховувалася дія на робот будь-яких поздовжніх і поперечних сил, крім реакцій поверхні. Але такі сили діють на МРБП при повороті на підйомі (спуску) у вигляді поздовжньої складової сили ваги або у вигляді поперечної складової ваги при повороті з положення крену. При довільних положеннях робота на похилій поверхні одночасно діють поперечна і поздовжня складові ваги G , а також поперечна і поздовжня сили як складові відцентрової сили і сили інерції (з'являються ці сили і при повороті робота при наявності $F_{\text{ТО}}$). Отже, доцільно розглянути більш загальний випадок руху – поворот гусеничного мобільного робота з довільного положення на похилій ФП [118] за наявності поздовжніх і поперечних сил (рисунки 2.14). При положенні робота на цій ФП з курсовим кутом φ_{MP} складова ваги робота паралельна площині руху і рівна $G \sin\gamma$, в свою чергу дає складову F_x , спрямовану уздовж поздовжньої осі робота, і поперечну складову F_y , перпендикулярну цій осі.

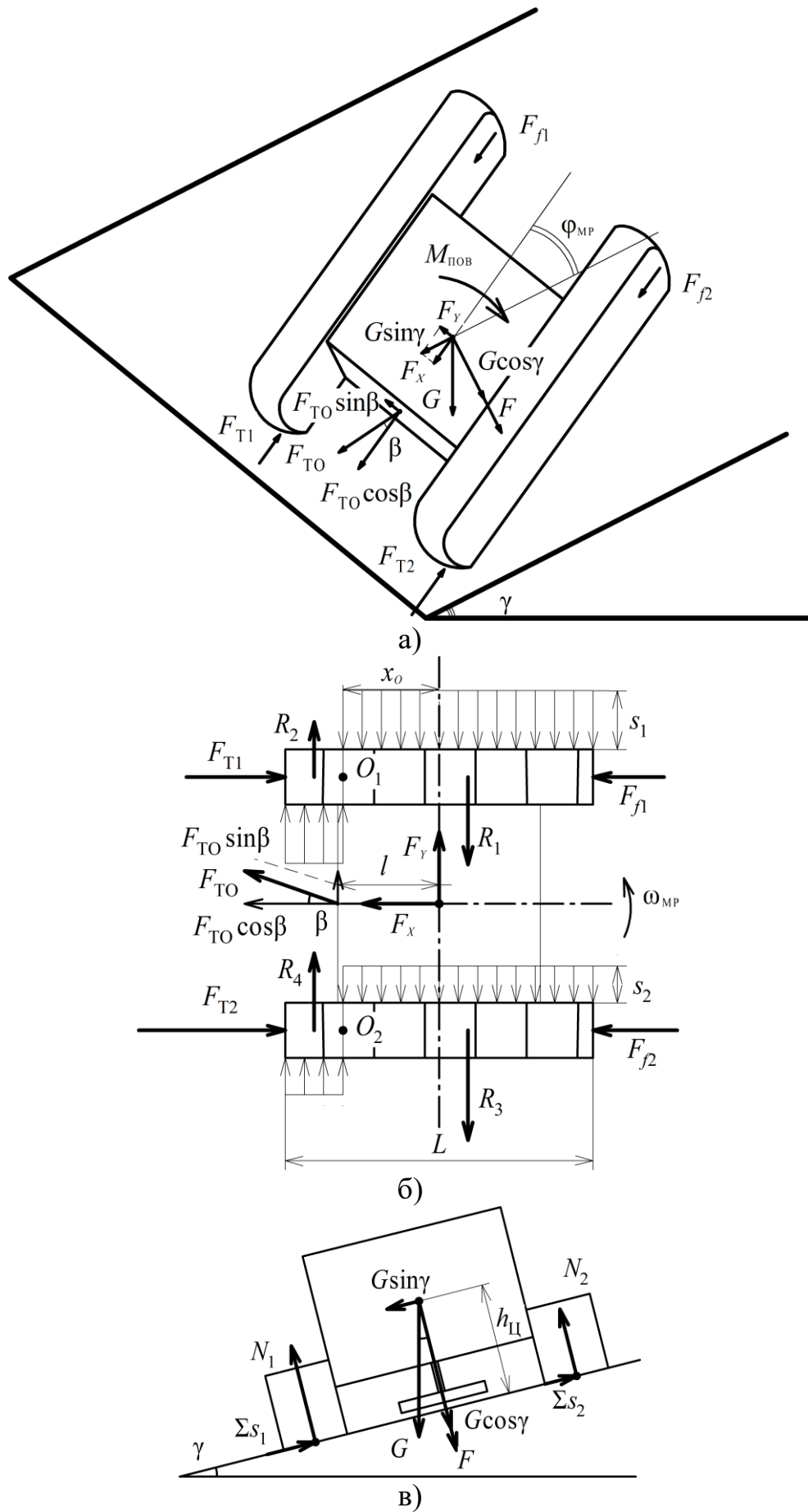


Рисунок 2.14 – Розрахункові схеми сил при повороті гусеничного МРБП на похилій поверхні: при довільному положенні (а та б), при чистому крені (в)

Враховуючи курс робота та силу, створювану ПП, отримається

$$F_X = G \sin \gamma \cos \varphi_{MP};$$

$$F_Y = G \sin \gamma \sin \varphi_{MP}.$$

Для знаходження сил тяги гусениць F_{T1} та F_{T2} припустимо, що епюри поперечних реакцій ФП на опорні поверхні гусениць є прямокутними, відповідно не буде врахований перерозподіл нормальних навантажень на опорні поверхні гусениць від дії поздовжньої сили F_X . Схема зовнішніх сил, що діють на МРБП в розглянутому випадку показана на рисунку 2.14, б, де еюра навантажень має несиметричний вигляд.

Рівняння моментів щодо центрів повороту O_1 та O_2 :

$$\begin{aligned} \text{т. } O_2: (F_{T1} - F_{f1}) B_{MP} + R_1 \frac{x_O + L/2}{2} + R_3 \frac{x_O + L/2}{2} + R_2 \frac{L/2 - x_O}{2} + R_4 \frac{L/2 - x_O}{2} + \\ + F_{TO} (l - x_O) \sin \beta = F_Y x_O + F_{TO} \frac{B_{MP}}{2} \cos \beta + \frac{F_X B_{MP}}{2} \end{aligned};$$

$$\begin{aligned} \text{т. } O_1: (F_{T2} - F_{f2}) B_{MP} + F_Y x_O = R_3 \frac{x_O + L/2}{2} + R_1 \frac{x_O + L/2}{2} + R_2 \frac{L/2 - x_O}{2} + \\ + R_4 \frac{L/2 - x_O}{2} + F_{TO} \frac{B_{MP}}{2} \cos \beta + F_{TO} (l - x_O) \sin \beta + \frac{F_X B_{MP}}{2} \end{aligned}.$$

В отриманих рівняннях $M_{пов}$ МРБП на похилій площині визначається як

$$M_{пов} = R_1 \frac{x_O + L/2}{2} + R_2 \frac{L/2 - x_O}{2} + R_3 \frac{x_O + L/2}{2} + R_4 \frac{L/2 - x_O}{2}, \text{ де}$$

$$R_1 = \frac{\mu_{пов} Q_1}{L} (x_O + L/2); \quad R_2 = \frac{\mu_{пов} Q_1}{L} (L/2 - x_O);$$

$$R_3 = \frac{\mu_{пов} Q_2}{L} (x_O + L/2); \quad R_4 = \frac{\mu_{пов} Q_2}{L} (L/2 - x_O),$$

де Q_1 та Q_2 – нормальні навантаження на відстаючу та забіжну гусениці (рівні за значенням але протилежні за знаком до реакцій опори N_1 та N_2), які не рівні між собою та перерозподіляються під впливом поперечної сили F_Y , а відповідно змінюються і реакції опори N_1 та N_2 (див. рисунок 2.14, в та (2.43)) як:

$$N_1 = Q_1 = \frac{G \cos \gamma + F}{2} + G \sin \gamma \frac{h_{\text{Ц}}}{B_{\text{МП}}}; \quad (2.47)$$

$$N_2 = Q_2 = \frac{G \cos \gamma + F}{2} - G \sin \gamma \frac{h_{\text{Ц}}}{B_{\text{МП}}}; \quad (2.48)$$

$$N = N_1 + N_2 = Q_1 + Q_2 = G \cos \gamma + F.$$

де $h_{\text{Ц}}$ – висота центру тяжіння МРБП. На рисунку 2.14, б, в Σs_1 та Σs_2 – результуючі поперечних реакцій поверхні на відстаючу та забіжну гусениці.

Тому, момент опору повороту МРБП та сили опору кочення (з урахуванням (2.41)) у випадку довільного просторового положення запишуться:

$$M_{\text{ПОВ}} = \frac{\mu_{\text{ПОВ}} L Q}{4} \left(1 + \frac{4x_O^2}{L^2} \right) = \frac{\mu_{\text{ПОВ}} L (G \cos \gamma + F)}{4} \left(1 + \frac{4x_O^2}{L^2} \right);$$

$$F_{\bar{f}_i} = f N_i = f \left(\frac{G \cos \gamma + F}{2} + j G \sin \gamma \sin \varphi_{\text{МП}} \frac{h_{\text{Ц}}}{B_{\text{МП}}} \right).$$

Тепер сили тяги визначаються як:

$$F_{\text{Ti}} = f \frac{G \cos \gamma + F}{2} + G \sin \gamma \left(\frac{\cos \varphi_{\text{МП}}}{2} + j \frac{x_O}{B_{\text{МП}}} \sin \varphi_{\text{МП}} + j f \frac{h_{\text{Ц}}}{B_{\text{МП}}} \sin \varphi_{\text{МП}} \right) - \\ - j \frac{\mu_{\text{ПОВ}} L (G \cos \gamma + F)}{4 B_{\text{МП}}} \left(1 + \frac{4x_O^2}{L^2} \right) + F_{\text{ТО}} \left(\frac{1}{2} \cos \beta - j \frac{(l - x_O)}{B_{\text{МП}}} \sin \beta \right). \quad (2.49)$$

Для визначення x_O в цьому випадку аналогічно спроектуємо всі сили на поперечну вісь (рисунок 2.14, б), а R_1 - R_4 виразимо через питомі поперечні сили:

$$F_Y + F_{\text{ТО}} \sin \beta = 2x_O (s_1 + s_2).$$

Враховуючи, що $(s_1 + s_2) = \mu_{\text{ПОВ}}(G \cos \gamma + F)/L$, отримається вираз

$$x_O = \frac{L (G \sin \gamma \sin \varphi_{\text{МП}} + F_{\text{ТО}} \sin \beta)}{2 \mu_{\text{ПОВ}} (G \cos \gamma + F)}. \quad (2.50)$$

Користуючись (2.49) для сил F_{T1} та F_{T2} за рівномірного руху, можна розраховувати їх значення для всього діапазону зміни кута φ_{MP} від 0 до 360° відносно G ($F_{T1}^* = F_T / G$, $F_{T2}^* = F_{T2} / G$). Результати таких розрахунків, проведені для значень параметрів моделі робота ($L = 1$ м, $B_{MP} = 0,8$ м; $h_{Ц} = 0,2$ м), робочої поверхні ($\mu_{max} = 0,6$; $f = 0,015$) при куті нахилу ФП $\gamma = 10^\circ$ без урахування сил F_{TO} та F , наведені на рисунку 2.15, а у полярних та декартових координатах.

Як видно з полярної діаграми, наведеної на рисунку 2.15, а, для забезпечення рівномірного повороту робота з постійним радіусом на похилій ФП необхідно безперервно змінювати величини сил F_{T1} та F_{T2} (сила F_{T1} має знак мінус для всіх значень φ_{MP} , на рисунку 2.15, а, F_{T1} взята за модулем). З діаграми видно, що найбільшого значення сила F_{T2} досягає на «чистому» підйомі, найменшого – на «чистому» спуску. Для F_{T1} діє зворотна закономірність: при «чистих» кренах значення сил F_{T2} та F_{T1} менше значень цих сил при повороті мобільного робота на горизонтальній ділянці.

На рисунку 2.15, б показані графіки для F_{T1}^* та F_{T2}^* при нахилі поверхні $\gamma = 60^\circ$ з урахуванням сили F^* ($F^* = F/G$), яка розрахована для заданих умов руху і параметрів моделі робота за (2.45). Видно, що для рівномірного повороту МРБП на похилих поверхнях з великим кутом нахилу з потрібним значенням F характер зміни сил тяги зберігається, але тепер вони мають змінюватися і за знаком і за модулем, причому на «чистому» підйомі F_{T1} , на відміну від попереднього випадку, має додатній знак, але значно менше за F_{T2} , а на «чистому» спуску обидві сили мають від’ємний знак, що пояснюється суттєво більшим моментом опору повороту $M_{ПОВ}$ в силу наявності ПЗ F .

На рисунку 2.15, в показані графіки для F_{T1}^* та F_{T2}^* при нахилі поверхні $\gamma = 60^\circ$ з урахуванням сил F^* та F_{TO}^* ($F_{TO}^* = F_{TO}/G$, $\beta = 30^\circ$), для заданих умов руху і параметрів моделі робота. Для рівномірного повороту МРБП на похилих ФП з великим кутом нахилу та за наявності F_{TO} від заданої технологічної операції значення сили тяги F_{T2} має змінюватися за модулем, а F_{T1} – і за знаком і за модулем, що викликано впливом ПЗ F та зусилля F_{TO} .

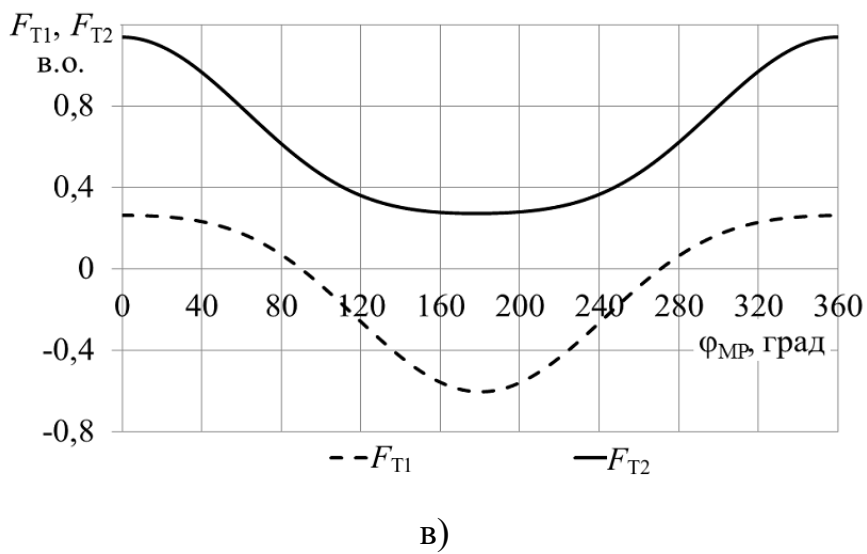
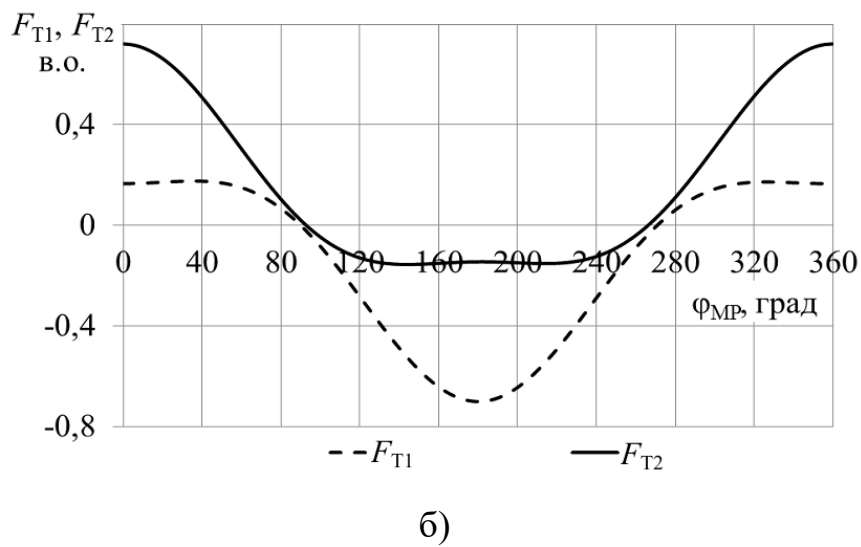
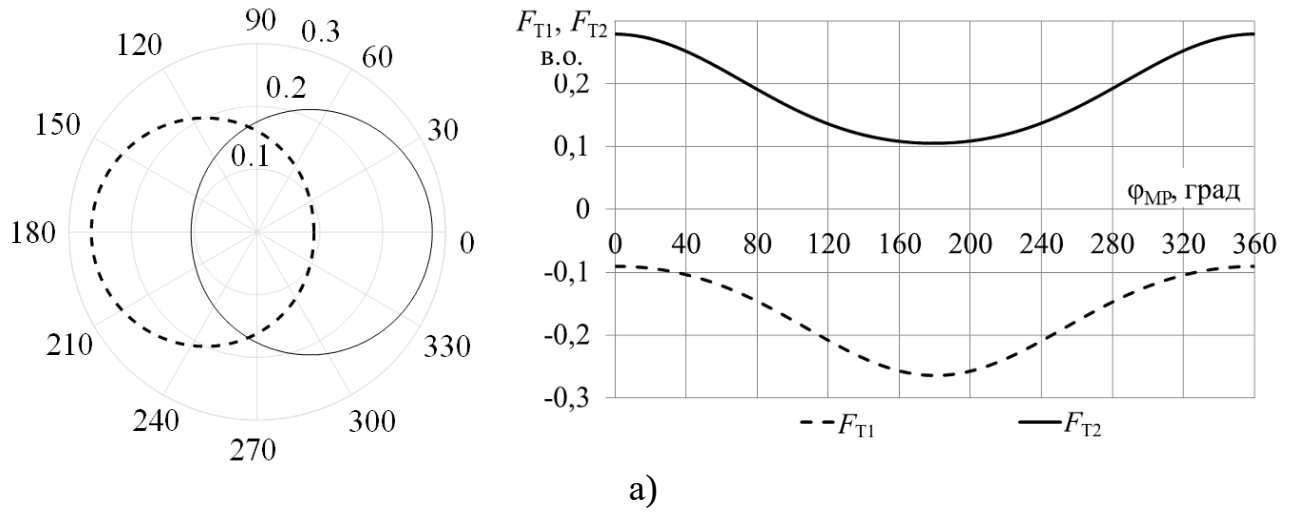


Рисунок 2.15 – Графіки зміни відносних сил тяги F_{T1}^* (пунктирна лінія) та F_{T2}^* (суцільна лінія) в координатах курсового кута ϕ_{MP} : $\gamma = 10^\circ$, $F_{TO} = F = 0$ (а); $\gamma = 60^\circ$, $F_{TO} = 0$, $F = 0,76G$ (б); $\gamma = 60^\circ$, $F_{TO} = 0,5G$; $F = 1,5G$ (в)

Для урахування динаміки в (2.49) необхідно додати (при розгоні) або відняти (при гальмуванні) силу інерції. Із (2.47) – (2.48) можна визначити масу робота, яка припадає на кожну гусеницю як $m_{Г1} = N_1 / g$, $m_{Г2} = N_2 / g$, тоді сила інерції, що діє на кожну гусеницю $F_{Л1}$ та $F_{Л2}$ визначається як

$$F_{Лi} = \left(\frac{G \cos \gamma + F}{2g} + jG \sin \gamma \sin \varphi_{MP} \frac{h_{Ц}}{gB_{MP}} \right) \frac{dV_{Gi}}{dt}, \quad (2.51)$$

де dV_{Gi}/dt – прискорення відстаючої та забіжної гусениць.

Динамічний момент при нерівномірному повороті на похилій площині робота можна виразити як $M_{ДИНП} = J_{MP} d\omega_{MP}/dt$, де J_{MP} – момент інерції робота. Величина J_{MP} може бути визначена експериментально для горизонтальних поверхонь без дії ПЗ магніту. Для наближених розрахунків можна умовно прийняти МРБП у вигляді тонкої пластини мамою m_{MP} ширини B_{MP} та довжини L . Тоді момент інерції такої пластини $J_{ПМР}$ [119] відносно вісі, що проходить через її геометричний центр знаходиться як: $J_{ПМР} = m_{MP}(B^2 + L^2)/12$. Вплив ПЗ на момент інерції може бути врахований через додавання до маси МРБП еквівалентної маси, рівної F/g , тоді отримається вираз

$$M_{ДИНП} = \left(m_{MP} + \frac{F}{g} \right) \frac{L^2 + B^2}{12} \frac{d\omega_{MP}}{dt}. \quad (2.52)$$

Приймаючи $M_{ДИНП}$ парою еквівалентних динамічних сил опору з плечем B_{MP} , тоді еквівалентна динамічна сила опору від повороту, що діє на кожну з гусениць, може бути врахована як $F_{ДИНП} = M_{ДИНП}/B_{MP}$.

Тоді рівняння сил тяги гусениць в динаміці $F_{Т1Д}$ та $F_{Т2Д}$ виглядають як:

$$F_{ТiД} = F_{Ti} + F_{Лi} + F_{ДИНП},$$

Враховуючи (2.49), (2.51) – (2.52), складемо рівняння математичної моделі для кожної з гусениць МРБП:

$$\begin{aligned}
M_{EMi} = & \frac{J_{\text{я}}}{\eta_{\text{д}}} \frac{d\omega_{\text{д}}}{dt} + \frac{1}{k_{\text{р}}\eta_{\text{МП}}} \left[J_{\Sigma\text{К}} \frac{d\omega_{\text{К}}}{dt} + R_{\text{К}} \left(f \frac{G \cos \gamma + F}{2} + \right. \right. \\
& + G \sin \gamma \left(\frac{\cos \varphi_{\text{МП}}}{2} + j \frac{x_{\text{О}}}{B_{\text{МП}}} \sin \varphi_{\text{МП}} + j f \frac{h_{\text{Ц}}}{B_{\text{МП}}} \sin \varphi_{\text{МП}} \right) - \\
& - j \frac{\mu_{\text{ПОВ}} L (G \cos \gamma + F)}{4 B_{\text{МП}}} \left(1 + \frac{4 x_{\text{О}}^2}{L^2} \right) + F_{\text{ТО}} \left(\frac{1}{2} \cos \beta - \frac{(l - x_{\text{О}})}{B_{\text{МП}}} \sin \beta \right) + \\
& \left. + \left(\frac{G \cos \gamma + F}{2g} + j G \sin \gamma \sin \varphi_{\text{МП}} \frac{h_{\text{Ц}}}{g B_{\text{МП}}} \right) \frac{dV_{\text{Гі}}}{dt} + \left(m_{\text{МП}} + \frac{F}{g} \right) \frac{L^2 + B_{\text{МП}}^2}{12 B_{\text{МП}}} \frac{d\omega_{\text{МП}}}{dt} \right] \quad , (2.53)
\end{aligned}$$

де M_{EM1} та M_{EM2} – електромагнітні моменти двигунів відстаючої та забіжної гусениць відповідно; $\eta_{\text{МП}}$ – ККД мобільного роботу, $\eta_{\text{МП}} = \eta_{\text{д}}\eta_{\text{р}}\eta_{\text{Гр}}$. Вираз (2.53) представляє собою математичну модель динаміки МРБП.

Використовуючи отримані залежності (2.38)-(2.40), (2.45), (2.46), (2.50) (2.53) та параметри МРБП розроблені імітаційні моделі динаміки для комп'ютерного моделювання перехідних процесів основних технологічних параметрів робота, які зображені на рисунках 2.16–2.19 (перехідним процесом у даному випадку є реакція системи на вхідний ступінчатий сигнал за відповідним параметром [7, 32]).

З рисунку 2.16 видно залежність лінійної швидкості переміщення МРБП при подачі напруги 220 В на обидва привідні двигуни від кута нахилу робочої ФП: при збільшенні кута γ від 0 до 90° результуюча швидкість зменшується через збільшення навантаження, створюваного силою тяжіння. При $\gamma = 270^\circ$ робот рухається вниз, відповідно сила тяжіння сприяє переміщенню МРБП, тому його результуюча швидкість вища, ніж в попередніх випадках (верхня лінія 4 на рисунку 2.16).

Рисунок 2.17 показує, що для $\gamma = 60^\circ$ та живлення ДПС напругою 220 В при появі навантаження, наприклад, створюваного технологічною операцією очищення при значенні модельного часу 1 с, усталене значення швидкості переміщення після перехідного процесу зменшується та не повертається до попереднього значення, що вказує на необхідність синтезу та введення в імітаційну модель МРБП керуючих пристроїв (регуляторів).

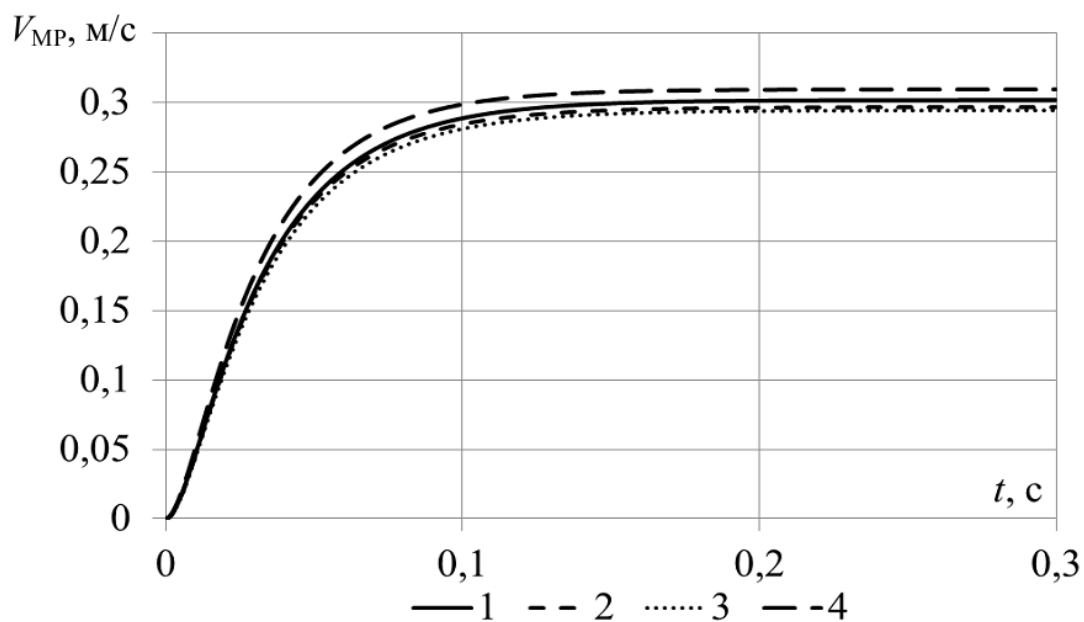


Рисунок 2.16 – Зміна лінійної швидкості МРБП для різних значень кута γ :

1 – $\gamma = 0^\circ$; 2 – $\gamma = 45^\circ$; 3 – $\gamma = 90^\circ$; 4 – $\gamma = 270^\circ$

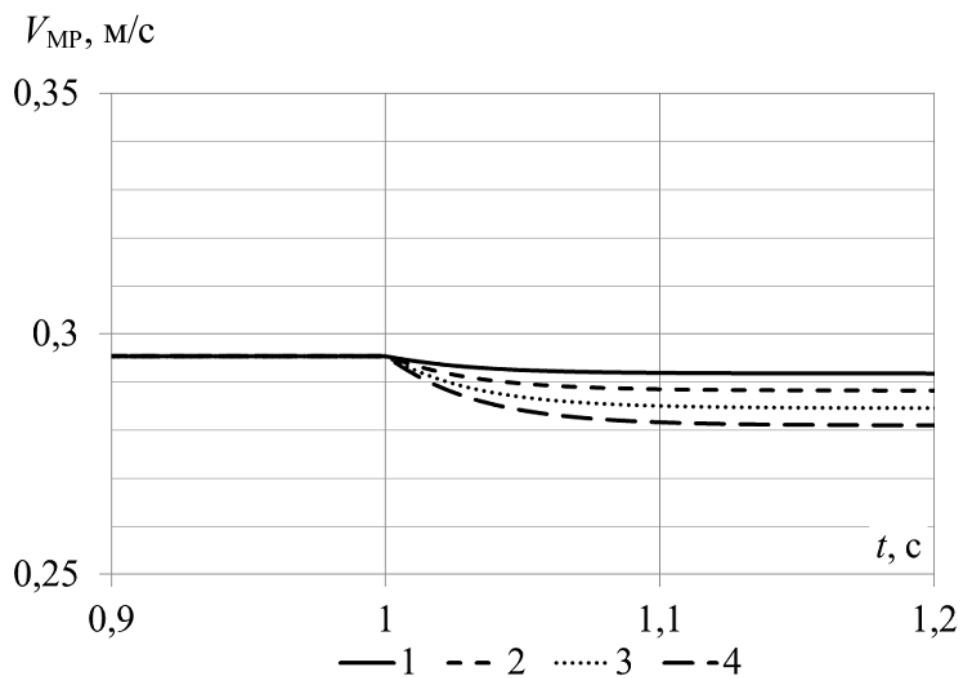


Рисунок 2.17 – Зміна лінійної швидкості переміщення при різних значеннях навантаження: 1 – 700 Н; 2 – 1400 Н; 3 – 2100 Н; 4 – 2800 Н

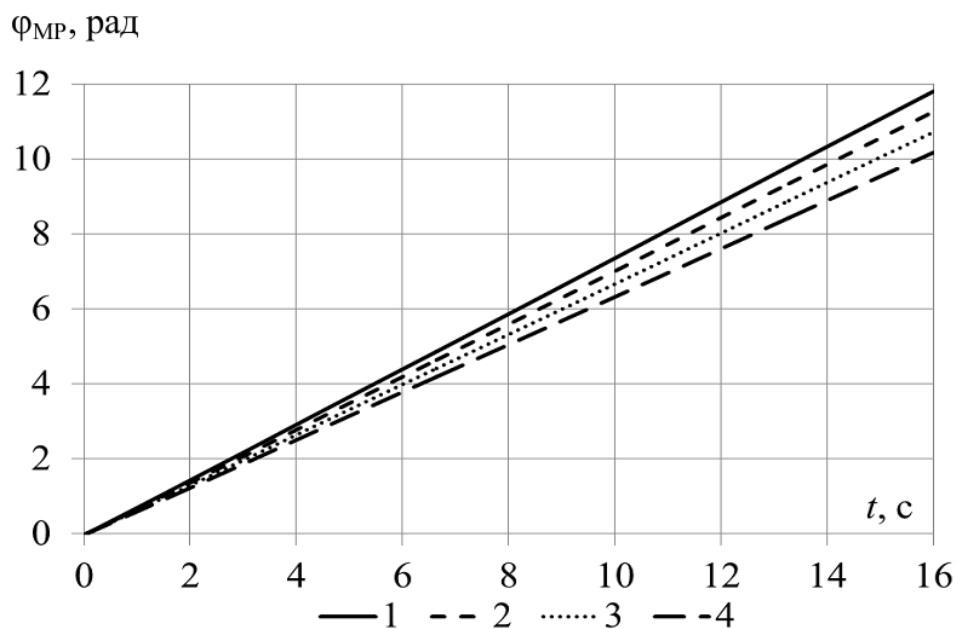


Рисунок 2.18 – Зміна кута повороту МРБП при різниці по модулю в живильній напрузі обох ДПС: 1 – $\Delta U_{12} = 0$ В; 2 – $\Delta U_{12} = 20$ В; 3 – $\Delta U_{12} = 40$ В;
4 – $\Delta U_{12} = 60$ В

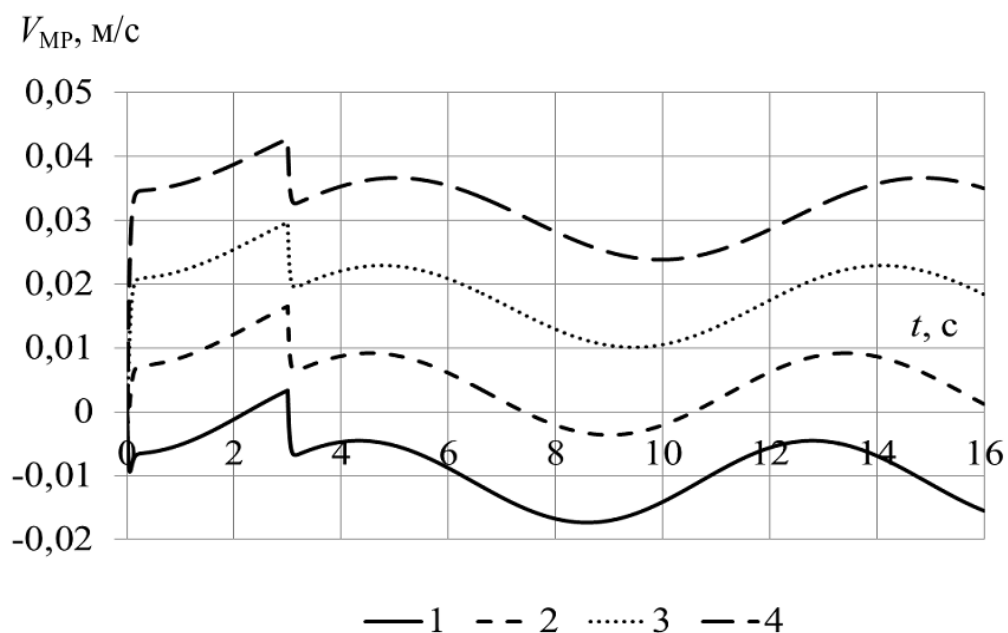


Рисунок 2.19 – Зміна лінійної швидкості переміщення МРБП при різниці по модулю в живильній напрузі обох ДПС ΔU_{12} : 1 – $\Delta U_{12} = 0$ В; 2 – $\Delta U_{12} = 20$ В;
3 – $\Delta U_{12} = 40$ В; 4 – $\Delta U_{12} = 60$ В

Повороти робота для зміни його курсу (кута $\varphi_{\text{МР}}$) здійснюються зміною живильної напруги на кожному з приводних двигунів. При цьому одночасно змінюється і лінійна швидкість переміщення всього МРБП. Зміна координат $\varphi_{\text{МР}}$ та $V_{\text{МР}}$ при різних значеннях живильної ДПС напруги (U_1 , U_2 – напруги на ДПС відстаючої та забіжної гусениць) показана на рисунках 2.18 та 2.19 відповідно, де через ΔU_{12} позначена різниця живильних напруг, $\Delta U_{12} = U_2 - |U_1|$.

З рисунку 2.18 видно лінійність залежностей $\varphi_{\text{МР}}$ від різниці напруг, що живлять приводні двигуни, для $\alpha = 60^\circ$ та при включенні навантаження 2,1 кН, створюваного технологічним обладнанням при значенні модельного часу 3 с. При цьому створюване технологічним інструментом навантаження не суттєво впливає на графік $\varphi_{\text{МР}}(t)$, а найбільша кутова швидкість робота $\omega_{\text{МР}}$ досягається при зустрічному вмиканні ДПС з напругами $U_2 = 220$ В, а $U_1 = -220$ В.

Рисунок 2.19 показує вплив різниці живильної ДПС напруги на значення $V_{\text{МР}}$ при $\alpha = 60^\circ$ та включенні навантаження 2,1 кН від ТО, при значенні модельного часу 3 с. Причому при збільшенні цієї різниці результуюча $V_{\text{МР}}$ збільшується, що пояснюється зміщенням центру повороту від геометричного центру робота. При включенні навантаження характер зменшення швидкості зберігається. Після 3 с моделювання швидкість має коливальний характер через коливання навантаження від сили тяжіння.

Отримані результати на рисунках 2.16–2.19 показують адекватність отриманих результатів за характером зміни основних технологічних параметрів до існуючих МРБП в аналогічних умовах [120]. У подальшому доцільно розглянути синтез регуляторів системи контролю та автоматичного керування просторовим рухом робота по похилій ФП.

2.5. Висновки за розділом 2

За результатами проведених в розділі 2 досліджень можна зробити наступні висновки.

Наведено детальний опис конструкторської та принципу функціонування МРБП з гусеничним рушієм та магнітокерованими колесами-рушіями. В результаті проведеного аналізу властивостей МРБП як багатокоординатного об'єкту

керування формалізовані основні завдання контролю та керування такого робота. Визначено, що найбільш важливими керованими координатами робота, здатного переміщуватися по похилих ФП, є швидкість, курсовий кут та ПЗ.

Розроблена математична модель магнітокерованого колеса-рушія, яка дозволяє досліджувати його динаміку та може застосовуватися при синтезі систем керування мобільних роботів на базі розглянутих коліс-рушіїв для автоматичного переміщення по ФП. Запропоновано механізм визначення потрібного значення ПЗ притискного магніту в залежності від поточного нахилу поверхні та коефіцієнта тертя.

Синтезована математична модель гусеничного МРБП, яка пов'язує конструктивні параметри, ПЗ, швидкість переміщення, курсовий кут, враховує залежність моменту опору повороту від радіусу повороту, а також збурення від виконуваної технологічної операції, та може бути застосована в подальших дослідженнях при розробці САК основними координатами мобільного робота. Розроблено механізм визначення потрібного значення ПЗ притискного магніту з урахуванням нахилу, параметрів поверхні та сили опору від технологічної операції, який дозволяє підвищити енергоефективність процесів переміщення гусеничного МРБП на 6,3 %. Проведені дослідження моделі робота показують наявність істотного впливу кута нахилу робочої поверхні та збурення від технологічної операції на основні керовані координати – курс, швидкість та ПЗ.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

При ефективній розробці МРБП не достатньо лише вибору найбільш вдалої конструкції, яка має в цілому забезпечувати його надійне безаварійне переміщення та виконання технологічних операцій. Велике значення має його САК, яка забезпечує задані показники якості та ефективності на складних ФП [6, 65, 121]. САК має отримувати інформацію про стан навколишнього середовища, зокрема робочої ФП, та про основні параметри робота [65, 66]. На основі цих даних та згідно із закладеним алгоритмом керування система має виробляти необхідні керуючі впливи, змінюючи поточний стан виконавчих механізмів, контролювати якість виконуваних роботом операцій [25, 52, 68, 69].

Як зазначалося в розділі 2, основними керованими координатами МРБП є притискне зусилля, курсовий кут та швидкість переміщення, тому процес розробки САК МРБП потребує всебічного врахування взаємовпливу цих координат, а також основних вузлів та компонентів робота [122-125], що є складним і важливим завданням автоматизації таких роботів. Зокрема, при проектуванні САК основними координатами мобільного робота необхідно враховувати, що їх значення безперервно змінюється під дією збурювальних факторів (змінюваний рельєф робочої поверхні, її товщина, наявність пошкоджень або обростань ФП, зміна характеру навантаження від технологічної операції) і безпосередньо залежать одна від одної [6]. Тому, САК МРБП повинні компенсувати взаємовплив керованих координат та впливи основних збурень таким чином, щоб забезпечити відтворення роботом заданих значень курсу, швидкості та ПЗ. Це дозволяє підвищити надійність, ефективність та економічні показники процесів переміщення та виконання заданих технологічних операцій МРБП.

Аналіз фізичних властивостей та технічних характеристик МРБП як об'єкта керування рухом та характеру похилих ФП показує доцільність розробки компонентів його САК із застосуванням теорії нечітких множин та штучних нейронних мереж [126-133]. Так, в системах автоматичного керування показали свою доцільність використання принципів інтелектуального керування на основі нечіткої логіки [127, 130, 131, 134, 135], штучних нейронних та нейро-нечітких мереж [128, 130, 132, 136 – 140], алгоритмів еволюційної оптимізації [128, 132, 141 – 145] та інших. Інтелектуальні технології успішно реалізуються в таких областях, як: робототехніка [146, 147], керування технологічними процесами [134, 137, 148], транспорт [149 – 151], медична діагностика та оцінка технологій охорони здоров'я [128, 152], освіта [153], технічна діагностика, економіка, інвестиції, фінанси, розпізнавання образів та інші [131, 148, 154 – 159].

3.1. Системи автоматичного керування основними параметрами гусеничного МРБП з традиційними регуляторами

Для забезпечення безаварійного переміщення МРБП та отримання високих показників якості виконуваних операцій необхідно здійснювати одночасне керування притискним зусиллям, курсом та швидкістю робота. Тому спочатку доцільно розглянути окремо системи керування цими параметрами з використанням класичних методів налаштування коефіцієнтів регуляторів.

Система керування швидкістю. На рисунку 3.1, а представлена функціональна схема САК швидкістю МРБП. Задане значення швидкості $V_{зш}$ встановлюється на задавальному пристрої ЗП. Сигнал із ЗП $u_{зш}$, відповідний заданому значенню швидкості $V_{зш}$, подається на суматор, де порівнюється з сигналом $u_{дш}$ датчика швидкості ДШ. Після суматора сигнал розузгодження ϵ подається на регулятор швидкості РШ, який визначає величину напруги $u_{рш}$, яку необхідно подати на підсилювач (транзисторний перетворювач ТП), щоб останній формував наругу $u_{тп}$ для двигунів постійного струму ДПС робота. З фізичної точки зору ТП сприймає керуючий сигнал у вигляді керуючої напруги $u_{рш}$, який регулює перемикання транзисторів, а відповідно і наругу $u_{тп}$, якою

живляться електродвигуни (рисунк 3.1). Далі двигуни перетворюють електричну енергію у механічну, яка виражається у сумарному корисному механічному моменті $M_{2\Sigma}$ на якорях електродвигунів, які обертаючись через редуктор приводить у дію ведуче колесо мобільного робота. На виході моделі МРБП отримується лінійна швидкість переміщення V_{MP} .

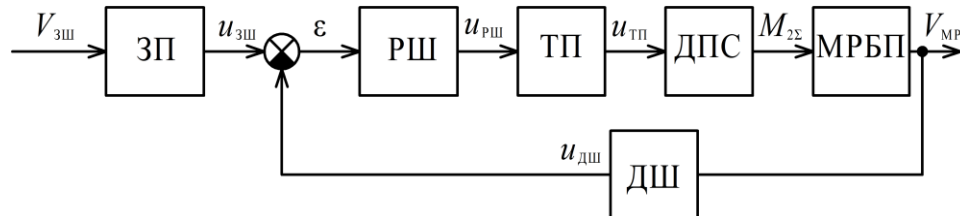


Рисунок 3.1 – Функціональна схема САК швидкістю МРБП

Привідні ДПС МРБП можуть живитися від батарейного джерела живлення або мережі змінного струму використовуючи керовані тиристорні або транзисторні перетворювачі. При застосуванні електродвигунів змінного струму використовують скалярні або векторні перетворювачі частоти [109]. Для живлення ДПС та ПЕ використовуються регульовані джерела живлення [109–111]. Широко розповсюдженою системою регульованого електроприводу з ДПС малої та середньої потужності є система ТП-ДПС (транзисторний перетворювач - двигун постійного струму). Основу схем ТП становлять керовані силові напівпровідникові прилади – транзистори, керування якими здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції [109]. Головною перевагою використання транзисторів для невисокої номінальної напруги та потужності ДПС (та і електромагнітів) є можливість реалізації високих частот перемикання за прийнятну ціну. Тому, враховуючи невисоку потужність на напругу живлення електромагнітів робота доцільно використати в якості регульованих джерел саме транзисторні перетворювачі. В САК виконавчими органами для спрощення розрахунків транзисторні перетворювачі зазвичай представляють у вигляді аперіодичної ланки [111]. Коефіцієнт підсилення ТП ДПС $k_{ТПД}$ може бути визначений як $k_{ТПД} = U_{ДН} / U_{ДК}$, де $U_{ДК}$ – напруга для керування двигуном; $U_{ДН}$ – номінальна напруга живлення двигуна.

Точне визначення сталої часу транзисторного перетворювача $T_{\text{ТП}}$ пов'язане з рядом труднощів, обумовлених особливостями ТП [32, 160]. Для практичних розрахунків $T_{\text{ТП}}$ приймають рівною 0,001..0,01 с. Тоді передаточна функція аперіодичної ланки транзисторного перетворювача, що живить ДПС:

$$W_{\text{ТПД}}(p) = \frac{k_{\text{ТПД}}}{T_{\text{ТП}}p + 1}.$$

Для контролю та керування швидкістю переміщення та курсовим кутом робота САК повинна містити інформаційно-вимірювальну частину у вигляді датчиків або обчислювальних пристроїв-ідентифікаторів, які служать для безаварійного керування позиціонуванням робота [161, 162].

Положення мобільного робота у просторі може визначатися безпосередньо, аналізуючи параметри обертового руху (кут повороту та швидкість обертання). Використовуючи ці параметри, можна визначити пройдений шлях кожним ведучим колесом від стартової точки, а відповідно, і координати МРБП (за умови відсутності буксування). Найчастіше в якості вимірювачів кута повороту та кутової швидкості обертання застосовують енкодери, які монтуються безпосередньо на вал двигуна та широко застосовуються в промисловості [161]. Через те, що енкодери є пропріоцептивними датчиками, їх оцінка положення є кращою в системі координат робота при вирішенні завдання локалізації робота на похилій ФП.

Тому у випадку застосування енкодера означимо передаточну функцію датчика швидкості робота через кутову швидкість обертання двигунів ведучих коліс пропорційною ланкою ($k_{\text{ДШ}}$ – коефіцієнти підсилення сигналу в зворотному зв'язку за швидкістю):

$$W_{\text{ДШ}}(p) = k_{\text{ДШ}} = \frac{k_p U_{\text{ДШН}}}{R_k \omega_{\text{ДН}}},$$

де $U_{\text{ДШН}}$ – вихідна напруга датчика швидкості, яка відповідає номінальній кутовій швидкості обертання двигуна $\omega_{\text{ДН}}$.

Тут слід зазначити, що такий спосіб вимірювання швидкості МРБП є досить надійним за відсутності буксування гусениць (відсутності їх проковзування вдносно робочої поверхні). Тому система керування МРБП має додатково містити засоби для контролю відсутності або наявності проковзування і відповідно збільшувати значення ПЗ до повного зникнення буксування. Ця можливість позитивно відрізняє мобільного робота для переміщення по похилих ФП від звичайних наземних роботів або транспортних засобів [117], які таких можливостей не мають (можуть переміщуватися лише по шляхах до певного максимального ухилу [118]).

У процесі аналізу САК визначаються показники якості, які свідчать про властивості системи. Задоволення необхідним значенням показників якості САК часто є достатньою умовою її працездатності [6, 32]. Для забезпечення заданих показників якості керування різним технологічним обладнанням широко використовуються типові закони керування, які лежать в основі синтезу керуючих пристроїв, зокрема ПІД-регуляторів [43]. Керуючим пристроєм системи, представленої на рисунку 3.1 є РШ, який в залежності від сигналу помилки ε виробляє керуючий вплив на обидва ДПС через ТП (за сумісного керування ДПС). Передаточна функція традиційного ПІД-регулятора швидкості в операторній формі для САК швидкістю має вигляд [32, 38]

$$W_{\text{РШ}}(p) = \frac{u_{\text{РШ}}(p)}{\varepsilon(p)} = k_{\text{ПРШ}} + \frac{k_{\text{ІРШ}}}{p} + k_{\text{ДРШ}} p,$$

де $k_{\text{ПРШ}}$, $k_{\text{ІРШ}}$, $k_{\text{ДРШ}}$ – коефіцієнти підсилення пропорційної, інтегральної та диференційної складової регулятора швидкості.

В якості цільової функції в даному випадку пропонується використання квадратичного інтегрального відхилення реального значення швидкості $V_{\text{МР}}$ мобільного робота від заданого $V_{\text{ЗШ}}$:

$$\min_{\mathbf{Q}} f(t, \mathbf{Q}) = \min_{\mathbf{Q}} \left[\int e_v(t, \mathbf{Q})^2 dt \right] = \min_{\mathbf{Q}} \left[\int (V_{\text{ЗШ}}(t) - V_{\text{МР}}(t))^2 dt \right], \quad (3.1)$$

де $f(t, \mathbf{Q})$ – квадратичне інтегральне відхилення реального значення швидкості в контурі швидкості V_{MP} від заданого V_3 ; $\mathbf{Q}$ – вектор параметрів оптимізації; e_V – помилка керування за швидкістю.

Вектор параметрів оптимізації в даному випадку має наступний вигляд:

$$\mathbf{Q} = \{k_{ПРШ}, k_{ІРШ}, k_{ДРШ}\}.$$

Початкові значення коефіцієнтів ПІД-РШ перед оптимізацією обираються рівними 1, а для оптимізації коефіцієнтів застосовуються ітераційні процедури:

$$k_{uРШ}[s+1] = k_{uРШ}[s] - \xi[s] \left. \frac{\partial f(\mathbf{Q})}{\partial k_{uРШ}} \right|_{k_{uРШ}[s]},$$

де ξ – крок градієнтного спуску; s – номер ітерації; u приймає значення П, І, Д для кожної складової ПІД-РШ. Процедури параметричної оптимізації доцільно здійснювати за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для математичного, структурного та імітаційного моделювання [97].

Перехідні процеси системи керування швидкістю мобільного робота з різними типами класичних регуляторів (з ПІ та ПІД регуляторами) наведені на рисунку 3.2. Для моделювання обрані значення коефіцієнтів, що отримані в результаті параметричної оптимізації за інтегрально-квадратичним критерієм (3.1): $k_{ПРШ} = 24,6$, $k_{ІРШ} = 1064,8$, $k_{ДРШ} = 0,2$ (ПІД-регулятор) та $k_{ПРШ} = 6,5$, $k_{ІРШ} = 422,4$ (ПІ-регулятор), передаточна функція ПД-регулятора швидкості не розглядається, так як система має дуже великий час перехідного процесу (10^3 с).

Ефективність тих чи інших САК в теорії автоматичного керування визначають за показниками якості керування, серед яких: час перехідного процесу t_p ; σ_{max} – перерегулювання, $\sigma_{max} = \frac{V_{max} - V_{уст}}{V_{уст}} \cdot 100\%$ (V_{max} – максимальне значення V_{MP} , $V_{уст}$ – усталене значення V_{MP}); $\delta_{ст}$ – відносна статична помилка, $\delta_{ст} = \frac{V_{зш} - V_{уст}}{V_{зш}} \cdot 100\%$; μ – коливальність (число переходів через значення V_{MP} за час t_p) [32].

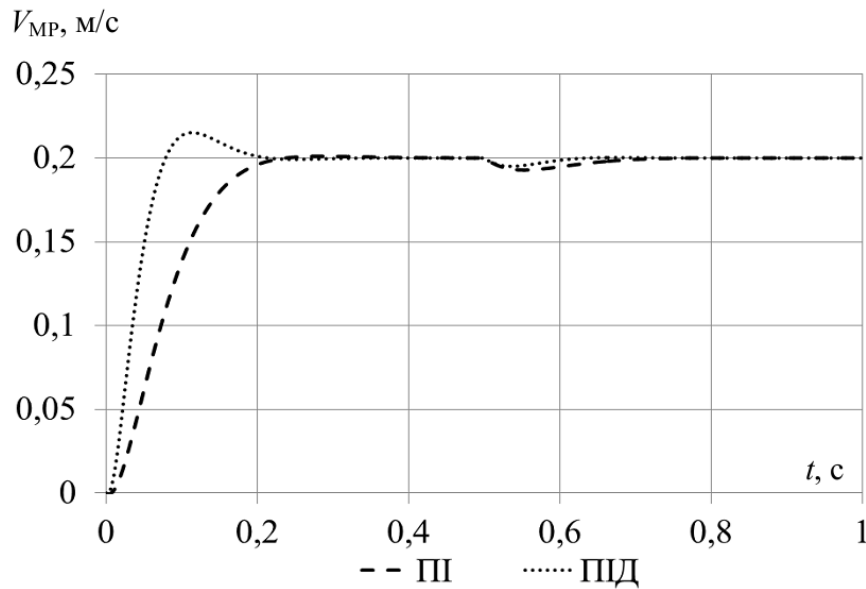


Рисунок 3.2 – Перехідні характеристики САК швидкістю робота з ПІ та ПІД регуляторами

З рисунку 3.2 видно, що САК лінійною швидкістю переміщення МРБП з ПІ та ПІД-регуляторами не мають статичної помилки ($\delta_{ст} = 0$). В системі з ПІД-регулятором присутнє перерегулювання ($\sigma_{max} = 7,6 \%$) та коливальність ($\mu = 1$), а час перехідного процесу t_p складає 0,146 с. Для системи з ПІ-регулятором $t_p = 0,175$ с, а перерегулювання та коливальність відсутні ($\sigma_{max} = 0$, $\mu = 0$). Тому, незважаючи на більший час перехідного процесу (на 20 %) для керування швидкістю МРБП рекомендовано застосування саме ПІ-регулятора.

Система керування курсом. Згідно з поставленими задачами сформуємо функціональну схему САК курсом МРБП та проведемо аналіз показників якості керування розробленої системи з різними типами регуляторів за допомогою імітаційного моделювання.

Функціональна схема автоматичного керування курсом МРБП представлена на рисунку 3.3. Задане значення курсового кута $\varphi_{ЗК}$ встановлюється на задавальному пристрої ЗП. Сигнал із ЗП $u_{ЗК}$, відповідний заданому значенню кута повороту робота $\varphi_{ЗК}$, подається на суматор, де далі порівнюється з сигналом $u_{ДК}$ датчика кута повороту ДК, який фізично враховує, по суті, сигнали з двох енкодерів, розміщених на ДПС правої (ПГ) та лівої гусениць (ЛГ). Після суматора сигнал розузгодження ε подається на регулятор

кута РК, який визначає величину напруги $u_{РК}$, яку необхідно подати на транзисторні перетворювачі ТП з різними знаками (для повороту проти годинникової стрілки на ПГ – зі знаком «+», а на ЛГ – зі знаком «-»). Далі ТП формують відповідну наругу $u_{ТППГ}$ та $u_{ТПЛГ}$ ($u_{ТППГ} = -u_{ТПЛГ}$) для ДПС МРБП. Далі електродвигун ПГ розвиває крутний момент $M_{2ПГ}$, а електродвигун ЛГ розвиває крутний момент $M_{2ЛГ}$, які приводять у дію ведучі колеса кожної гусениці МРБП, та повертають робота на кут $\varphi_{МР}$.

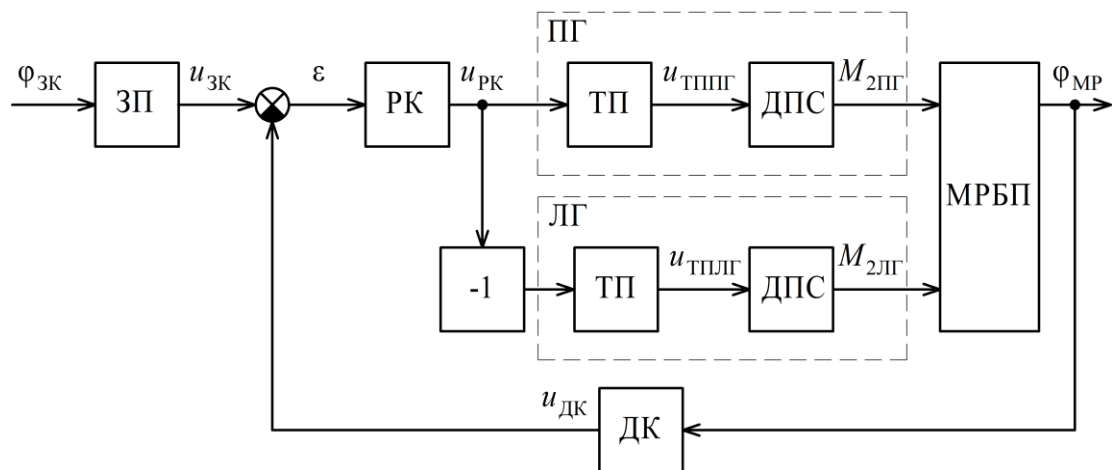


Рисунок 3.3 – Функціональна схема автоматичного керування курсом МРБП

Поточне значення кута повороту МРБП у разі відсутності буксування може бути визначено за допомогою двох енкодерів, встановлених на кожному з ДПС. Тоді означимо передаточну функцію датчика кута повороту робота через кут обертання валів двигунів ведучих коліс пропорційною ланкою ($k_{ДК}$ – коефіцієнт підсилення сигналу в зворотному зв'язку за кутом):

$$W_{ДК}(p) = k_{ДК} = \frac{B_{МР} k_p U_{ДКН}}{R_k \varphi_{ДН}},$$

де $U_{ДКН}$ – вихідна напруга датчика кута, яка відповідає деякому куту повороту вала двигуна $\varphi_{ДН}$. Необхідно зазначити, що такий спосіб вимірювання поточного курсу МРБП може бути засований також за відсутності буксування.

Аналогічно, як і для системи керування швидкістю, проведено налаштування РК САК мобільного робота за методом параметричної

оптимізації для трьох типів регуляторів кута з параметрами: $k_{\text{ПРК}} = 172,3$, $k_{\text{ІРК}} = 0,8$, $k_{\text{ДРК}} = 0,1$ (ПІД-регулятор); $k_{\text{ПРК}} = 24$, $k_{\text{ІРК}} = 0,1$ (ПІ-регулятор); $k_{\text{ПРК}} = 48,5$, $k_{\text{ДРК}} = 5,2$ (ПД-регулятор).

Перехідні процеси системи керування курсом мобільного робота для повного оберту ($\varphi_{\text{МР}} = 2\pi$ рад) з різними типами регуляторів кута повороту (з ПД, ПІ та ПІД регуляторами) наведені на рисунку 3.4. З перехідних процесів видно, що САК курсом МРБП з ПД-регулятором не має статичної помилки, на відміну від систем з ПІ ($\delta_{\text{ст}} = 1,75\%$) та ПІД-регуляторами ($\delta_{\text{ст}} = 1,91\%$). Крім того, час перехідного процесу для систем з ПД та ПІД-регуляторами однаковий та складає 8,09 с, для системи з ПІ-регулятором $t_p = 8,13$ с (тобто t_p приблизно рівні). Для всіх САК є спільним відсутність перерегулювання $\sigma_{\text{max}} = 0\%$ та коливальності $\mu = 0$. Тому через відсутність статичної помилки та найменший t_p САК з ПД-регулятором має найкращі показники якості.

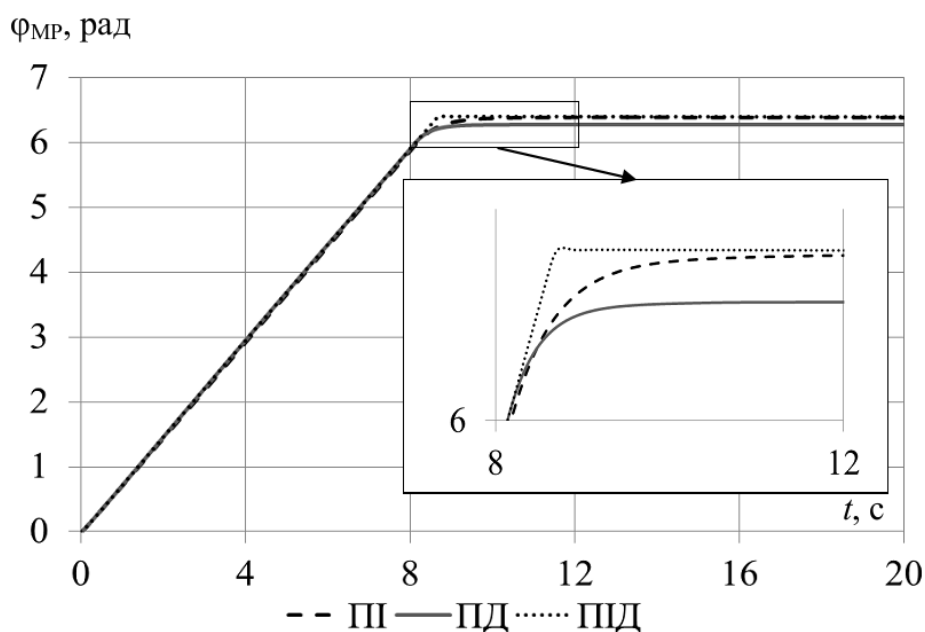


Рисунок 3.4 – Перехідні процеси САК курсом з різними типами регуляторів

Система керування притискним зусиллям. На рисунку 3.5 представлена функціональна схема САК ПЗ МРБП. Задане значення притискної сили $F_{\text{ЗС}}$ встановлюється на задавальному пристрої ЗП. Сигнал із ЗП $u_{\text{ЗС}}$, відповідний заданому значенню ПЗ $F_{\text{ЗС}}$, подається на суматор. Після суматора сигнал розузгодження ε подається на регулятор сили РС, який визначає величину

напруги u_{PC} , яку необхідно подати на підсилювач (ТП), щоб останній формував наругу u_{TP} для ПЕ робота, яка відповідає заданій силі. ПЗ F електромагнітів мобільного робота відслідковується датчиком сили ДС, який формує сигнал зворотного зв'язку $u_{ДС}$ для корекції подальшого притиску. Потрібне значення ПЗ гусеничного МРБП розраховується за виразом (2.45). Структурна модель ПЕ розглянута в розділі 2 (рисунок 2.9).

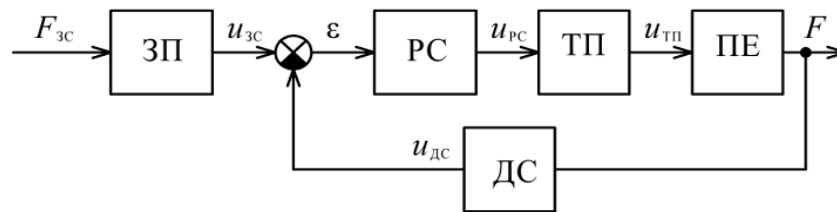


Рисунок 3.5. Функціональна схема керування ПЕ мобільного робота

Для реалізації функції зворотного зв'язку за ПЗ робота містить датчик сили ДС на рисунку 3.5. Передаточна функція елементів зворотного зв'язку за силою може бути представлена підсилювальною ланкою з коефіцієнтом підсилення ДС $k_{ДС} = U_{НДС} / F_{ДС\max}$, де $U_{НДС}$ – номінальна напруга живлення датчика; $F_{ДС\max}$ – максимальне вимірюване зусилля датчика. Тут слід відзначити, що такий прямий спосіб вимірювання ПЗ має обмежене застосування, так як підходить для досить рівних поверхонь без наявності ускладнень рельєфу, наприклад обростань, високих зварних швів і т. ін. Засоби визначення ПЗ МРБП при наявності невизначеностей ФП детальніше розглядаються в розділі 3.3.

Керуючим пристроєм системи, представленої на рисунку 3.5, є РС. Для моделювання перехідних процесів коефіцієнти в передаточній функції традиційних регуляторів сили ($k_{ПРС}$, $k_{ІРС}$, $k_{ДРС}$) отримані в результаті параметричної оптимізації за інтегрально-квадратичним критерієм [32]: $k_{ПРС} = 8,2$, $k_{ІРС} = 11,8$, $k_{ДРС} = 0,8$ (ПІД-регулятор); $k_{ПРС} = 0,16$, $k_{ІРС} = 4,83$ (ПІ-регулятор); $k_{ПРС} = 15,16$, $k_{ДРС} = 11,84$ (ПД-регулятор). Перехідні процеси системи керування ПЗ МРБП з різними типами класичних регуляторів (з ПД, ПІ та ПІД регуляторами) наведені на рисунку 3.6 для заданого значення, яке

відповідає розрахунковому ПЗ ПЕ робота при $F_{TO} = 0,5G$, $\mu' = 0,6$, $f = 0,015$, $\gamma = 120^\circ$.

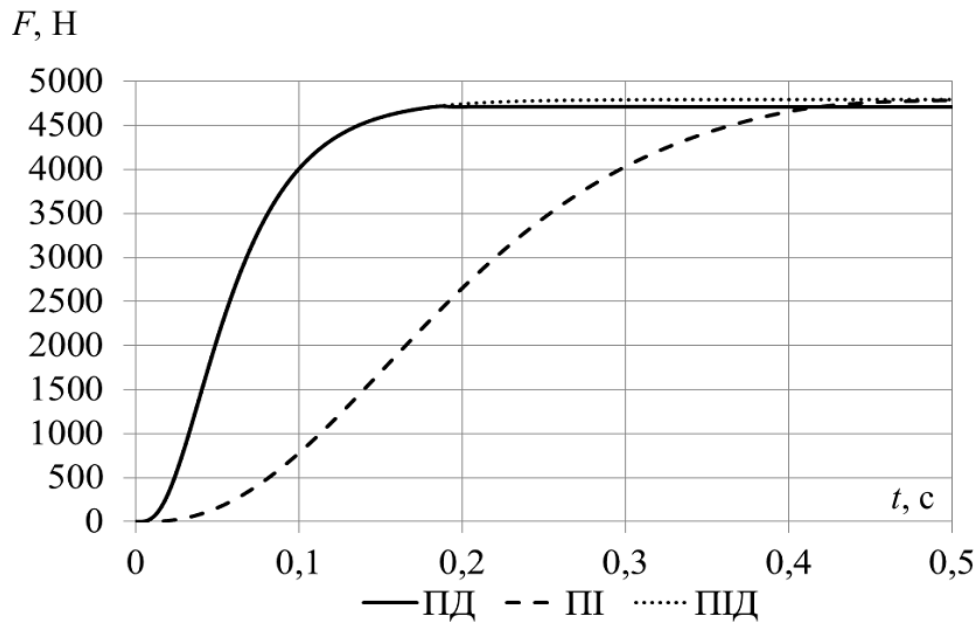


Рисунок 3.6 – Перехідний процес САК ПЗ з ПД, ПІ та ПІД регуляторами

З рисунку 3.6 видно, що САК ПЕ МРБП з ПД-регулятором має невелику статичну помилку ($\delta_{СТ} = 0,02 \%$). САК ПЕ МРБП з ПІ- та ПІД-регуляторами дозволяють підвищити точність керування та позбавитися статичної помилки ($\delta_{СТ} = 0 \%$). Однак, САК з ПІ-регулятором показує найдовший час регулювання ($t_p = 0,4$ с) для притиску робота до ФП (для двох інших t_p складає по $0,17$ с). Для всіх розроблених САК є спільним відсутність відносного перерегулювання $\sigma_{max} = 0 \%$ та коливальності $\mu = 0$. Тому за рахунок меншого часу регулювання та відсутності статичної помилки САК з ПІД-регулятором має кращі показники.

3.2. Багатозв'язна система автоматичного керування МРБП з нейрорегулятором просторового руху

Далі доцільно розглянути багатозв'язну функціональну структуру САК просторовим рухом МРБП, яка буде враховувати системи керування окремими координатами, а також взаємовплив основних керованих координат.

Багатозв'язна САК МРБП. На рисунку 3.7 представлена загальна функціональна схема САК просторового руху МРБП [6, 36, 40], де прийнято

наступні позначення: $V_{зш}$, $\varphi_{зк}$ – задані значення швидкості переміщення та кутової координати МРБП; $u_{зш}$, $u_{зк}$ – сигнали на виході ЗП, що відповідають $V_{зш}$, $\varphi_{зк}$; $\varepsilon_{ш}$, $\varepsilon_{к}$ – сигнали розузгодження, які подаються на регулятор просторового руху РПР; $u_{рк}$, $u_{рш}$ – величини напруг, які визначаються взаємозв'язаними регуляторами кута повороту РК та швидкості РШ; $u_{рппл}$ та $u_{рппр}$ – напруги, що подаються на кожний ТП правої ПГ та лівої гусениць ЛГ; $u_{тппг}$ та $u_{тплг}$ – напруги живлення привідних ДПС; $M_{2пг}$, $M_{2лг}$ – корисні механічні моменти на валах ДПС ПГ та ЛГ; $M_{нпг}$, $M_{нлг}$ – моменти опору (навантаження), що діють на вали ДПС ПГ та ЛГ через редуктор від привідних коліс; $u_{дк}$, $u_{дш}$ – сигнали зворотного зв'язку з датчиків кута повороту ДК та швидкості ДШ; $V_{мр}$, $\varphi_{мр}$ – лінійна швидкість та кутова координата робота.

Спочатку, для моделювання роботи багатозв'язної САК МРБП були використані регулятори, синтезовані в розділі 3.1 (вважається, що потрібне ПЗ робота вже створено до початку переміщення), крім того, РШ та РК додатково містять обмежувач напруги ($0 \leq U_{рш} \leq 10$ В, $0 \leq U_{рк} \leq 10$ В). Таким чином для каналу швидкості в САК МРБП застосовано ПІ-регулятор, а для каналу кута – ПД-регулятор. Використовуючи задані параметри МРБП та розроблену функціональну схему його САК (рисунок 3.7), отримані перехідні процеси за швидкістю та кутом повороту робота, основні показники якості керування.

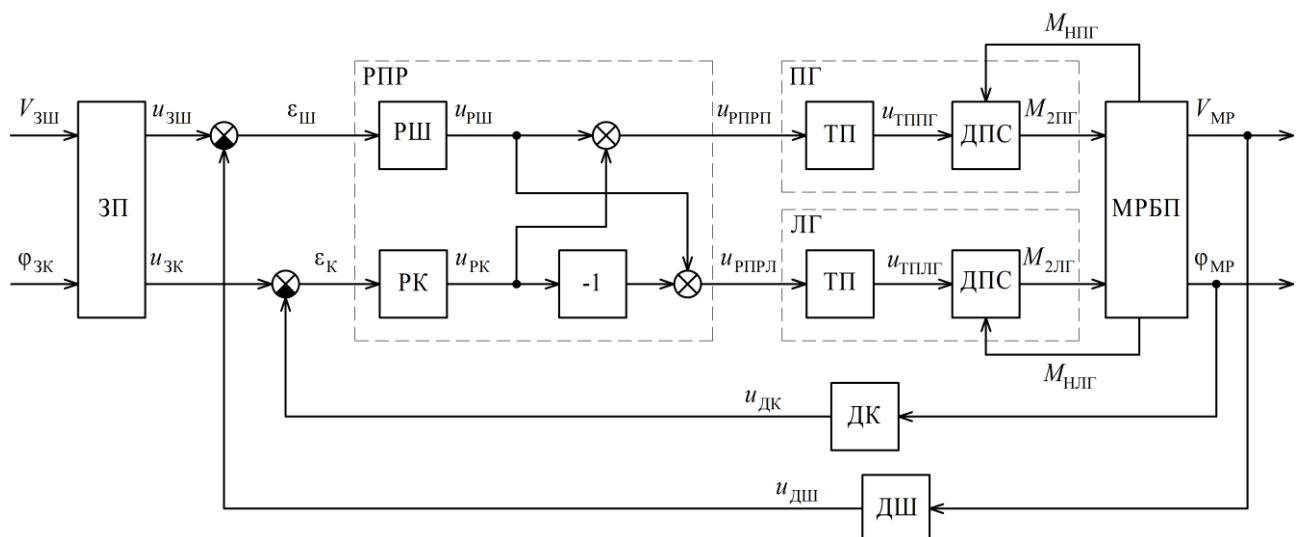


Рисунок 3.7 – Функціональна схема системи автоматичного керування просторовим рухом багатоцільового мобільного робота

На рисунку 3.8 та рисунку 3.9 показані перехідні процеси керування мобільним роботом з ПІ-регулятором швидкості та ПД-регулятором кута повороту з урахуванням взаємовпливу систем керування швидкістю та кутом повороту МРБП та без урахування цього взаємовпливу (при виключенні із загальної схеми на рисунку 3.7 системи керування кутом повороту – для рисунку 3.8, та при виключенні із загальної схеми на рисунку 3.7 системи керування швидкістю – для рисунку 3.9). За результатами комп'ютерного моделювання визначені показники якості розробленої САК лінійною швидкістю та кутом повороту робота при подачі вхідного ступінчатого сигналу (пуск системи з початкового положення для $\varphi_{\text{МР}} = 0$ рад та $V_{\text{МР}} = 0$ м/с згідно з рисунками 3.8 – 3.9). Основні показники якості керування зведені у таблиці 3.1, де «1» у стовпці відповідає багатозв'язній системі з урахуванням обидвох каналів керування, «2» – багатозв'язній системі без урахування каналу керування кутом, «3» – багатозв'язній системі без урахування каналу керування швидкістю. З таблиці 3.1 видно, що перехідний процес за швидкістю має значно більший час регулювання (4,6 с) та суттєве перерегулювання (27 %) при врахуванні впливу системи керування кутом повороту у порівнянні з САК без урахування даного впливу (0,18 с та 0 % відповідно).

САК кутом повороту МРБП має дещо більший час регулювання при врахуванні впливу системи керування швидкості у порівнянні з САК без урахування даного впливу (на 41 %), крім того, з'являється висока статична помилка – 4,8 %. Отже, при врахуванні взаємовпливу обох каналів керування класичний регулятори кута та швидкості не забезпечують високі показники якості керування основними параметрами МРБП.

Необхідно зазначити, що покращити якість керування за допомогою метода параметричної оптимізації почерговим налаштуванням регуляторів швидкості та кута в багатозв'язній САК МРБП не вдалося. Тому для підвищення якості керування за швидкістю та курсом мобільного робота в подальшому доцільно розглянути ефективність методів та засобів штучного інтелекту [6, 61, 145], зокрема нейромережевих технологій [163].

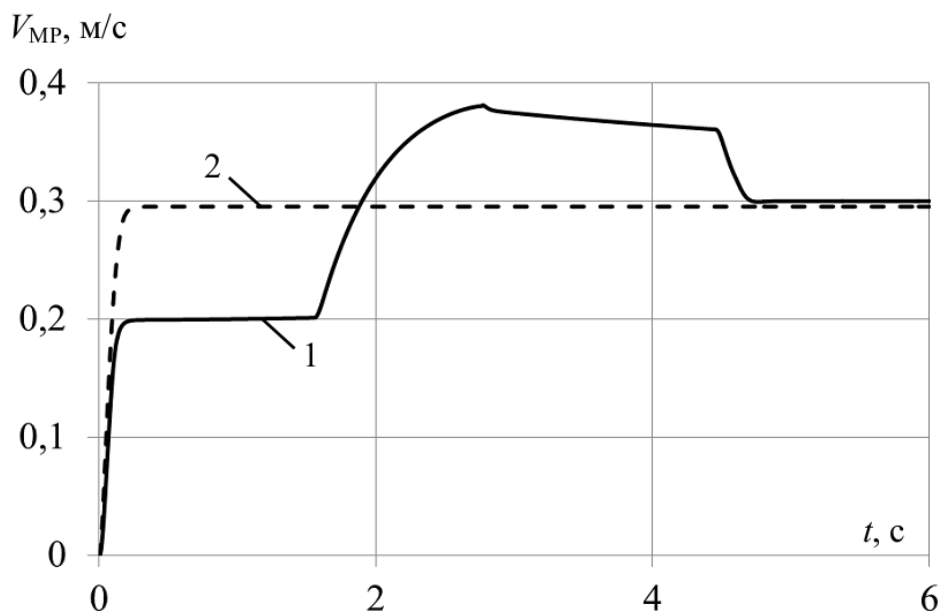


Рисунок 3.8 – Перехідні процеси системи керування швидкістю:

1 – з врахуванням взаємовпливу систем керування швидкістю та кутом повороту; 2 – без урахування системи керування кутом повороту

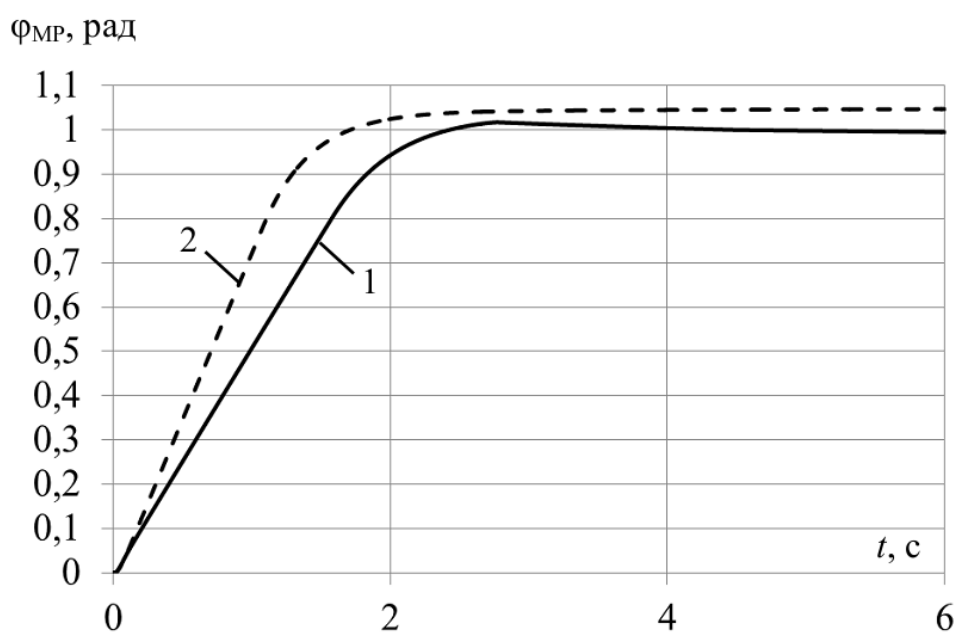


Рисунок 3.9 – Перехідні процеси системи керування кутом повороту:

1 – з врахуванням взаємовпливу систем керування швидкістю та кутом повороту; 2 – без урахування системи керування швидкістю

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз показників якості САК просторовим рухом

Показники якості	Значення показників якості САК			
	Перехідний процес за швидкістю		Перехідний процес за кутом	
	1	2	1	3
$\sigma_{\max}, \%$	27	0	0	0
t_p, c	4,6	0,18	2,36	1,68
$\delta_{\text{СТ}}, \%$	0	1,5	4,8	0
μ	1	0	0	0

Синтез нейрорегулятора просторового руху. Аналіз методів і підходів передової теорії керування вказує на доцільність вирішення задачі розробки САК просторовим рухом МРБП з використанням принципів інтелектуального керування, які базуються на штучних нейронних мережах і нечітких системах [164]. У свою чергу, багатошарові нейронні мережі найчастіше використовуються для вирішення задач керування нелінійними багатовимірними об'єктами [165]. Такими мережами є структури з прямими зв'язками, в яких інформація передається в прямому напрямку, від входів до виходів, через приховані шари [166]. При достатній кількості нейронів у прихованих шарах дані мережі забезпечують різноманітні нелінійні залежності з високою заданою точністю, використовуючи сигмоїдальну функцію активації.

Для ефективного використання нейроконтролерів при керуванні складними, мало дослідженими, об'єктами керування, такими як МРБП, необхідно застосовувати ефективні методи та алгоритми їх навчання [167, 168]. Сучасні дослідження ряду вчених з усього світу показують, що еволюційні та багатоагентні підходи добре зарекомендували себе при навчанні, синтезі та оптимізації нейронних мереж та інших інтелектуальних систем [166, 169, 170].

Функціональна структура двоканальної САК просторовим рухом МРБП на основі складеного нейронного регулятора просторового руху (НРПР) представлена на рисунку 3.10, де використовуються наступні позначення: $u_{\text{РПРП}}$

та $u_{\text{РПРЛ}}$ – напруги, що подаються на кожний ТП правої ПГ та лівої гусениць ЛГ від НРПР; $V_{\text{МРБ}}$, $\varphi_{\text{МРБ}}$ – бажані значення лінійної швидкості та кутової координати робота на виході еталонної моделі для швидкості (ЕМШ) та еталонної моделі для кута (ЕМК), f_{Σ} – значення комплексної фітнес-функції, що розраховується у блоці розрахунку фітнес-функції (БРФФ), $\mathbf{P}$ – вектор параметрів (вагових коефіцієнтів) нейронної мережі НРПР, який синтезується на виході блоку розрахунку вагових коефіцієнтів (БРВК).

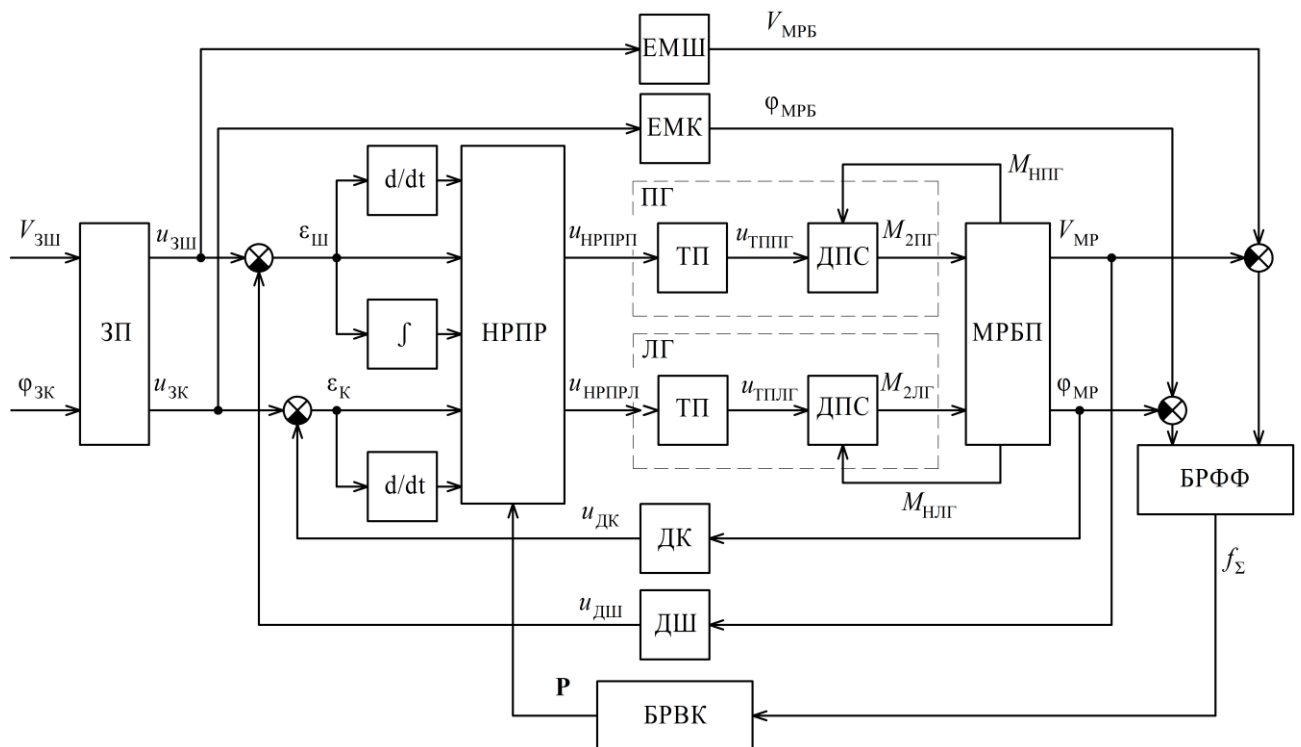


Рисунок 3.10 – Модифікована структура САК МРБП з додатковими блоками для налаштування нейронного регулятора просторового руху

Запропонований НРПР має на меті одночасне врахування взаємовпливу каналів керування для координат МРБП – $V_{\text{МР}}$ та $\varphi_{\text{МР}}$, а також ряд особливостей робота як нелінійного об'єкта керування. Вхідні змінні цього регулятора: $\varepsilon_{\text{Ш}}$, $d\varepsilon_{\text{Ш}}/dt$, $\int \varepsilon_{\text{Ш}} dt$, $\varepsilon_{\text{К}}$ та $d\varepsilon_{\text{К}}/dt$, а виходи: $u_{\text{РПРП}}$ та $u_{\text{РПРЛ}}$. По суті, НРПР дозволяє замінити два окремі класичні контролери швидкості і кута, які використовуються в двоканальних САК МРБП [6]. Поєднання окремих регуляторів швидкості та кута в одному комплексному регуляторі виглядає дуже перспективним, як спосіб поліпшення показників якості керування. П'ять

входів НРПР отрималося в результаті багатокрокового процесу синтезу, що містить дві процедури, які взаємодіють між собою: структурний та параметричний синтез.

Структурний синтез інтелектуального нейрорегулятора є досить важливим завданням, оскільки на цьому етапі формується топологія нейронних мереж, вибираються функції активації нейронів, які додатково визначають принцип функціонування мережі та її ефективність для вирішення проблеми керування. Вибір надлишкової кількості прихованих шарів і кількості нейронів може призвести до перенавчання або втрати апроксимаційних властивостей мережі [164]. Тому доцільно використовувати конструктивний метод пошуку оптимальної структури нейронної мережі, який починає пошук з мінімально можливої архітектури мережі (нейронна мережа з мінімальним числом шарів, нейронів і міжнейронних зв'язків) і послідовно додає нові шари, нейрони і міжнейронні зв'язки на кожній ітерації. При пошуку оптимальної структури моделі з'єднань важливо встановити такі параметри, як кількість нейронів в кожному шарі, матриця зв'язків між нейронами мережі, а також вибір параметрів нейронів (параметричний синтез), що утворюють мережу. Модель з'єднань інтелектуального НРПР може бути представлена у вигляді багатовимірної функції, яка залежить від структури та параметрів мережі [166].

Для правильного використання НРПР при керуванні МРБП необхідно застосовувати ефективні методи та алгоритми його навчання [61, 62]. Генетичний алгоритм (ГА) є еволюційним підходом, який добре зарекомендував себе при навчанні, синтезі та оптимізації нейронних мереж та інших інтелектуальних систем [166]. ГА є універсальним методом оптимізації і може бути використаний як основа методу синтезу комплексного НРПР.

Загальна схема налаштування НРПР за допомогою ГА також міститься на рисунку 3.10. В САК МРБП міститься дві еталонні моделі – ЕМШ та ЕМК, які є опорними моделями швидкості і кута та описують бажану реакцію мобільного робота за швидкістю $V_{\text{МРБ}}(t)$ і кутом $\varphi_{\text{МРБ}}(t)$ в найближчому описі для будь-яких заданих впливів $u_{\text{ЗШ}}(t)$ та $u_{\text{ЗК}}(t)$. Згадані еталонні моделі можуть бути набагато

простішими, ніж модель робота для кожного каналу керування [166] і можуть бути представлені передаточними функціями $W_{\text{ЕМШ}}$ та $W_{\text{ЕМК}}$ відповідно:

$$W_{\text{ЕМШ}}(p) = \frac{V_{\text{МРБ}}(p)}{u_{\text{ЗШ}}(p)} = \frac{1}{(T_{\text{ЕМШ}}p + 1)^\chi},$$

$$W_{\text{ЕМК}}(p) = \frac{\varphi_{\text{МРБ}}(p)}{u_{\text{ЗК}}(p)} = \frac{1}{(T_{\text{ЕМК}}p + 1)^\lambda},$$

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

Альтернативні варіанти параметрів НРПР **P** (рисунок 3.10) кодуються з використанням хромосом. Для оцінки придатності кожної хромосоми необхідно виконати моделювання перехідного процесу з параметрами **P** НРПР для даних $u_{\text{ЗШ}}(t)$ та $u_{\text{ЗК}}(t)$. Враховуючи наявність двох каналів керування, вхідним параметром БРВК (який працює на базі ГА) є комплексна фітнес-функція f_Σ , що враховує якість керування при взаємному впливі обох каналів та розраховується в БРФФ:

$$f_\Sigma = k_f f_{\text{Ш}} + f_{\text{К}} = k_f \sum_{k=1}^W (V_{\text{МРБ}_k} - V_{\text{МР}_k})^2 + \sum_{k=1}^W (\varphi_{\text{МРБ}_k} - \varphi_{\text{МР}_k})^2 \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

де $f_{\text{Ш}}$, $f_{\text{К}}$ – фітнес-функції за каналами швидкості та кута; k_f – ваговий коефіцієнт; W – кількість точок. Тобто, дві фітнес-функції (у каналах швидкості та кута) об'єднуються у загальну f_Σ з урахуванням вагового коефіцієнта k_f для $f_{\text{Ш}}$ за рахунок можливого різного порядку у значеннях $f_{\text{Ш}}$ та $f_{\text{К}}$. Тоді оцінки якості керування (адаптивності кожної хромосоми) проводяться на основі значення f_Σ . Відносну адаптивність хромосоми Q_X можна розрахувати як $Q_X = 1/(1 + f_\Sigma)$.

Закон керування синтезується за допомогою ГА в результаті багаторазових експериментів з імітаційною моделлю мобільного робота. При адекватній роботі НРПР, виходи моделі МРБП і еталонних моделей повинні бути близькими, тому завдання налаштування нейронного регулятора полягає у завданні мінімізації фітнес-функції f_Σ . На додачу до критерію (3.2) можуть бути використані традиційні показники якості перехідних процесів (t_p , σ_{max} , μ і т.д.).

Отже, запропонований процес синтезу інтелектуального нейронного контролера може бути представлений послідовністю наступних кроків.

Крок 1. Відповідно до складності і порядку об'єкта керування вибираються входи і виходи нейронного контролера (помилка, похідна та інтеграл помилки).

Крок 2. Визначення граничних значень параметрів структури НРПР (максимальне число прихованих шарів, нейронів і міжнейронних зв'язків нейронної мережі).

Крок 3. Виконання параметричної оптимізації вагів нейронної мережі із заданою архітектурою за допомогою ГА.

Крок 3.1. Кодування параметрів хромосомою.

Хромосома складається з генів, кожен з яких є параметром НРПР. Двійкові або реальні числа можуть використовуватися для представлення генів. Так, ваговий коефіцієнт між першим вхідним нейроном і першим нейроном прихованого шару кодується як w_{11} , між другим входом і третім прихованим нейроном – w_{23} . У цьому випадку всі ваги між вхідними і прихованими шарами стають вектором W_1 , між прихованим і вихідним шарами – вектором W_2 .

Крок 3.2. Вибір генетичних операторів.

Робота ГА здійснюється трьома генетичними операторами: селекцією, схрещуванням і мутацією. Існують різні модифікації цих операторів, а вибір конкретного варіанту впливає на швидкість і якість рішення [166]. Вказується ймовірність схрещування P_C і ймовірність мутації P_M .

Крок 3.3. Ініціалізація початкової популяції хромосомами, що містять інформацію про значення вагових коефіцієнтів мережі заданої структури, тобто формування початкової популяції P_0 – скінченного набору допустимих рішень задачі, $P_0 = \{H_1, H_2, \dots, H_j, \dots, H_M\}$, де M – розмір популяції; H_j – j -та хромосома популяції ($j = 1..M$).

Крок 3.4. Оцінка хромосоми поточної популяції.

Крок 3.4.1. Декодування кожної хромосоми популяції у набір ваг НРПР.

Крок 3.4.2. Побудова нейронних мереж, які відповідають оцінюваним хромосомам. Моделювання системи з поточними вагами НРПР.

Крок 3.4.3. Обчислення значення фітнес-функції оцінюваних хромосом $f_{\Sigma}(H_j)$, що враховує помилку і складність мережі ($j = 1, \dots, M$).

Крок 3.5. Перевірка критерію закінчення пошуку.

Умова 1. Досягнення прийнятного значення цільової (фітнес) функції $f_{\Sigma_{\text{opt}}}$ синтезованого НРПР. Якщо значення цільової функції f_{Σ} окремої особи досягає значення $f_{\Sigma_{\text{opt}}}$ із заданою точністю ε в процесі функціонування ГА, то критерій вважається досягнутим.

Умова 2. Перевищення максимально допустимого числа ітерацій n_{max} (50 - 100 ітерацій).

Умова 3. Виродження популяції.

Задається число поколінь n_p і поріг коефіцієнта поліпшення ρ значень фітнес-функцій кращої хромосоми ρ_p . Після цього коефіцієнт поліпшення

$$\rho = \frac{f_{\text{best}_t} - f_{\text{best}_{t-1}}}{f_{\text{best}_{t-1}}},$$

де f_{best_t} – найкраще значення цільової функції, $f_{\text{best}_{t-1}}$ – найкраще значення цільової функції від попередніх поколінь. Якщо значення ρ менше ρ_p , то критерій зупинки вважається досягнутим.

У разі виконання однієї з умов зупинки – перехід на крок 3.10.

Крок 3.6. Виходячи із значення фітнес-функції, вибираються особи для генерації нових рішень (використовується пропорційний вибір).

Крок 3.6.1. Пошук середнього значення фітнес-функції $f_{\Sigma M}$ популяції як середнє арифметичне значень фітнес-функцій всіх особин.

$$f_{\Sigma M} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M f_{\Sigma j}.$$

Крок 3.6.2. Для кожної особи розрахунок співвідношення $P_s(j) = f_{\Sigma j} / f_{\Sigma M}$.

Крок 3.6.3. Формування масиву осіб, допущених до схрещування залежно від значення $P_s(j)$ (якщо $P_s(j) > 1$, то особина вважається добре пристосованою і допускається до схрещування).

Крок 3.7. Застосування операторів схрещування для хромосом, вибраних на попередньому кроці (застосовується випадковий вибір батьківських пар).

Крок 3.7.1. Довільна нумерація всіх представників поточної популяції.

Крок 3.7.2. Вибір першого батька.

Для цього, починаючи з першої, необхідно перебрати всі хромосоми популяції до тих пір, поки випадково вибране число з інтервалу $[0; 1]$ не буде меншим за P_c . Коли це відбудеться для одного з елементів популяції, цей елемент стане першим батьком.

Крок 3.7.3. Продовження перегляду популяції, починаючи з наступного після першого батька рішення, до тих пір, поки знову випадково обране число не буде меншим, ніж P_c . Хромосома, для якої виконується така умова, буде другим батьком. Продовжити крок 3.7.3 до тих пір, поки не вибереться потрібна кількість пар батьків.

Крок 3.7.4. Використання оператора одноточкового схрещування для кожної батьківської пари.

Крок 3.8. Застосування операторів мутації для хромосом, обраних на етапі 3.6 з ймовірністю мутації P_m .

Крок 3.8.1. Копіювання батьківської хромосоми в хромосому-нащадка.

Крок 3.8.2. Вибір випадковим чином ген, що мутує.

Крок 3.8.3. Вибір нового значення гена, яке не дорівнює поточному, в заданому інтервалі допустимих значень гена.

Крок 3.9. Формування нового покоління елітних хромосом і хромосом-нащадків, отриманих шляхом застосування операторів схрещування і мутації. Перехід до кроку 3.4.

Крок 3.10. Припинення роботи ГА.

Крок 4. Перевірка критеріїв припинення генетичного пошуку. Якщо виконується умова 1, перейдіть до кроку 7.

Крок 5. Додавання нейрону до останнього прихованого шару. Якщо максимальна кількість нейронів у шарі досягнута, то перехід до наступного кроку, інакше – перехід до кроку 3.

Крок 6. Додавання нового прихованого шару, що складається з одного нейрона перед вихідним шаром. Якщо досягнуто максимальної кількості прихованих шарів, перехід до кроку 1, інакше – перехід до кроку 3.

Крок 7. Кінець.

Для успішного синтезу системи керування необхідно розробити найбільш відповідні імітаційні моделі керуючої ланки та характеру навантаження, хоча для істотно нелінійної системи це завдання є досить складним і не завжди має належне рішення [166, 171]. Таким чином, використовуючи розглянутий алгоритм, отримана наступна архітектура НРПР: п'ять вхідних нейронів, перший і другий приховані шари складаються з чотирьох і трьох нейронів, а також два вихідних нейрони (архітектура 5-4-3-2). Додатково покращити якість оптимізації вагових коефіцієнтів нейронної мережі можна шляхом налаштування k_f у виразі (3.2). Зміни значення f_Σ в процесі оптимізації НРПР на основі запропонованого методу представлені на рисунку 3.11.

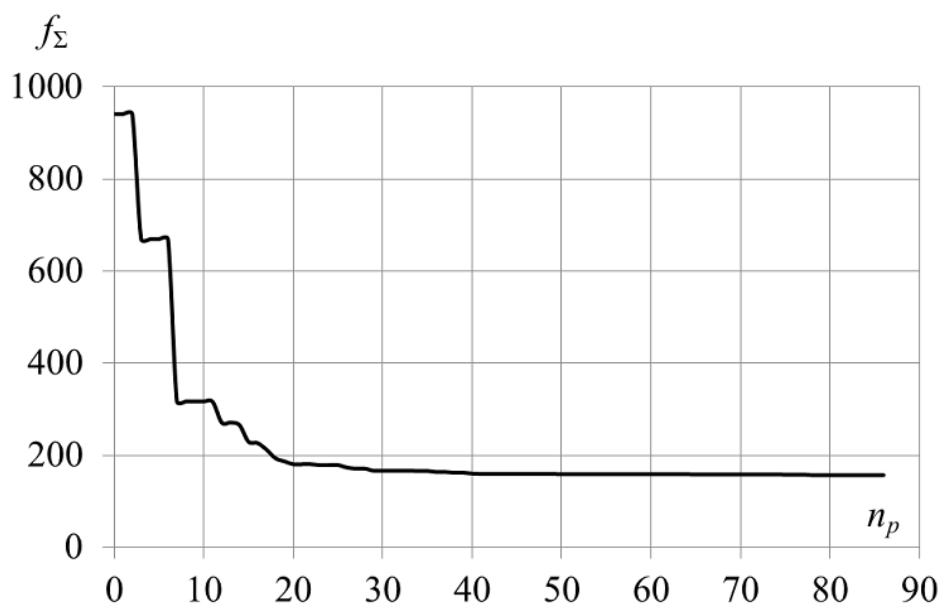


Рисунок 3.11 – Найкращі значення цільових функцій в процесі ітераційної оптимізації нейронного регулятора генетичним алгоритмом для відповідних популяцій

Число поколінь збільшується з поступовим зменшенням найкращого результату фітнес-функції від 374 до 1,31 в межах одного покоління, яке складається з 200 хромосом. У той же час середнє значення результуючої фітнес-функції зменшується (з 16273 до 217, не показано на рисунку 3.11), що вказує на те, що система навчається з покоління в покоління. Результати комп'ютерного моделювання системи керування з НРПР, що проводилося для розглянутих вище параметрів робота, представлені на рисунках 3.12 та 3.13.

Основні показники якості керування лінійною швидкістю переміщення та курсом МРБП при заданих $V_{зш} = 0,3$ м/с, $\varphi_{зк} = \pi/3$ рад та $F_{то} = 0$ Н зведені в таблиці 3.2, де по горизонталі містяться результати моделювання перехідних процесів САК мобільним роботом для: еталонних моделей (ЕМШ та ЕМК), традиційних ПІ-регулятора швидкості та ПД-регулятора кута (налаштованих за допомогою параметричної оптимізації основних показників якості керування градієнтним методом [6]), нейронного регулятора просторового руху.

Проаналізувавши результати моделювання (рисунки 3.12 та 3.13) можна стверджувати, що розроблена багатозв'язна САК МРБП з нейронним регулятором просторового руху має значно вищі показники якості керування швидкістю та кутом повороту у порівнянні із застосуванням окремих традиційних регуляторів САК даними координатами. 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 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 заданих технологічних операцій, їх продуктивність збільшується.

На рисунках 3.14 – 3.15 розглянута поведінка МРБП при відпрацюванні навантаження від виконуваної операції у розмірі 2000 Н та збурення за кутом у розмірі 0,2 рад (спричинене навантаженням), які починають діяти на 5 с та завершують свою дію на 8 с моделювання.

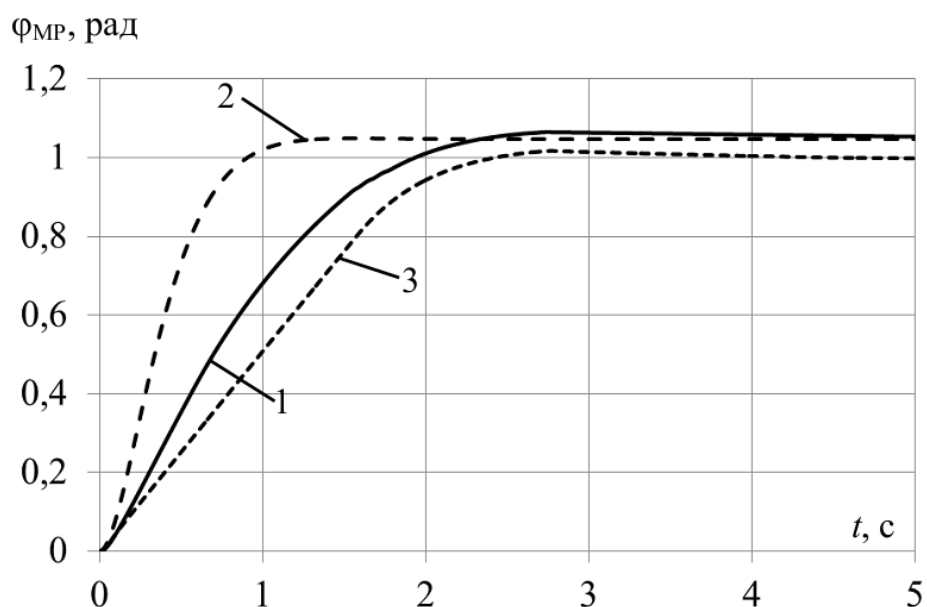


Рисунок 3.12 – Перехідні процеси САК МРБП за кутом: 1 – з нейронним регулятором просторового руху, 2 – еталонна модель за кутом, 3 – з традиційними регуляторами кута і швидкості

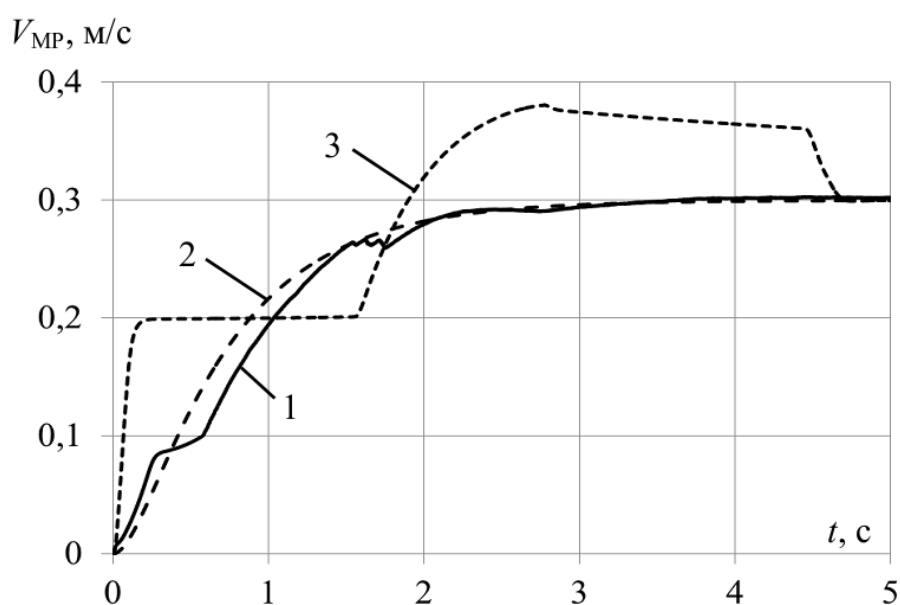


Рисунок 3.13 – Перехідні процеси САК МРБП за швидкістю: 1 – з нейронним регулятором просторового руху, 2 – еталонна модель за швидкістю, 3 – з традиційними регуляторами кута і швидкості

Таблиця 3.2 – Результати моделювання перехідних процесів САК МРБП при пуску

Модель	Показники якості					
	t_p , с	$\delta_{СТ}$, %	σ_{max} , %	μ	$f_{ш}$, м ² /с ²	f_k , рад ²
ЕМШ	2,11	0	0	0	0	-
Швидкість ПІ	4,6	0	27	1	22,7	-
Швидкість НРПР	2,09	0,7	0	0	0,8	-
ЕМК	0,89	0	0	0	-	0
Кут ПД	2,36	4,8	0	0	-	292,4
Кут НРПР	1,91	0,6	0	0	-	138,1

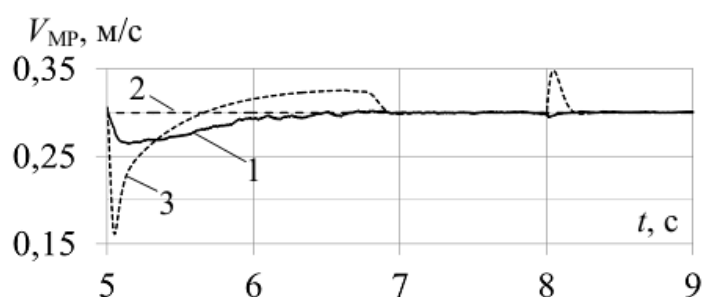


Рисунок 3.14 – Перехідні процеси САК МРБП з відпрацювання навантаження за швидкістю: 1 – з нейронним регулятором просторового руху, 2 – еталонна модель за швидкістю, 3 – з традиційними регуляторами кута і швидкості

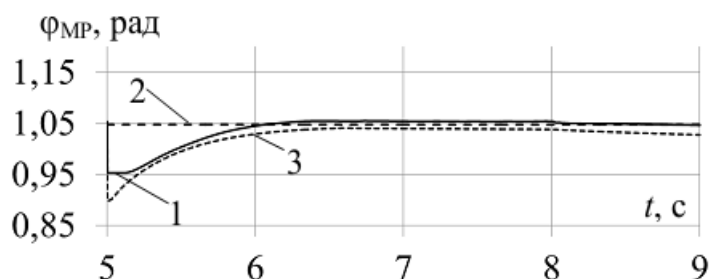


Рисунок 3.15 – Перехідні процеси САК МРБП з відпрацювання збурення за кутом: 1 – з нейронним регулятором просторового руху, 2 – еталонна модель за кутом, 3 – з традиційними регуляторами кута і швидкості

З отриманих на рисунках 3.14 – 3.15 результатів видно, що перехідний процес системи з НРПР за швидкістю має суттєво менше перерегулювання (11,8 %) та час перехідного процесу (0,8 с), на відміну від системи з традиційними регуляторами швидкості та кута, для якої $\sigma_{\max} = 46,3 \%$ та $t_p = 1,84$ с при початку дії навантаження, $\sigma_{\max} = 16 \%$ і $t_p = 0,125$ с – по завершенні його дії. В той же час, з рисунка 3.15 визначено, що при відпрацюванні збурення за кутом повороту робота система з НРПР має на 4,5 % менше перерегулювання (9,5 %) та на 13 % менше значення часу перехідного процесу (0,4 с), на відміну від системи з традиційними регуляторами швидкості та кута, для якої $\sigma_{\max} = 14 \%$ та $t_p = 0,46$ с.

Таким чином, синтезований НРПР загалом показує вищу якість керування МРБП при пуску та відпрацюванні навантаження, а, відповідно, краще враховує взаємний вплив каналів керування кутом і швидкістю мобільного робота, ніж традиційні регулятори.

Важливим питанням, яке потребує вирішення при розробці МРБП та його системи керування, є задача надійного утримання на ФП при переміщенні. Прямий метод визначення за допомогою датчиків тиску має обмеження та підходить для рівних та однорідних поверхонь. Тому в розділі 3.3 доцільно розглянути інші шляхи визначення поточного значення ПЗ при наявності невизначеностей поверхні.

3.3. Синтез гібридних нейро-нечітких спостерігачів для керування зусиллям притискних магнітів МРБП

Відомо, що залежність електромагнітного зусилля, створюваного ПЕ, від зазору є оберненою степеневою функцією [24, 101], тому навіть незначне збільшення зазору призводить до суттєвого зменшення значення зусилля. Враховуючи можливість виконання роботом технологічних операцій в умовах невизначеності через значну шорсткість робочої поверхні, наявність суттєвих неоднорідностей (наприклад, зварних швів, порожніх отворів та ін.), людині-оператору або автономній САК необхідно отримувати поточну інформацію про реальне значення величини ПЗ [24, 31].

Застосування окремих датчиків сили (тензодатчиків) в даному випадку є недоцільним саме через невизначеність характеристик ФП (зокрема, невідомою є точка прикладення ПЗ). Використання в якості тензодатчика електропровідних еластомерів (для покриття всієї площі поверхні ПЕ, яка притискається до ФП) також не виглядає перспективним через значні втрати (ослаблення) ПЗ та ускладнює або навіть унеможлиблює процедуру калібрування таких габаритних датчиків. Одним з можливих способів визначення діючого значення ПЗ є встановлення датчиків проковзування [24, 29], де роль об'єкта проковзування відіграє сама ФП. Однак при цьому можливі такі положення мобільного робота, коли навіть за максимальних значень сигналу керування не вдається сформувати потрібне ПЗ для надійного зчеплення МРБП з поверхнею, і робот може не втриматися на ФП (наприклад, при значних обростаннях корпусу судна морськими мікроорганізмами).

Тому, найбільш перспективним підходом до визначення фактичної величини ПЗ, створюваного ПЕ, вбачається непряме оцінювання [3, 9]. Реалізація даного підходу передбачає побудову ідентифікатора зусилля, який за відомими вхідними вимірюваними фізичними величинами оцінює вихідний сигнал – величину ПЗ. Подібний підхід розглянутий в роботах [9, 28, 172], який передбачає вимірювання значень магнітної індукції в зазорі між підшвою притискного магніту та робочою ФП. Однак згадана методика потребує значних обчислювальних потужностей керуючого контролера.

Враховуючи суттєву залежність ПЗ магнітокеруваного ПП від невизначеностей ФП та зовнішніх факторів робочого середовища, які не залежать від оператора та не можуть бути точно обчислені головною САК робота [3], пропонується використання гібридних нейро-нечітких систем для синтезу спостерігача ПЗ.

Вдалі приклади застосування гібридних інтелектуальних систем [24, 132] показали їх здатність поєднувати в собі позитивні риси нечітких систем та нейронних мереж, одночасно компенсуючи їх недоліки. Так, для нейронних мереж відсутні універсальні алгоритми розрахунку кількості шарів та нейронів

в кожному шарі, але вони мають здатність до навчання та адаптації. Перевагою нечітких систем є можливість легкої модифікації баз правил та функціонування за відсутності повних знань про залежності між входами та виходами системи (використовуються не кількісні, а якісні знання). Для врахування особливостей взаємодії магнітокерованого ПП на базі ПЕ з феромагнітною поверхнею, доцільно розробити математичну модель спостерігача для ідентифікації формованого електромагнітом ПЗ на основі адаптивної нейронної мережі з нечіткою системою логічного висновку [24, 172].

Під час руху МРБП просторове положення призматичного (для наочності) ПЕ з розмірами $a_M \times b_M \times c_M$ (рисунок 3.16), де a_M – ширина, b_M – довжина, а c_M – висота магніту. Перешкоди, розміщені на ФП, обумовлюють різні значення відстаней від вершин паралелепіпеда магніту до поверхні $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$. Різні значення можуть мати також кути нахилу притискної поверхні магніту до ФП α_1, α_2 . Крім того, довжина висунутої частини розсувної спиці R_B лінійного приводу колеса-рушія також впливає на реальне значення формованого ПЗ. Зміна кутів нахилу притискної поверхні ПЕ до ФП α_1, α_2 може відслідковуватися датчиками кутів (ДК1 та ДК2). Довжина висунутої частини стрижня шарніру R_B може визначатися за допомогою індуктивного датчика переміщення ДП. За допомогою датчика напруги проводяться прямі вимірювання живлячої напруги. Далі отримані вимірювання з датчиків обробляються та перераховуються у фізичні величини відповідної розмірності.

З урахуванням вищевикладеного, при синтезі спостерігача запропоновано заснований на використанні експериментальних даних підхід для розробки інтелектуальної моделі ПЕ як об'єкту керування ПЗ [3, 173]. ПЗ F , яке розраховується за допомогою спостерігача, з одного боку, визначається інтегральною сумою магнітної індукції, створюваної ПЕ на ФП [3, 172], і, з іншого боку, суттєво залежить від таких параметрів, як: кути нахилу ПЕ до ФП (α_1, α_2), відстань до ФП (R_B) і напруга живлення ПЕ (u_{PE}).

Для ПЕ з розмірами $a_M = 50,2$ мм, $b_M = 31,0$ мм, $c_M = 10,0$ мм проведені експериментальні дослідження з кількістю вимірювань 625 точок сили відриву

в різних просторових положеннях ПЕ відносно ФП. По суті, накопичена база даних відповідає функціональній залежності

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

яка може бути синтезована на основі отриманих експериментальних даних. Фрагмент отриманої бази експериментальних даних наведено в таблиці 3.3. Повна вибірка наведена у додатку Д.

При розробці моделі спостерігача для ідентифікації величини ПЗ доцільно здійснювати апроксимацію експериментальних даних (таблиця 3.3) з використанням адаптивних нейро-нечітких обчислювачів сили (ННОС) типу ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System [3, 24]), яка є одним з варіантів гібридних нейро-нечітких мереж, зокрема, нейронною мережею прямого поширення сигналу [173], представлену на рисунку 3.17. ANFIS реалізує систему нечіткого логічного виведення Сугено типу у вигляді п'ятишарової нейронної мережі прямого поширення сигналу. Це дозволяє застосовувати для налагодження нейро-нечітких мереж швидкі алгоритми навчання, засновані на реалізації методу зворотного поширення помилки. Структура нечіткого правила з порядковим номером r має наступний вигляд

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

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 ($r = 1, \dots, m$; $q = 0, 1, \dots, n$).

Мережа ANFIS функціонує наступним чином:

1-й шар. Кожен вузол першого шару являє собою відповідний лінгвістичний терм із певною функцією належності. Входи мережі $x_1, x_2, \dots, x_n$ з'єднані тільки з їх термами.

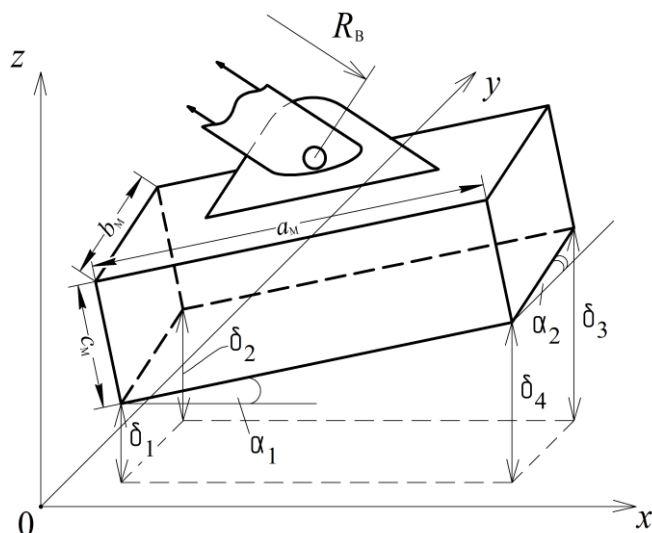


Рисунок 3.16 – Просторове положення призматичного ПЕ біля ферромагнітної поверхні

Таблиця 3.3 – Фрагмент бази експериментальних даних для навчання та контролю функціонування спостерігача ПЗ

$u_{\text{ПЕ}}, \text{В}$	4,2	4,2	5,6	5,6	6,8	6,8	8	8	9	9
$\alpha_1, \text{рад}$	0	0,0524	0	0,034	0	0,035	0	0,069	0	0,034
$\alpha_2, \text{рад}$	0	0,01	0,044	0	0,034	0,052	0,052	0	0	0,01
$R_B, \text{мм}$	15,51	14,91	13,61	15,51	12,97	14,91	13,61	15,51	15,51	14,24
$F, \text{Н}$	9,8	0,4	0,26	2	0,2	1,2	1,5	2,4	32,7	1,56

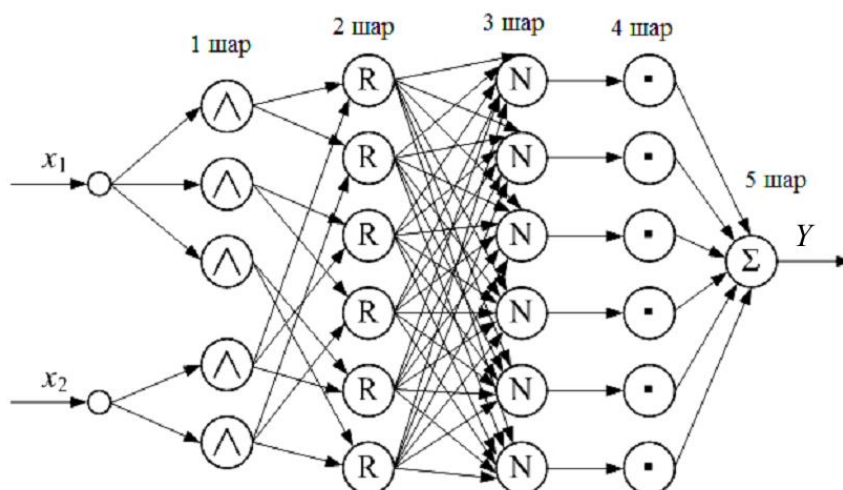


Рисунок 3.17 – Функціональна структура типової ANFIS з двома входами x_1, x_2 та одним виходом Y

Виходом кожного вузла є ступінь належності вхідної змінної до відповідного нечіткого терма

$$\mu_r(x_w) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_w - g_P}{c_P} \right|^{2d_P}},$$

де c_P, d_P, g_P – регульовані параметри функції належності.

2-й шар. Кількість вузлів другого шару дорівнює m . Кожен вузол цього шару відповідає одному нечіткому правилу. Вузол другого шару з'єднаний з тими вузлами першого шару, які формують антецеденти відповідного правила. Отже, кожен вузол другого шару може приймати від 1 до n вхідних сигналів. Виходом вузла є ступінь виконання правила, який розраховується як добуток вхідних сигналів. Позначимо виходи вузлів цього шару через $\tau_r, r = \overline{1, m}$.

3-й шар. Кількість вузлів третього шару також дорівнює m . Кожен вузол цього шару розраховує відносний ступінь виконання нечіткого правила

$$\tau_r^* = \frac{\tau_r}{\sum_{j=1, m} \tau_j}.$$

4-й шар. Кількість вузлів четвертого шару також дорівнює m . Кожний вузол з'єднаний з одним вузлом третього шару а також з усіма входами мережі. Вузол 4-го шару розраховує внесок одного нечіткого правила у вихід мережі

$$y_r = \tau_r^* \cdot (b_{0,r} + b_{1,r}x_1 + \dots + b_{n,r}x_n).$$

5-й шар. Єдиний вузол цього шару підсумовує висновки всіх правил

$$y = y_1 + \dots y_r \dots + y_m.$$

Дослідження запропонованої ННОС на стадії її розробки показали, що форма функції належності лінгвістичних термів вхідних змінних істотно

впливає на процес навчання та точність моделі спостерігача зусилля (СЗ) [3]. Тому, для досягнення високої адекватності даної нейро-нечіткої математичної моделі СЗ на стадії її проектування здійснено синтез ННОС з різними типами функцій належності лінгвістичних термів (трикутних, трапецієвидних, Гаусівського типу 1-го роду, Гаусівського типу 2-го роду, π - типу) вхідних змінних $u_{\text{ПЕ}}$, α_1 , α_2 , та R_B . Для змінних α_1 та α_2 обрано по 3 лінгвістичні терми: S – малий, M – середній і B – великий; для змінних R_B та $u_{\text{КП}}$ – 5 термів: Z – нульова, S – мала, M – середня, B – велика і VB – дуже велика. База правил запропонованої ННОС складається з 225 правил, які відповідають всім комбінаціям чотирьох вхідних нечітких змінних. У цьому випадку кількість коефіцієнтів правил $b_{q,r}$ дорівнює 900.

Вихідну базу з 625 експериментальних точок (фрагмент якої представлений у таблиці 3.3) було розділено практично порівну (313/312) на дві вибірки (рівномірно по всьому діапазону вхідних даних). Далі перша вибірка (313) була використана для навчання ННОС за допомогою гібридного методу навчання, який об'єднує в собі метод зворотного поширення помилки і метод найменших квадратів, а друга (312) – для контролю точності навчання моделей запропонованих спостерігачів ПЗ з різними типами функцій належності лінгвістичних термів. Результати навчання та контролю запропонованої ННОС для різних типів функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних наведені в таблиці 3.4. Проаналізувавши результати вищенаведених досліджень можна стверджувати, що найвищої точності в процесі навчання ННОС можна досягти при Гаусівській 2-го роду формі лінгвістичних термів її вхідних змінних (помилка навчання складає 0,141, а помилка контролю – 0,258). Параметри вхідних змінних лінгвістичних термів, а також коефіцієнти правил $b_{q,r}$, отримані в процесі навчання, для різних ННОС наведені на рисунку 3.18 та в таблиці 3.5. Повна база правил ННОС з Гаусівської 2-го роду формою лінгвістичних термів її вхідних змінних наведена в додатку Е. На рисунку 3.19 наведені характеристичні поверхні розроблених ННОС ПЗ для різних функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних при $\alpha_1 = 0$ і $R_B = 14,88$ мм.

Розглянемо більш детально результати порівняльного аналізу та оцінювання адекватності математичних моделей СЗ ПЕ на основі ННОС з різними типами функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних.

Комп'ютерне моделювання (рисунок 3.20) статичних характеристик експериментального ПЕ виконано при $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0,0162$ та $R_B = 15,51$ мм. На рисунку 3.20 прийняті наступні умовні позначення для статичних характеристик моделей СЗ на основі ННОС із функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних: $F_{\pi inf}$ – π -подібного типу; F_{trap} – типу трапецій; F_{gaus1} – Гаусівського типу 1-го роду; F_{gaus2} – Гаусівського типу 2-го роду; F_{timf} – трикутного типу; F_{exr} – статична характеристика реального ПЕ.

Аналіз адекватності синтезованих математичних моделей СЗ на основі ННОС проведено з використанням методів оцінки гіпотез математичної статистики [3, 174]. Основні статистичні показники наведені в таблиці 3.6 та розшифровані нижче.

Сума квадратів помилок (SSE) показує загальне відхилення значень моделі $F_M(u_{ПЕ})$ від відповідних значень експериментальних даних $F_e(u_{ПЕ})$

$$SSE = \sum_{i=1}^k [F_{ei} - F_{mi}]^2 \rightarrow 0.$$

Коефіцієнт детермінації (R^2) є часткою дисперсії відхилень залежної змінної від її середнього значення

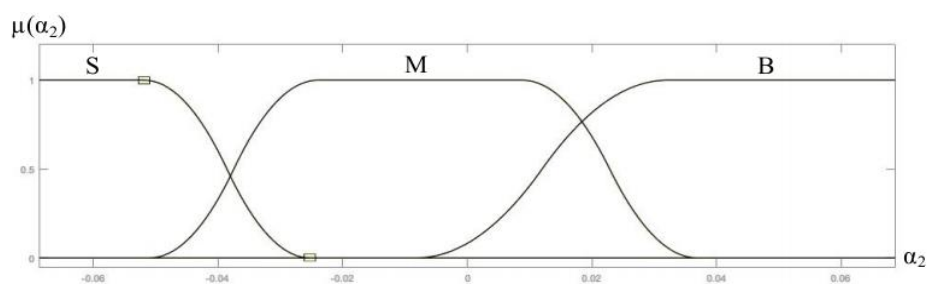
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k [F_{ei} - F_{mi}]^2}{\sum_{i=1}^k [F_{ei} - \overline{F_{ei}}]^2} \rightarrow 1,$$

де $\overline{F_{ei}}$ – середнє арифметичне значення дослідної вибірки;

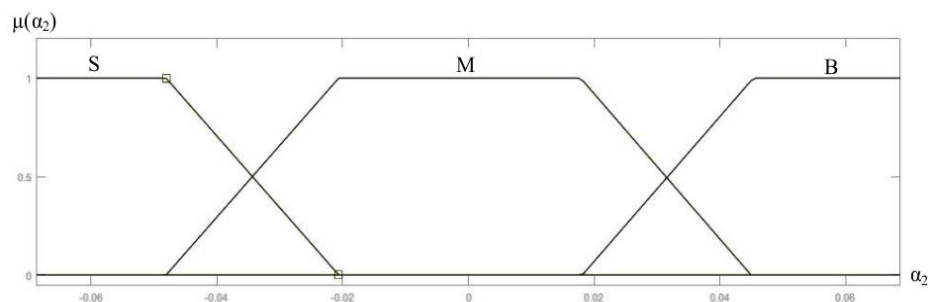
Корінь із середнього для квадрата помилки ($RMSE$) є оцінкою стандартного відхилення випадкової компоненти між даними синтезованої регресійної моделі та дослідними значеннями.

Таблиця 3.4 – Результати навчання та контролю запропонованої ННОС для різних типів функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних

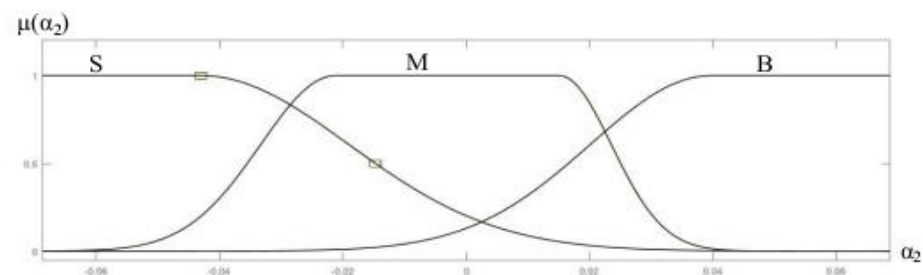
Тип функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних ННОС	Кількість епох навчання	Мінімальна помилка навчання	Мінімальна помилка контролю
Трикутна	12	0,228	0,452
Трапецієвидна	16	0,511	0,889
Гаусівська 1-го роду	10	0,163	0,312
Гаусівська 2-го роду	11	0,141	0,258
π - типу	22	0,253	0,554



а)



б)

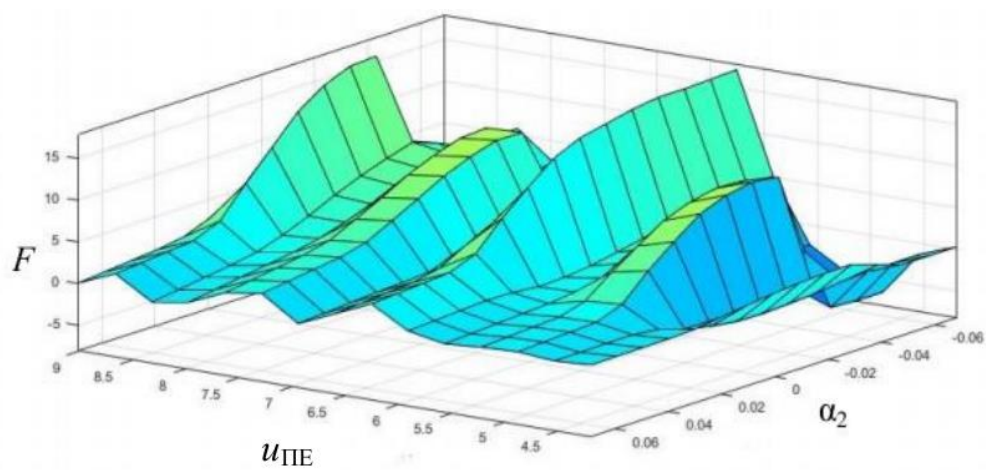


в)

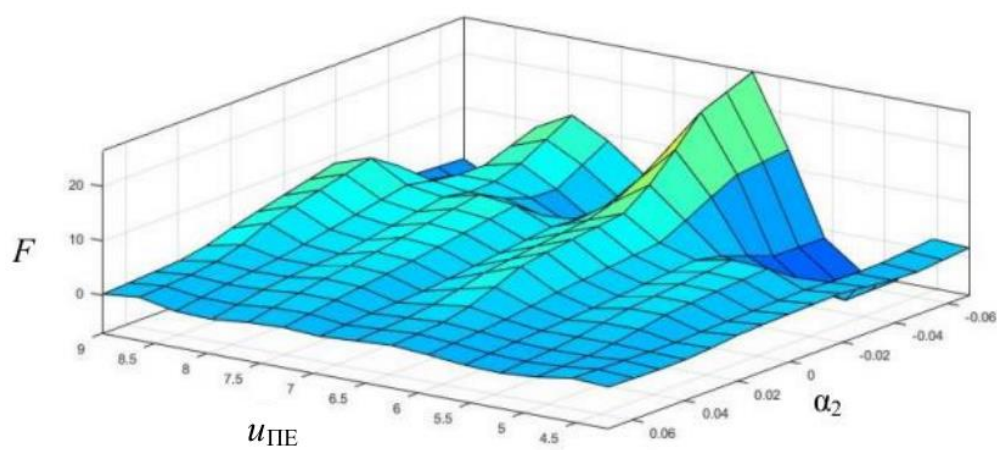
Рисунок 3.18 – Параметри функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних ННОС: а) π -типу; б) типу трапецій; в) Гаусівського типу 2-го роду

Таблиця 3.5 – Фрагмент бази правил для ННОС

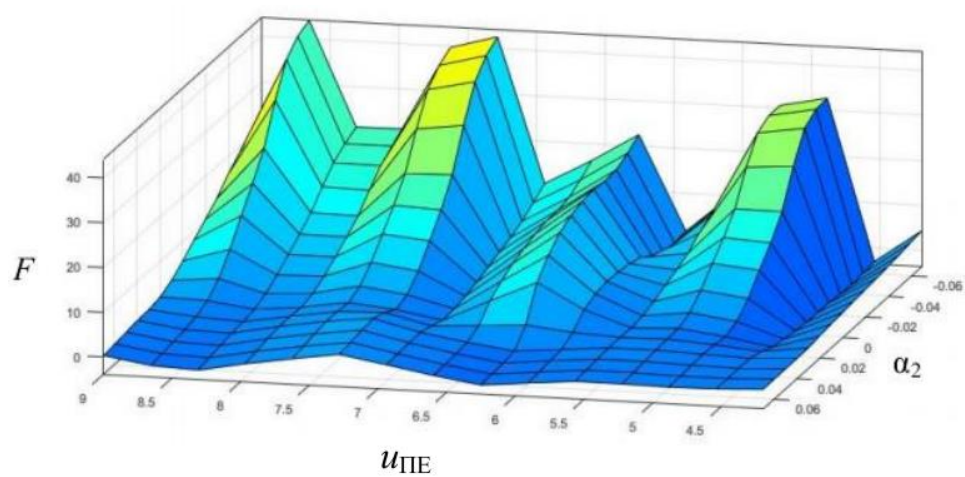
№ правила	Вхідні змінні та коефіцієнти правил								
	$u_{\text{КП}}$	α_1	α_2	R_B	$b_{1,r}$	$b_{2,r}$	$b_{3,r}$	$b_{4,r}$	$b_{0,r}$
Функція належності π -типу									
1	Z	S	S	Z	0	0	0	0	0
25	Z	M	M	VB	0	0	0	0	0
50	S	S	S	VB	0	0	0	0	0
74	S	M	B	B	-3,286	-0,376	-25,250	1,407	-0,587
100	M	S	M	VB	4,785	0,417	1,182	-1,881	0,704
150	B	S	B	VB	2,458	0,192	-14,334	-1,103	0,307
165	B	M	B	VB	0	0	0	0	0
198	VB	M	S	M	2,548	0,469	-4,254	-1,696	0,283
216	VB	B	M	Z	2,312	0,006	52,980	3,496	0,257
218	VB	B	M	M	7,164	1,798	41,142	-4,150	0,796
225	VB	B	B	VB	0	0	0	0	0
Функція належності трапецієвидного типу									
1	Z	S	S	Z	2,506	0	-16,368	9,079	0,597
25	Z	M	M	VB	3,489	-0,018	-4,903	13,417	0,831
50	S	S	S	VB	0	0	0	0	0
74	S	M	B	B	7,709	-0,033	-91,315	-2,417	1,377
100	M	S	M	VB	5,146	0,462	-27,216	-2,026	0,757
150	B	S	B	VB	1,320	0,105	-9,356	-0,565	0,165
165	B	M	B	VB	1,785	-0,005	2,171	3,603	0,223
198	VB	M	S	M	9,308	4,442	29,978	-5,527	1,034
216	VB	B	M	Z	1,095	0,003	197,362	1,656	0,122
218	VB	B	M	M	-6,502	4,369	-49,558	4,287	-0,722
225	VB	B	B	VB	0	0	0	0	0
Функція належності Гаусівського типу 2-го роду									
1	Z	S	S	Z	-1,666	-0,002	-11,189	3,195	-0,397
25	Z	M	M	VB	0,996	-0,006	-0,079	3,853	0,237
50	S	S	S	VB	22,083	2,736	-0,374	-7,508	3,944
74	S	M	B	B	10,362	1,330	-15,910	-3,685	1,850
100	M	S	M	VB	3,102	0,527	-104,440	-1,057	0,456
150	B	S	B	VB	1,596	0,209	-11,207	-0,694	0,200
165	B	M	B	VB	2,079	-0,006	-0,260	4,199	0,260
198	VB	M	S	M	-104,474	89,066	-101,475	65,116	-11,615
216	VB	B	M	Z	0,948	-0,002	187,818	0,475	0,105
218	VB	B	M	M	-7,970	5,477	-12,199	5,325	-0,887
225	VB	B	B	VB	0,003	0	0	0,005	0



а)



б)



в)

Рисунок 3.19 – Характеристичні поверхні ННОС функцій належності лінгвістичних термів: а) π -типу; б) типу трапецій; в) Гаусівського типу 2-го роду

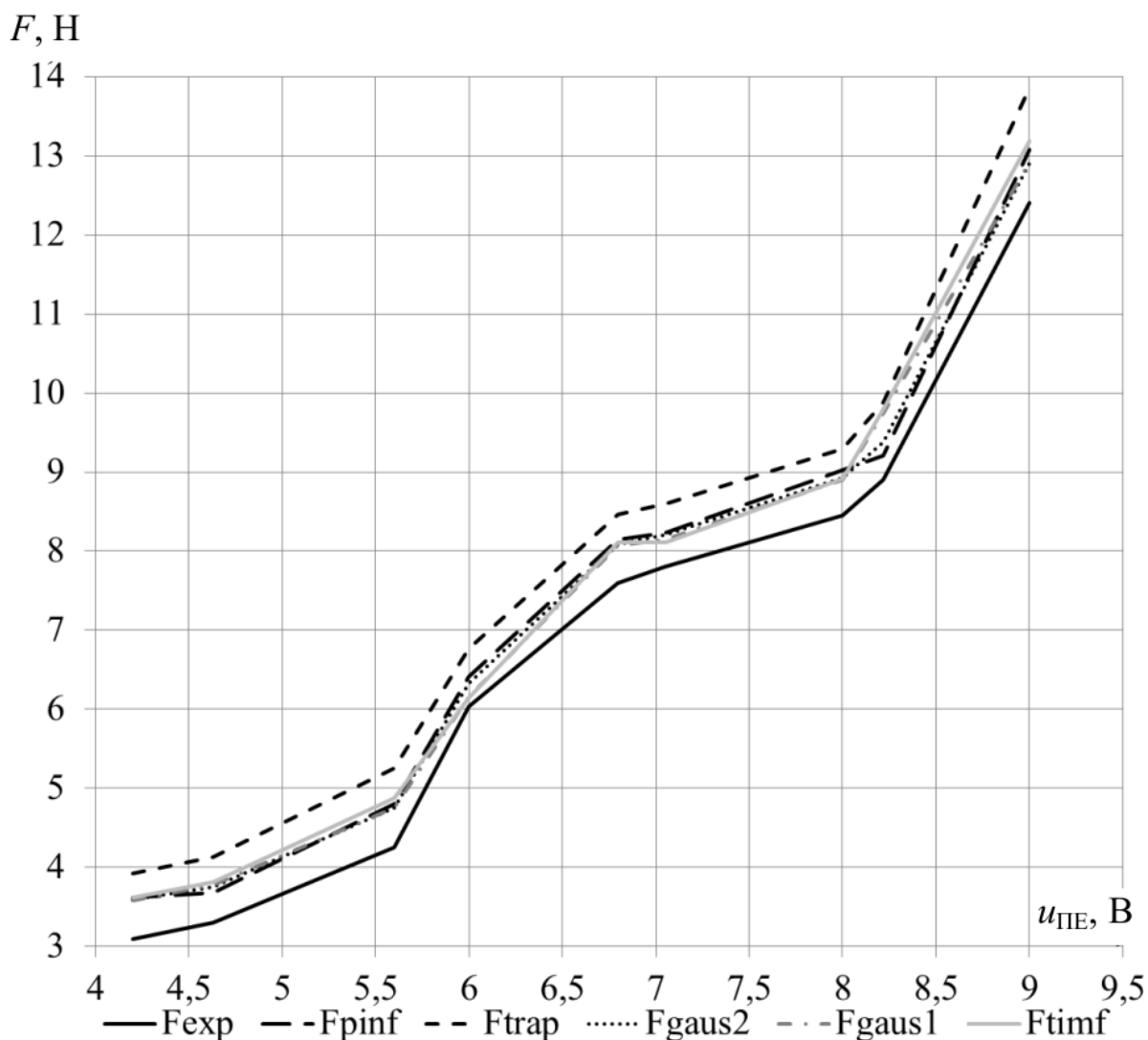


Рисунок 3.20 – Результати комп'ютерного моделювання статичних характеристик експериментального ПЕ

Таблиця 3.6 – Результати розрахунків статистичних оцінок адекватності синтезованих математичних моделей спостережень ПЗ

Тип математичної моделі СЗ на основі ННОС із функціями належності лінгвістичних термів входніх 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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [F_{ei} - F_{mi}]^2} \rightarrow 0.$$

На основі отриманих статистичних даних (таблиця 3.6) можна зробити висновок, що найкращий результат відповідності експериментальної вибірки має синтезована математична модель на основі ННОС з функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних Гаусівського типу 2-го роду. Для подальшого підвищення точності СЗ під час навчання ННОС необхідно використовувати більшу кількість експериментальних точок.

Нейронний спостерігач ПЗ. Нейронні мережі (НМ) широко використовуються для вирішення різнотипних завдань з обчислення, ідентифікації, розпізнавання образів, апроксимації із заданою точністю безперервних функцій в певному діапазоні вхідних змінних [132, 175]. У випадку зі спостерігачем ПЗ структура НМ буде складатися із 3 шарів нейронів: 4 – у вхідному шарі, N – в прихованому шарі, 1 – у вихідному шарі (рисунок 3.21). Кожен з прихованих та вихідних нейронів з'єднаний з усіма елементами попереднього шару (мережа з повною системою зв'язків). Тому, спостерігач побудований на основі класичної нейронної мережі з прямими зв'язками та архітектурою типу 4- N -1.

Далі для різних N прихованого шару (починаючи з $N = 1$) НМ навчалася за допомогою навчальної вибірки, а перевірялася за допомогою контрольної вибірки (по тих самих вибірках, що і для гібридного СЗ). Аналіз адекватності синтезованих математичних моделей СЗ на основі НМ проведено з використанням методів оцінки гіпотез математичної статистики. Для моделювання роботи спостерігача ПЗ застосовувалися проміжні значення живильної електромагніт напруги (на відрізку від 4,2 до 9 В) при постійних значеннях кутів нахилу ПЕ до ФП та довжини утримуючого магніт стрижня (умови аналогічні як і для гібридного спостерігача). Значення $RMSE$ для різних значень N кількості нейронів у прихованому шарі архітектури нейронної мережі 4- N -1 показані в таблиці 3.7.

Отриманий статистичний показник для запропонованих НМ з різною кількістю нейронів у прихованому шарі не змогли наблизитися до отриманих за допомогою ННОС. Так, найкращий показник $RMSE$ складав 1,4 для НМ з 2 нейронами у прихованому шарі, який на 48 % більше за аналогічний показник для моделі СЗ на основі ННОС із трапецієвидними функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних ($RMSE = 0,948$), яка показала гірший результат з представлених ННОС, і в 3 рази більший за найкращий результат для ННОС із функціями належності Гаусівського типу 2-го роду ($RMSE = 0,461$). При цьому при деяких кількостях нейронів (наприклад, 1, 3, 13, 18) значення $RMSE$ для НМ суттєво більше одиниці (див. таблицю 3.7).

Отже, досягти значення $RMSE$, отриманого при використанні ННОС, не вдалося. Такий результат може бути пояснений тим, що в ННОС міститься більше прихованих шарів нейронів ніж в НМ з одним прихованим шаром [76]. При цьому збільшення кількості нейронів у прихованому шарі не дає бажаного ефекту підвищення точності у визначенні притискного зусилля (найменші значення $RMSE$ отримані для 2, 8, 22, 32 та 38 нейронів).

На рисунку 3.22 представлено розроблену систему контролю ПЗ ПЕ, який є складовою частиною колеса-рушія робота [3, 31], із нейро-нечітким СЗ.

ЗП (на рисунку 3.22) надсилає задане значення притискної сили у вигляді сигналу $u_{ЗС}$ (задається оператором або САК переміщенням МРБП для кожного магніту). Сигнал помилки керування ε_C (сигнал розузгодження між $u_{ЗС}$ та вихідним сигналом гібридного спостерігача $u_{СЗ}$) надходить на РС, який формує сигнал керування $u_{РС}$ для кожного ПЕ. Сигнали $u_{РС}$ забезпечують формування ТП відповідного значення напруги $u_{ТП}$ для відповідного ПЕ. При цьому ПЕ зчіплюється з ФП, а ідентифікація реальних поточних значень притискного зусилля проводиться СЗ, зокрема оцінка значень формованих зусиль електромагнітів (у вигляді сигналів $u_{СЗ}$) здійснюється СЗ на основі даних про просторове положення ПЕ. Зміна кутів нахилу притискної поверхні ПЕ до ФП α_1, α_2 відслідковується датчиками кутів ДК1 та ДК2 (сигнали $u_{ДК1}$ та $u_{ДК2}$).

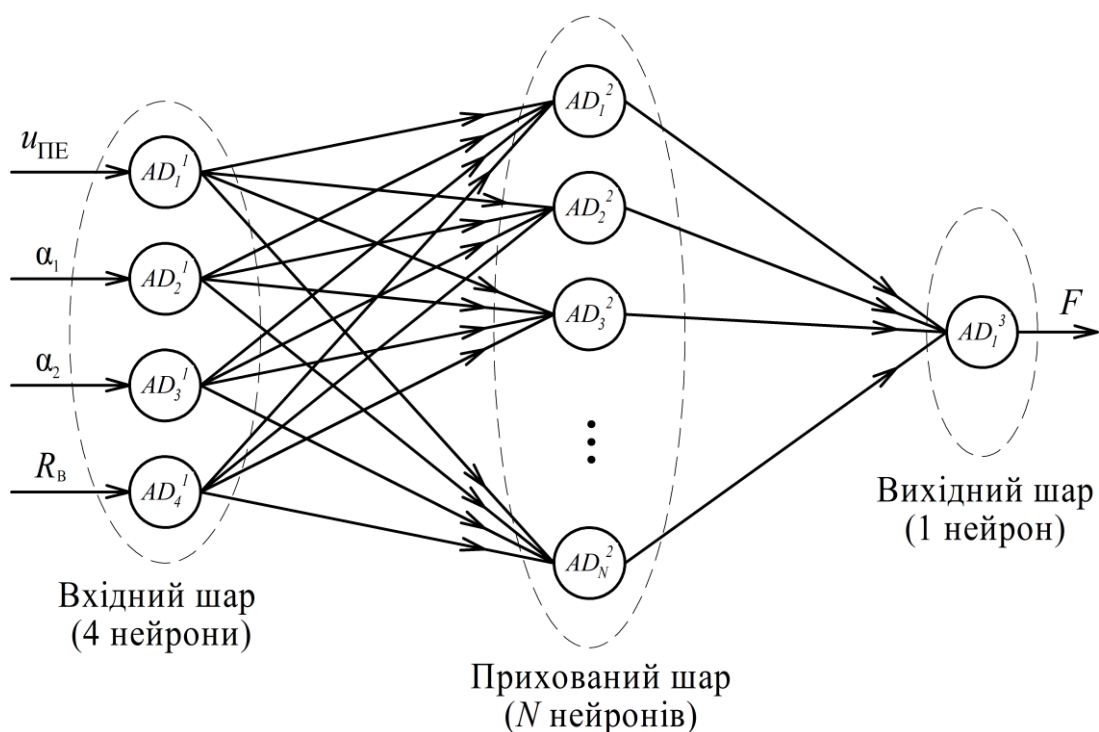


Рисунок 3.21 – Структура нейронного спостерігача притискного зусилля

Таблиця 3.7 – Значення показника $RMSE$ для різної кількості нейронів N в прихованому шарі нейронного СЗ

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$RMSE$	5,3	1,4	4,1	3,68	3,13	10,93	4,08	2,51	4,62	8,19	3,53	49,93

Продовження табл. 3.7

N	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$RMSE$	10,9	4,24	5,07	6,64	4,19	14,35	6,09	8,83	4,83	1,59	6,22	3,45

Продовження табл. 3.7

N	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$RMSE$	12,19	16,08	6,62	5,74	6,41	7,42	5,17	1,92	2,1	289,85	3,69	6,2

Продовження табл. 3.7

N	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
$RMSE$	2,63	1,77	6,46	4,57	16,51	3,01	8,64	8	4,72	17,72	6,26	5,5

Продовження табл. 3.7

N	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
$RMSE$	9,33	5,97	6,86	12,99	7,59	11,37	20,06	3,78	5,93	10,18	7,16

Продовження табл. 3.7

N	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
$RMSE$	11,59	33,55	10,62	12,48	19,76	13,67	13,97	11,04	11,9	4,9	8,13

Продовження табл. 3.7

N	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
$RMSE$	9,53	17,48	12,83	4,75	9,65	6,50	10,16	11,63	2,5	14,81	4,87

Продовження табл. 3.7

N	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
$RMSE$	8,21	19,11	7,54	31,05	31,21	7,94	11,25	7,88	29,7	9,35	11,38

Продовження табл. 3.7

N	93	94	95	96	97	98	99	100
$RMSE$	5,97	7,86	10,55	12,08	10,56	11,51	32,56	5,83

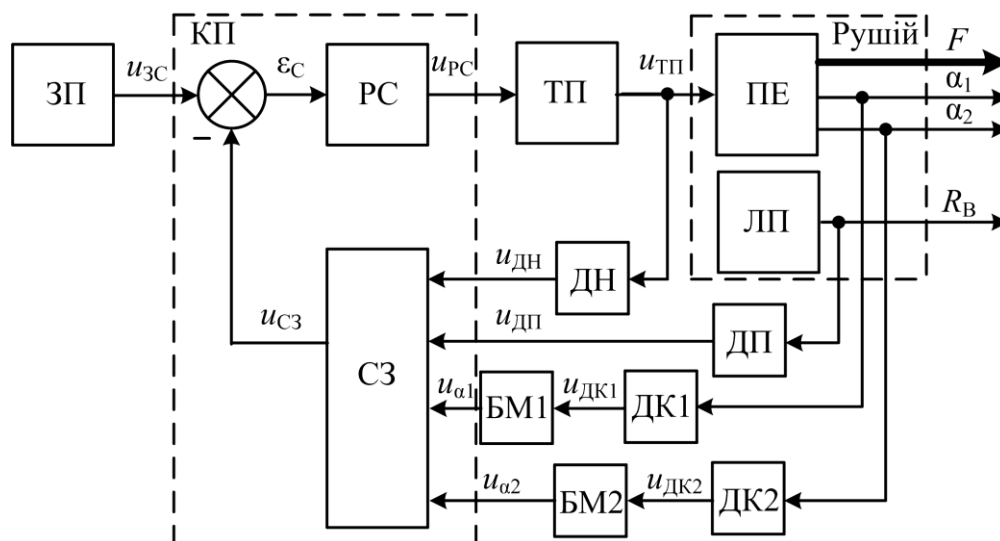


Рисунок 3.22 – САК ПЗ з гібридним спостерігачем зусилля

Далі блоки обчислення модуля БМ1 та БМ2 опрацьовують сигнали з ДК1 і ДК2 та, відповідно, формують сигнали $u_{\alpha 1}$ та $u_{\alpha 2}$, які відповідають абсолютним значенням кутів α_1 та α_2 . Довжина висунутої частини розсунної спиці R_B лінійного приводу ЛП рушія визначається за допомогою індуктивного датчика переміщення ДП (сигнал $u_{ДП}$). За допомогою датчика напруги ДН проводяться прямі вимірювання живлячої напруги (сигнал $u_{ДН}$). На рисунку 3.22 РС, СЗ та суматор містяться у керуючому пристрої КП, яким може виступати мікроконтроллер або програмований логічний контролер (ПЛК), виконуючи керуючі алгоритми. При розробці систем зчеплення МРБП на базі ПЕ значення утримувальної сили F визначається з урахуванням коефіцієнту запасу k_{sf} як $F = k_{sf} F_{min}$, де F_{min} – мінімально допустиме розрахункове значення зусилля.

При проектуванні спостерігача ПЗ потрібно враховувати також невизначеності ФП, спричинені феромагнітною природою виникнення, зокрема неоднорідність товщини поверхні. Тому далі розглядається спостерігач ПЗ, синтезований на основі теорії поля.

3.4. Магніто-індуктивний спостерігач притискного зусилля МРБП на основі теорії поля

Неоднорідності та невизначеності робочої ФП можуть бути представлені у вигляді окремих випадків позиціонування ПЕ МРБП поблизу робочої ФП (наприклад, частини корпусу судна) наведені на рисунку 3.23, де позначено: δ – повітряний зазор між ПЕ і поверхнею, $s_{П}$ – товщина ФП, 1 – транспортна платформа МРБП; 2 – тяговий або кріпильний елемент; 3 – положення ПЕ на робочій поверхні 4 з обростаннями 5 і зварним швом 6 [9].

Перший випадок (випадок А на рисунку 3.23) розміщення ПЕ та ФП звичайно зустрічається при складанні корпусу судна. Сталеві пластини в цьому випадку чисті і гладкі. Майже вся поверхня ПЕ рівномірно притискається до ФП ($\delta \approx 0$). Тому в такому разі можна використовувати тензодатчики як ДС.

Другий випадок стосується операцій з технічного обслуговування, таких як: чищення та ремонт суден (випадок Б на рисунку 3.23). ФП покривається морськими раковинами і водоростями. Таке покриття суттєво зменшує

швидкісні характеристики судна і має періодично видалятися спеціалізованими очисними машинами, зокрема, на базі МРБП. ПЕ робота може зустрічати різні неферромагнітні перешкоди на шляху до ФП, тоді $\delta \neq 0$, $\delta = \text{var}$. Крім того, просторове положення ПЕ залежить від характеру ФП під час руху робота: притискна поверхня ПЕ може бути розміщена під кутами до ФП, які зазвичай змінюються для нового положення. Тому в такому разі доцільно використовувати гібридний спостерігач з розділу 3.3.

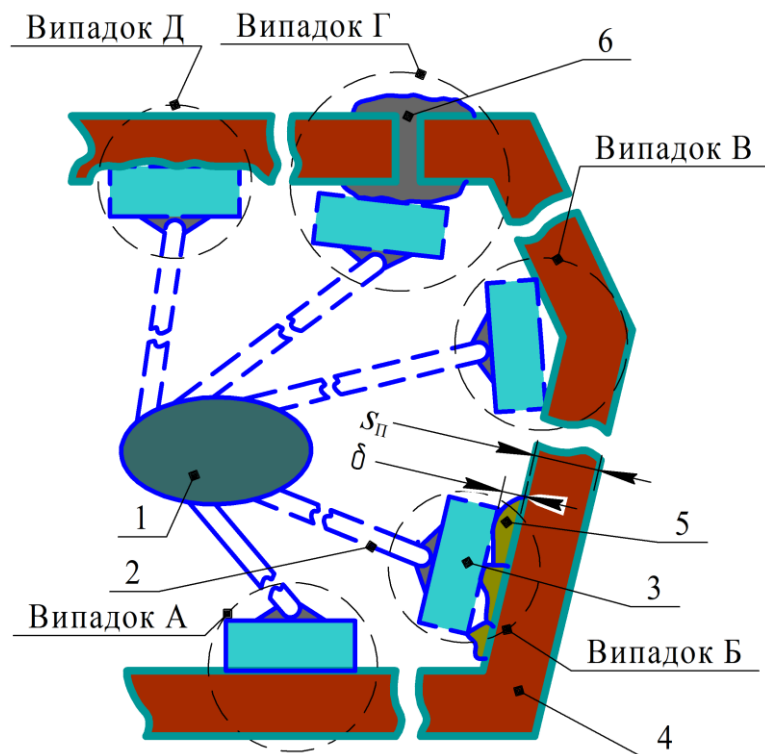


Рисунок 3.23 – Випадки розташування компонентів МРБП та ФП

Часто МРБП повинні працювати в умовах невизначеності [176] через неоднорідність робочої поверхні, наприклад, значні шорсткості, забруднення або нерівності, наприклад, викликані людською діяльністю: порожні отвори, зварні з'єднання, конструкційні елементи тощо. Випадок В аналогічний попередньому, але зміни повітряного зазору викликані особливостями конструкції корпусу. Випадок Г на рисунку 3.23 показує наявність зварного шва на ФП, тобто товщина ФП змінюється ($s = \text{var}$), вона зростає, але не рівномірно. У судноремонті випадок Д більш широко поширений, тому що кожен день корпуси суден псуються під час роботи в морській і прісній воді (їх

товщина під час експлуатації зменшується). Внаслідок великої кількості ремонтів товщина ФП практично не однакова на площі корпусу ($s_{\Pi} = \text{var}$). Відзначимо, що неферромагнітні та ферромагнітні особливості робочих ФП не є тотожними між собою, а останні можуть бути враховані лише після розгляду особливостей їх електромагнітної взаємодії з ПЕ [9, 177]. Крім того, враховуючи вищевикладене, існує нагальна задача вибору кількості ПЕ та їх потужності на етапі проектування робота, але це дуже складна і багатопараметрична задача, що вимагає великої кількості розрахунків на основі методів теорії поля [3, 178]. У той же час методи комп'ютерного моделювання [67, 179] показують їх ефективність і дешевизну, порівняно з іншими підходами, особливо експериментальними. Отже, на етапі розробки мобільного робота доцільно розглянути можливості комп'ютерного моделювання для вивчення взаємодії електромагнітних об'єктів та ефективності роботи ПЕ. Далі доцільно розглянути електромагнітні процеси взаємодії ПЕ з ФП для дослідження найважливіших факторів формування ПЗ, а також шляхи їх подальшого врахування при розробці магніто-індуктивного спостерігача ПЗ.

Феноменологічною основою функціонування магнітокерованого колісного рушія МРБП, який розглянуто в розділі 2.1.2, є формування ПЗ ПЕ завдяки магнітної взаємодії (тобто – за допомогою магнітного поля $\hat{H}$) елементів ФП з полюсами електромагніту. 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 [9]:

$$f_{\zeta}(x_k, y_k) = \sigma_m(x_k, y_k) H_{\zeta}(x_k, y_k), \quad (3.3)$$

де точка (x_k, y_k) – центр k -ї елементарної ділянки полюса магніту, σ_m – щільність "магнітних зарядів"; H_{ζ} – компоненти магнітного поля в точках (x_k, y_k) .

Рівняння (3.3) відрізняється від залежності, отриманої в роботі [172] для постійного магніту. Порівнюючи їх, зрозуміло, що при описі постійного магніту, його намагніченість залишається (є) однаковою по своїй поверхні у відповідності з прийнятою моделлю постійного магніту. При цьому для ПЕ

щільність "магнітних зарядів" σ_M є функцією координат полюсної грані (x_k, y_k) , яка визначається рішенням польової задачі [9].

Тому, ПЕ мають оснащуватися датчиками Холла для вимірювання значень магнітної індукції та визначення параметрів магнітного потоку та магнітної провідності зазору за допомогою розрахунків для відстеження варіацій ПЗ. Для цього до складу СЗ [3] додається вбудований запрограмований процесор або логічний контролер, який реалізує алгоритм обчислення магнітного потоку та магнітної провідності на основі розв'язання рівняння Лапласа для потенціалу магнітного поля у специфічній формі:

$$\Delta U(x, y, z) \equiv \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \equiv -\rho_M,$$

яка може бути інтерпретована як рівняння Пуассона у двовірній прямокутній області (площині полюса електромагніту), де U – магнітний потенціал, а ρ_M – щільність умовного «магнітного заряду», що дорівнює

$$\rho_M = \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \equiv \frac{\partial B_n}{\partial n},$$

де $\partial B_n / \partial n$ – нормальна до поверхні полюса похідна складової магнітної індукції. За методом Фур'є 2-мірний потенціал має вигляд:

$$U(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n e^{\frac{n\pi}{b_M} x} + B_n e^{-\frac{n\pi}{b_M} x} \right) \sin \frac{n\pi}{b_M} y + \left(C_n e^{\frac{n\pi}{a_M} y} + D_n e^{-\frac{n\pi}{a_M} y} \right) \sin \frac{n\pi}{a_M} x, \quad (3.2)$$

де a_M та b_M – розміри прямокутного полюсу, а невідомі коефіцієнти A_n , B_n , C_n та D_n визначаються зі специфічних крайових умов, які відрізняють цю задачу від традиційних задач Діріхле та Неймана, а саме: для визначення A_n , B_n , C_n та D_n складається система лінійних алгебраїчних рівнянь, в якій похідні вказаного потенціалу $U(x, y)$ прирівнюються до вимірюваних значень індукції, отриманих шляхом інтегрування виразу $\rho_M = -\Delta U(x, y)$. Інтегральне значення ПЗ в умовах невизначеності характеристик поверхні і нерівномірності зазору між ПЕ і ФП,

навіть з однаковим значенням магнітного потоку ПЕ, залежить від розподілу магнітної індукції в зазорі.

На основі теорії поля розроблено модель магніто-індуктивного СЗ ПЕ, яка дозволяє враховувати феромагнітні та неферомагнітні невизначеності робочої ФП. Отримані рівняння враховують феромагнітні та неферомагнітні невизначеності робочої ФП та можуть бути вирішені чисельно з використанням методу скінчених елементів. Запропонована мультисенсорна система контролю і керування ПЗ магніто-керованих мобільних роботів з магніто-індуктивним СЗ та результати комп'ютерного моделювання наведені в додатку Г [9, 17, 26, 41].

3.5. Висновки за розділом 3

За результатами проведених в розділі 3 досліджень можна зробити наступні висновки.

Розглянуто ряд САК основними координатами МРБП, зокрема: притискним зусиллям F , лінійною швидкістю переміщення V_{MP} та курсовим кутом φ_{MP} – на основі традиційних регуляторів, налаштованих методом параметричної оптимізації показників якості перехідних процесів.

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 параметрів позиціонування мобільного робота, а саме: значення курсу і швидкості переміщення по похилій поверхні – і показує недостатність традиційного підходу до налаштування параметрів регуляторів.

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, навчання якої проведено на основі генетичного алгоритму з використанням комплексної фітнес-функції 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 при пуску, 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).

При відпрацюванні навантаження перехідний процес системи з НРПР за швидкістю має на 34,5 % та на 56,5 % менше перерегулювання та час перехідного процесу спочатку дії навантаження, на відміну від системи з традиційними регуляторами швидкості та кута. По завершенні дії навантаження $\sigma_{\max} = 16\%$ і $t_p = 0,125$ с у випадку традиційних регуляторів, коли для системи з НРПР $\sigma_{\max}$ та t_p відсутні. При відпрацюванні збурення за кутом повороту МРБП система з НРПР має на 4,5 % менше перерегулювання (9,5 %) та на 13 % менше значення часу перехідного процесу (0,4 с), на відміну від системи з традиційними регуляторами швидкості та кута, для якої $\sigma_{\max} = 14\%$ та $t_p = 0,46$ с.

Отже, 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).

Сформовано (а) нейро-нечіткі математичні моделі СЗ для ПЕ на основі ННОС з різними типами функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних (трикутною, трапецієвидною, Гаусівською 1-го роду, Гаусівською 2-го роду, π -типу) та (б) нейронні математичні моделі СЗ для ПЕ на основі 3-шарової архітектури класичної нейронної мережі зі змінюваною кількістю нейронів у прихованому шарі, які здатні адаптуватися до невизначеностей робочої поверхні не феромагнітної природи виникнення і дозволяють попередньо ідентифікувати величину ПЗ, що формується перед безпосереднім зчепленням ПЕ робота з робочою поверхнею в зоні притискного електромагніту та перед виконанням чергового кроку роботом. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання та адекватності розроблених моделей СЗ показав, що найвищу адекватність реальним процесам має модель з

Гаусівського типу 2-го роду функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних ННОС ($R^2 = 0,974$). Запропонований підхід забезпечує підвищення гарантоспроможності МРБП, адаптивних до невизначеностей ФП, в цілому завдяки визначенню формованого сумарного ПЗ мобільного робота перед виконанням чергового кроку переміщення.

Розроблено мультисенсорні системи дистанційного контролю і керування ПЗ магніто-керованих мобільних роботів зі спостерігачами, синтезованими на основі а) нейро-нечітких технологій, що враховує невизначеності поверхні не феромагнітної природи виникнення, та б) засобів теорії поля, що враховує невизначеності поверхні феромагнітної природи виникнення. У випадку а) вхідними параметрами спостерігача є напруга живлення електромагніту, кути нахилу його притискної грані до ФП та виліт висувної спиці. Для випадку б) спостерігач опрацьовує дані про поточне значення магнітної індукції в зазорі між притискним магнітом та поверхнею. Застосування даних мультисенсорних систем дозволяє здійснювати контроль та автоматичне керування ПЗ без наявності відповідних датчиків сили, а також в цілому підвищити надійність процесів руху робота перед виконанням чергового кроку.

РОЗДІЛ 4

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ ЗАСОБИ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Комп'ютеризовані засоби систем контролю та керування служать для забезпечення керування переміщенням, зокрема рушіями та ПЕ з урахуванням взаємодії транспортної системи з навколишнім середовищем [4], та роботою ТО, здійснення поточного контролю усіх робочих параметрів самого робота та поточної операції, які мають відповідати заявленому рівню якості [3, 5, 172].

Комп'ютеризована система контролю і керування (КСКК) МРБП складається з інформаційно-керуючої частини (контролера МРБП, датчиків, засобів машинного зору та мікропроцесорів попередньої обробки даних), розташованих на роботі; поста оператора робота (панель керування, пристрої відеоспостереження, комп'ютер для обробки даних); комплекту приймальних і передавальних пристроїв, що забезпечують передачу даних від робота до постів оператора та команд керування від поста оператора до МРБП [4]. Складність системи керування визначається складністю вирішуваної задачі, ступенем невизначеності зовнішнього середовища та необхідним ступенем автономності робота. Саме розробка систем керування визначає розвиток робототехнічних комплексів в цілому [4]. Розглянемо далі структурну організацію та програмно-технічні засоби КСКК МРБП.

4.1. Структурна організація та програмно-технічні засоби комп'ютеризованої системи контролю і керування МРБП

Суттєвим недоліком існуючого технологічного обладнання для руху по похилих поверхнях відповідно до вимог з надійного обслуговування є низький рівень автоматизації, що призводить до його неефективного використання, неможливості роботи в оптимальних режимах і, як наслідок, зниження якості виконуваних операцій. Це пов'язано з тим, що спеціалізовані мобільні роботи, які використовуються для реалізації переміщення технологічного обладнання

по криволінійних поверхнях, являють собою складні багатокомпонентні об'єкти керування з випадково змінюваними умовами функціонування. Крім того, вимірювання, контроль та керування деяких їх експлуатаційних параметрів викликають ряд труднощів через особливості заданих технологічних операцій. Таким чином, для ефективної роботи з високими енергетичними та економічними показниками МРБП мають оснащуватися передовими КСКК (як правило, з ієрархічною розгалуженою структурою), які опрацьовують дані, отримані під час виконання завдань в режимі реального часу [27, 187].

Для виконання формалізованих у розділі 2.2 завдань контролю та автоматичного керування рухом та заданих операцій гусеничним МРБП на великих похилих ФП рекомендується використовувати КСКК, розроблена функціональна структура якої представлена на рисунку 4.1, де прийняті наступні позначення: ГДС – група датчиків навколишнього середовища; ГДД – група додаткових датчиків; ГОД – група основних датчиків; ДС – датчик притисної 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; G_{MP} – вплив МРБП на робоче середовище; G_{PC} – вплив робочого середовища на МРБП; P_{PC} – основні параметри робочого середовища; P_{MP} – додаткові робочі параметри МРБП; F_{MP} – ПЗ МРБП, що діє на ФП; ϕ_{MP} – кут повороту робота; V_{MP} – лінійна швидкість переміщення МРБП; F_{PE1} , F_{PE2} – ПЗ першого та другого ПЕ МРБП; S_{P1} , S_{P2} – лінійні переміщення першого та другого рушія МРБП; U_{GDC} – вихідні сигнали ГДС, які відповідають основним параметрам робочого середовища; U_{GDD} – вихідні сигнали ГДД, які відповідають додатковим робочим параметрам МРБП; u_{DC} – вихідний сигнал датчика (або СЗ) ПЗ МРБП, що діє на ФП; u_{DK} – вихідний сигнал датчика кута повороту МРБП; u_{DSh} – вихідний сигнал датчика швидкості МРБП; u_{PE1} , u_{PE2} – сигнали керування першим та другим ПЕ МРБП; u_{P1} , u_{P2} – сигнали керування першим та

другим рушієм МРБП; $U_{ПЗ}$ – вихідні сигнали БКПЗ, які відповідають поточному значенню ПЗ; $U_{КПЗ}$ – сигнали керування для блоку керування ПЗ; $U_{ДП}$ – вихідні сигнали БКП, які відповідають курсовому куту та швидкості переміщення; $U_{КП}$ – керуючі сигнали для БКП МРБП; U_P – вихідні сигнали, що відповідають основним робочим параметрам МРБП; $U_{КМКП}$ – сигнали керування МКП; $U_{ΣРП}$ – вихідні сигнали МКТ, що відповідають основним робочим параметрам МРБП з урахуванням стану робочого середовища; $U_{КМКТ}$ – керуючі сигнали для МКТ.

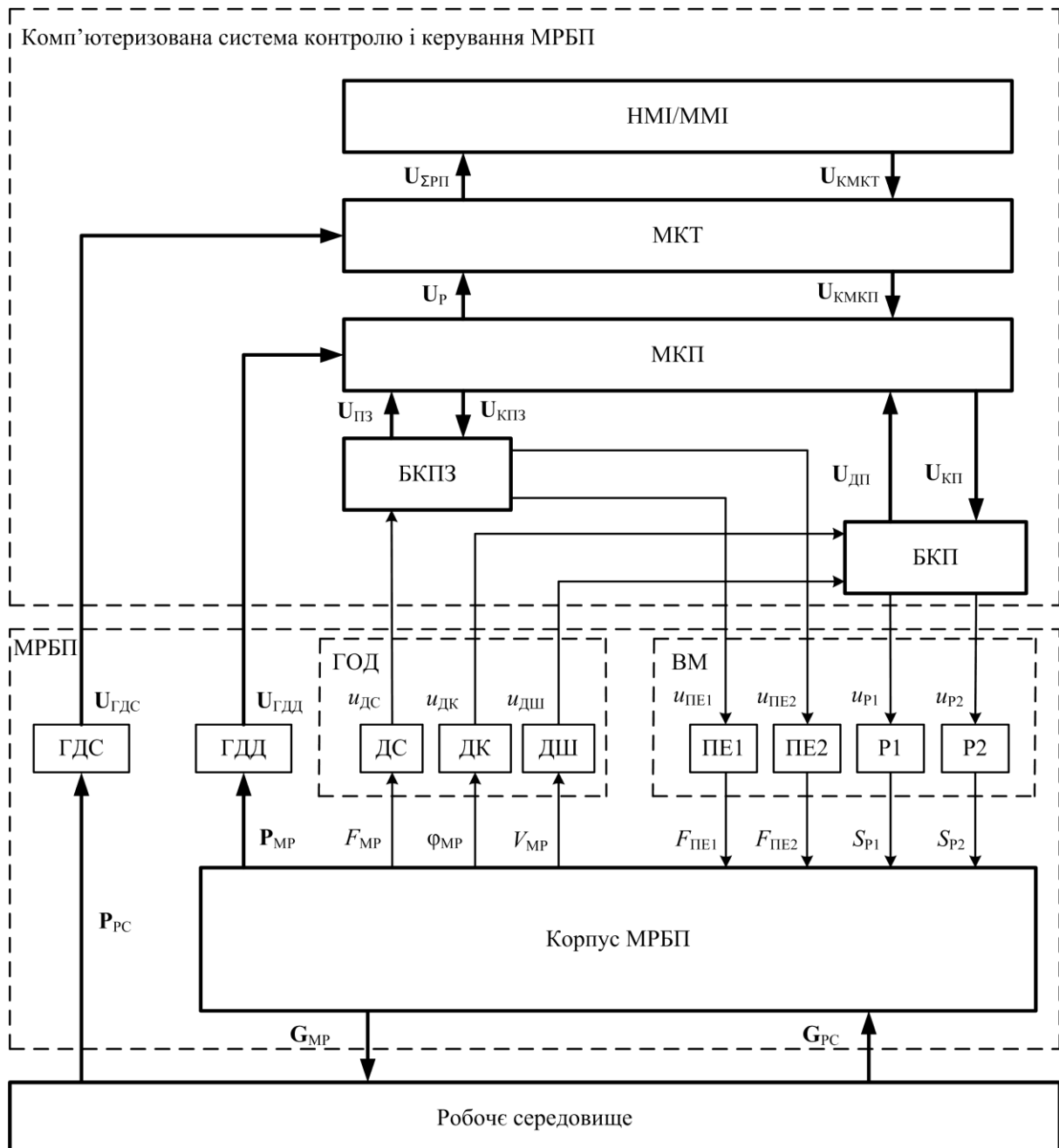


Рисунок 4.1 – Функціональна структура КСКК МРБП

Функціональна структура КСКК МРБП призначена для контролю, автоматичного керування та візуалізації основних параметрів МРБП в режимі реального часу. Відповідно до рисунку 4.1, система діє наступним чином. По-перше, оператор (або вищий рівень САК) визначає необхідну траєкторію руху МРБП, використовуючи інструменти та засоби редагування НМІ/ММІ. Після цього МКТ обчислює окремі точки руху МРБП для заданої траєкторії (сигнали $U_{\text{КМКП}}$). Далі МКП перетворює отримані координати та генерує відповідні керуючі сигнали для кожної точки руху МРБП (вектори сигналів $U_{\text{КПЗ}}$ та $U_{\text{КП}}$). Ці сигнали сприймаються БКПЗ та БКП, які безпосередньо керують поточними ПЗ ($F_{\text{ПЕ1}}$ та $F_{\text{ПЕ2}}$) та переміщенням (S_{P1} та S_{P2}) МРБП.

Поточні ПЗ, утворені ПЕ1 і ПЕ2, кут повороту та швидкість МРБП вимірюються за допомогою відповідних датчиків. Отримані вимірювання використовуються для корекції керуючих впливів на двигуни та ПЕ МРБП. Крім того, система містить ГДД, що виконує вимірювання додаткових параметрів МРБП, таких як: струм в обмотці двигуна приводу (для Р1 і Р2), амплітуду вібрації корпусу робота, показники якості операцій, що виконуються роботом. Основні параметри навколишнього середовища, що впливають на планування траєкторій, вимірюються за допомогою ГДС. Вони можуть відстежувати невраховані перешкоди, значні пошкодження або структурні особливості окремих ФП, розміщення інших робототехнічних пристроїв.

Вимірювання робочих параметрів МРБП та робочого середовища здійснюються у відповідних одиницях функціональної структури (рисунок 4.1). У цьому випадку найважливіші з них відображаються через НМІ / ММІ на екрані комп'ютера оператора. НМІ / ММІ додатково містить засоби для візуалізації експлуатаційних параметрів МРБП у вигляді таблиць і графіків, відтворюючи їх із записаної бази даних історії вимірювань для подальшої обробки, модифікації алгоритмів керування тощо [27].

Необхідно відзначити, що основними виконавчими механізмами МРБП є двигуни (в Р1 і Р2 на рисунку 4.1), притискні пристрої (ПП1 та ПП2) та необхідне технологічне обладнання – очисний інструмент, фарборозпилювач,

маніпулятор (опціонально). Для промислового застосування запропонованої системи механізми приводів повинні підключатися до мережі з використанням відповідних автоматичних вимикачів, контакторів, теплових реле [8, 27].

Для апаратної реалізації вищезгаданої системи для контролю та автоматичного керування основними робочими параметрами МРБП пропонується використання сучасних датчиків та перетворювачів. Готові до використання рішення на основі ПЛК, плат розробки на базі мікроконтролерів, модулів вводу/виводу, які дозволяють прискорити процес проектування та зменшити кількість помилок при процедурах тестування. Як правило, такі пристрої мають нормовані значення струмів, напруг, дискретні входи та виходи, і використовуються як модулі для збору даних для аналогових та дискретних входних сигналів або для активації механізмів автоматичного керування [188]. Також вони можуть забезпечити роботу інтерфейсу USB для перетворення RS-232/422/485 і навпаки для підключення модуля до ПК при тестуванні та налагодженні системи [163, 189].

Відповідно, доцільно розмістити МКТ на ПК, МКП – на ПЛК, а також БКПЗ і БКП – на базі мікроконтролера або модулів вводу / виводу в поточній системі для реалізації експериментального зразка. Як головний операційний блок, ПЛК має високопродуктивний процесор і включає в себе інтерфейси для зв'язку з ПК та модулями вводу / виводу. Відповідні модулі збору даних перетворюють аналогові сигнали $u_{дс}$, $u_{дк}$, $u_{дш}$ на відповідні цифрові, які передаються в ПЛК через шину за відповідним протоколом. Інформація про поточні ПЗ, що діють на ФП, кут повороту МРБП та лінійну швидкість переміщення, відображаються на екрані ПК оператора за допомогою НМІ [4].

Необхідно відзначити, що при розробці або виборі програмно-технічних засобів для реалізації КСКК для контролю і керування МРБП необхідно враховувати сумісність обладнання (контролерів процесів, промислових комп'ютерів, модулів збору даних, засобів для реалізації промислових мереж) з відповідним програмним забезпеченням (операційною системою, інтерфейсом оператора, засобами формування баз даних та реалізації керуючих алгоритмів).

Для автоматизованого керування технологічними процесами ці завдання успішно вирішуються завдяки використанню систем керування та збору даних (SCADA-системи) [20, 21, 187 – 190]. Зазвичай виробники обладнання для систем автоматизації пропонують власні SCADA-системи з бібліотеками готових елементів та зручних інструментів візуалізації та програмування [190]. В робототехніці такі системи знайшли застосування для стаціонарних роботів-маніпуляторів, зазвичай для задання та контролю значень кутового положення та швидкості окремих ланок маніпулятора з відображенням зміни їх положень на фоні робочої зони [191]. Для мобільних роботів використання SCADA-концепції у чистому вигляді [23, 192] є ускладненим, тому що оператору або САК МРБП необхідно отримувати інформацію про навколишнє середовище (стан ФП, перешкоди на шляху), якість поточної операції, тощо в різних точках цього середовища. Людино-машинний інтерфейс (HMI) є важливою частиною будь-якої системи моніторингу, контролю та керування. В SCADA-системах ефективність взаємодії диспетчера з системою збільшується, і кількість його можливих критичних контрольних помилок значно знижується завдяки зручності HMI, наявності спливаючих підказок та передбачуваності поведінки об'єкту керування. Однак, існуючі рішення розробки HMI в галузі SCADA-систем не підходять для завдань керування МРБП.

Тому, враховуючи той факт, що широкого розповсюдження набувають технології промислового «Інтернету речей», які дозволяють керувати технологічними процесами через мережу Internet [42, 193], доцільно далі розглянути систему керування МРБП на їх основі.

4.2. Експериментальна модель комп'ютеризованої системи дистанційного керування переміщенням гусеничного мобільного робота на основі засобів «Інтернету речей»

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – концепція комп'ютерної мережі фізичних об'єктів ("речей"), оснащена вбудованими технологіями для спілкування між собою і з навколишнім середовищем. Відносно нещодавно організація таких мереж стала розглядатися як явище, яке може перезапустити

економічні та соціальні процеси, а також виключити необхідність втручання людини в дії та операції. Наповнення концепції IoT багатогранним технічним змістом та впровадження практичних рішень для її реалізації вважається стійкою тенденцією в інформаційних технологіях насамперед завдяки широкому поширенню бездротових мереж, появі хмарних обчислень, розвитку обчислювальної техніки, переходу на нові Інтернет-протоколи та розробці програмно-налаштовуваних мереж [194-196]. Поширеними прикладами реалізації концепції IoT є системи «Розумного дому», «Розумної ферми», «Розумного міста», «Розумного середовища», «Розумного транспорту», «Розумного підприємства» та інших [197-199].

Суттєві переваги використання технології інтренету речей можна отримати в промисловості [19]. Технології інтренету речей надають унікальні можливості розробникам апаратних засобів та програм для комплексної обробки даних, систем моніторингу та керування, а також багаторівневих людино-машинних інтерфейсів, розроблених для моніторингу та керування основними параметрами технологічних процесів. Промислова система на базі інтренету речей (промисловий інترنت речей) – це багаторівнева система, що включає в себе датчики і контролери, встановлені на вузлах і агрегатах промислового об'єкта, засоби збору, передачі, візуалізації даних, аналітичні інструменти інтерпретації одержуваної інформації та ін. компоненти [192].

В сучасній промисловості для виконання завдань МРБП повинні використовувати передові системи контролю і керування (зазвичай з ієрархічною розгалуженою структурою, див. розділ 1.4) на основі даних, отриманих під час виконання поточних технологічних операцій в режимі реального часу [27] для ефективної роботи з високими енергетичними та економічними показниками. Крім того, КСКК МРБП повинна забезпечувати можливість автоматично надсилати дані у разі виникнення надзвичайної ситуації відповідальним користувачам мережі підприємства. КСКК повинна мати розвинене, високо інтегроване середовище програмування, яке є досить гнучким і простим для розширення, а також гнучкими мережевими засобами з

можливістю підключення до онлайн-експертної системи для більш детального аналізу даних (наприклад, зі спостерігача ПЗ). Існують готові до використання інструменти на основі хмарних сервісів: Google Cloud Platform, Amazon EC2 та інші онлайн-платформи. Деякі робочі інструменти можуть бути реалізовані у хмарних службах. В іншому випадку розробник повинен самостійно створити необхідні інструменти або використовувати інструменти, наприклад з набору утиліт, бібліотек і основи для розробки та виконання розподілених програм, що працюють на кластерах з сотень і тисяч вузлів типу Hadoop [200].

Сучасні апаратні засоби реалізації САК мобільних роботів у промисловому виконанні (ПЛК, модулі збору даних, модулі виводу), а також програмні середовища розробки проектів систем керування є дуже високовартісними. Тому, для дослідницької мети та вирішення завдання розробки програмно-технічних засобів, людино-машинного інтерфейсу та експериментальної моделі КСКК для керування МРБП з використанням технологій «Інтернету речей» вирішено використати більш дешеві засоби розробки. На рисунку 4.2, а представлена експериментальна модель мобільного робота. В якості вбудованого керуючого модуля, який одночасно є і засобом комунікації між оператором та роботом, обрано популярний недорогий засіб реалізації систем IoT – плату розробки NodeMCU на базі WiFi-модуля ESP8266 [201], Зазначена плата повністю сумісна з платою-драйвером NodeMCU Motor Shield (ESP-12E Motor Shield) для живлення електродвигунів МРБП від окремого джерела [202].

Для розробки програмного забезпечення системи керування експериментальним роботом використано вільнопоширюване середовище програмування Arduino Software (IDE) [203], яке спрощує процес роботи з мікроконтролерами та платами розробки, а також забезпечує ряд переваг перед іншими системами через просте і зрозуміле середовище програмування та велику кількість плат розширення [204].

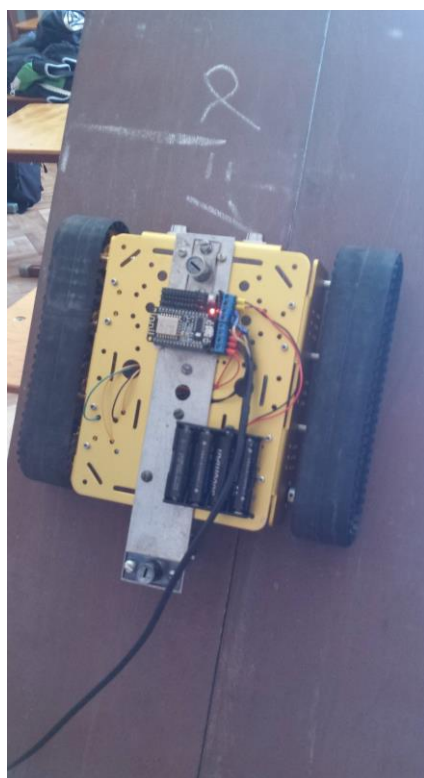
За основу для реалізації концепції IoT та, по суті дистанційного керування роботом через мережу Internet, вибрано додаток Blynk [205] для

смартфону, в якому створено спеціальний інтерфейс (рисунок 4.2, б). Інтерфейс КСКК для керування МРБП в себе включає віртуальний рухомий джойстик у вигляді кола, поточному положенню якого відповідає спеціальний віртуальний PIN для подальших дій обробки заданого положення кола джойстика. В додатку встановлюються номер віртуального PINa та відповідні йому два параметри (координати x та y джойстика) для синхронізації додатка з основною програмою в контролері плати NodeMCU.

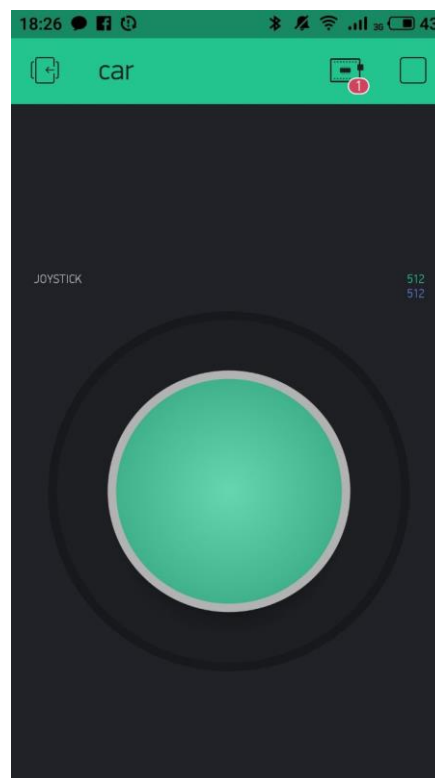
Джойстик складається з трьох кіл: зовнішнього, робочого (внутрішнього) і пересувного, які показані на рисунку 4.2, в. Пересувне коло є границею круга джойстика, знаходиться всередині зовнішнього кола і може вільно пересуватися в його межах. Робоче коло обмежує границі робочої зони джойстика (центра його круга), тобто коли пересувне коло доходить до краю зовнішнього кола, центр пересувного кола переміщується до краю робочого кола. Тим самим пересувне коло, візуально, переміщується всередині зовнішнього кола, не виходячи з нього.

Програмно встановлено два основні режими (стани) робота: рух і стан спокою. Центральне положення джойстика (точка $O_{Ц1}$ на рисунку 4.2, в) відповідає стану спокою робота. Щоб позбавитися від'ємних значень координат положення центра джойстика вибрано дві осі x та y (координатні осі, в яких буде переміщуватися центральна точка пересувного кола) з початком відліків за межами зовнішнього кола (рисунок 4.2, в). Враховуючи, що робоче коло має діаметр 1024 пікселя, координати точки $O_{Ц1}$ є серединою діаметра робочого кола (512; 512). Джойстик автоматично встановлюється в центральне (початкове) положення, якщо з ним не взаємодіють.

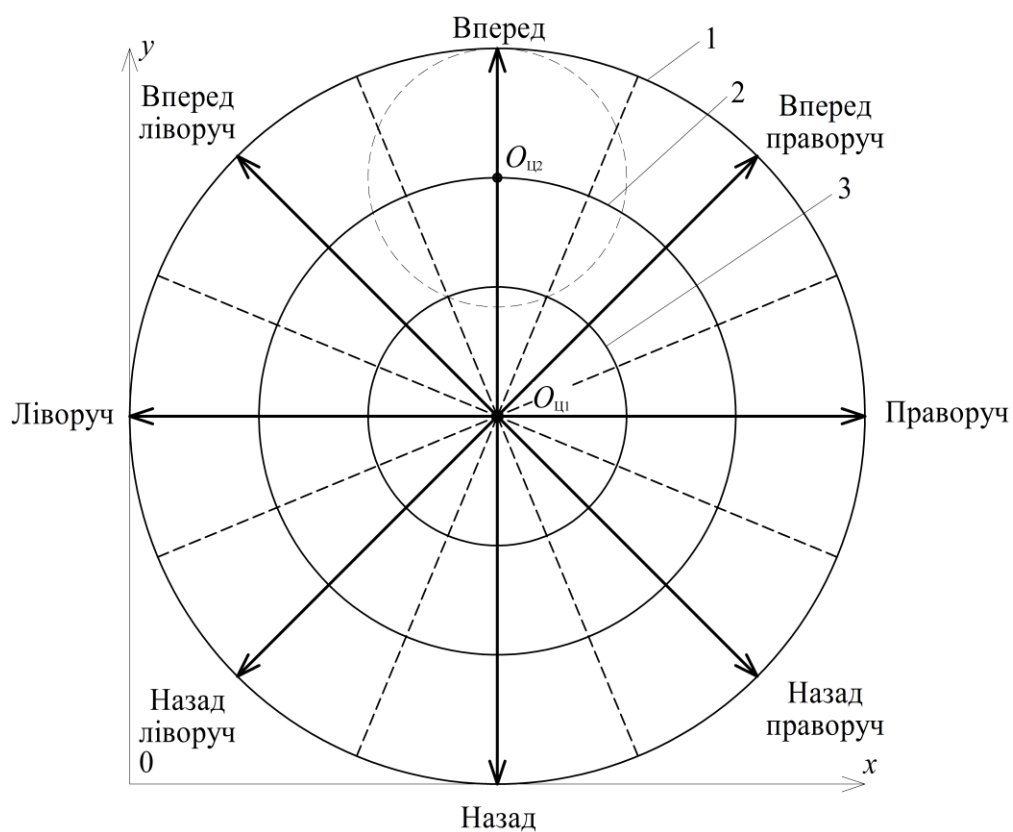
При переміщенні джойстика по робочій області, може встановлюватися один з восьми напрямків руху: вперед, назад, вправо, вліво, вперед вправо, вперед вліво, назад вправо, назад вліво (на кожен напрямок припадає 45° центрального кута). Положення центру джойстика в одному з восьми утворених сегментів вказує на переміщення саме в цьому напрямку (напрямок «Вперед» при положенні центру джойстика в точці $O_{Ц2}$ на рисунку 4.2, в).



а)



б)



в)

Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд експериментального МРБП (а), додатку для дистанційного керування ним (б) та схема переміщення джойстика по робочій зоні із зовнішнім (1), робочим (2) і пересувним (3) колами (в)

Додаток Blynk може працювати як по провідній так і по безпроводній лінії зв'язку. Для керування МРБП обрано бездротову передачу за WiFi-протоколом. На початковому етапі розробки додаток і бортова плата робота обмінювалися даними тільки за умови що обидва пристрої (плата і пристрій з додатком) підключені до спільної точки доступу. Далі систему було налаштовано з керуванням роботом через глобальну мережу Internet, причому бортова плата NodeMCU – через маршрутизатор, а смартфон з додатком - через 3G. В тілі програми вказується ім'я мережі і ключ доступу. Тоді, після подачі живлення на плату і запуску додатка відбувається їх синхронізація (про це сповіщає відповідне повідомлення в додатку). Така система дозволяє здійснювати дистанційне керування гусеничним роботом з будь-якої точки світу при наявності доступу до мережі Internet, наприклад при недостатній кваліфікації чергового оператора в нестандартних ситуаціях.

4.3. Інформаційні системи очулення для забезпечення функцій багатоцільових мобільних роботів на основі датчиків проковзування

МРБП можуть оснащуватися технологічними маніпуляторами захоплювання та переміщення об'єктів. У випадку мобільної робототехніки маніпуляційні захвати діють у динамічно змінюваному середовищі (об'єкти маніпулювання випадковим чином можуть потрапляти в робочу зону робота-маніпулятора, на шляху переміщення захопленого об'єкту можуть виникнути перешкоди і т. ін.). Крім того, параметри об'єктів можуть відрізнятися [22, 69, 206], зокрема маса, геометричні розміри, шорсткість поверхні та ін., які також можуть змінюватися при виконанні маніпуляційних процедур. Таким чином, у конкретній ситуації захоплювання робот не може утримувати маніпульований об'єкт через недостатнє значення зусилля стискання (ЗС) губок захвату. У цьому випадку об'єкт спочатку ковзає вздовж поверхні захоплювання (спостерігається явище проковзування). Після цього захват робота втрачає об'єкт, і він падає під дією зовнішніх сил. Аналогічно конструкція МРБП може втратити зчеплення з ФП у випадку дії надмірних навантажень, наприклад при маніпулюванні надважким об'єктом [2].

В обох випадках проблема реєстрації проковзування може бути надійно вирішена шляхом оснащення роботів своїми тактильними сенсорними системами, здатними розпізнавати маніпульовані об'єкти [22, 29], на базі датчиків проковзування (ДП). У конструкціях маніпуляторів ДП зазвичай встановлюються в захватах і використовуються для детектування проковзування, у конструкціях МРБП їх можна монтувати в ПП або в окремі елементи конструкції. Якщо проковзування має місце в даний момент, величина ПЗ, створеного ПЕ, або ЗС, створеного адаптивним захватом, особливим чином збільшується і стає відповідною до параметрів об'єкта (наприклад, маси) [2]. Крім того, особливості створення ЗС обумовлені основними вимогами до захватів: надійне захоплення, утримання об'єкта і точне позиціонування без руйнування або пошкодження.

Звичайно, застосування ДП не є достатнім для надійного утримання конструкції МРБП на ФП та захоплення об'єкта маніпулювання [2]. Дуже важливими є також сенсорні системи, які дозволяють опрацьовувати інформацію вихідних сигналів таких датчиків [53, 207]. Для підвищення ефективності сенсорних систем з ДП доцільно використовувати сучасну елементну базу та інтелектуальні засоби, зокрема нечіткі системи та системи підтримки прийняття рішень [2, 208], які дозволять забезпечити необхідний рівень надійності і безпеки при різних змінах умов експлуатації, оскільки сфера застосування МРБП не обмежується простими операціями транспортування об'єктів з постійною масою по заданих траєкторіях [29]. Розглянемо далі покращені технічні рішення та розвинутий метод визначення напрямку проковзування на прикладі адаптивного захвату маніпулятора МРБП.

У робототехнічних маніпуляційних системах визначення сигналу проковзування здійснюється при проведенні спробних рухів або при безперервному підйомі руки маніпулятора [208] шляхом ідентифікації проковзування між пальцями або губками захвату (рисунк 4.3). Отже, виконується серія спробних рухів для визначення необхідних значень ЗС F_d або F_{dr} ($F_{dr} = k_3 F_d$, де k_3 – коефіцієнт запасу для переміщення по траєкторії, $k_3 > 1$).

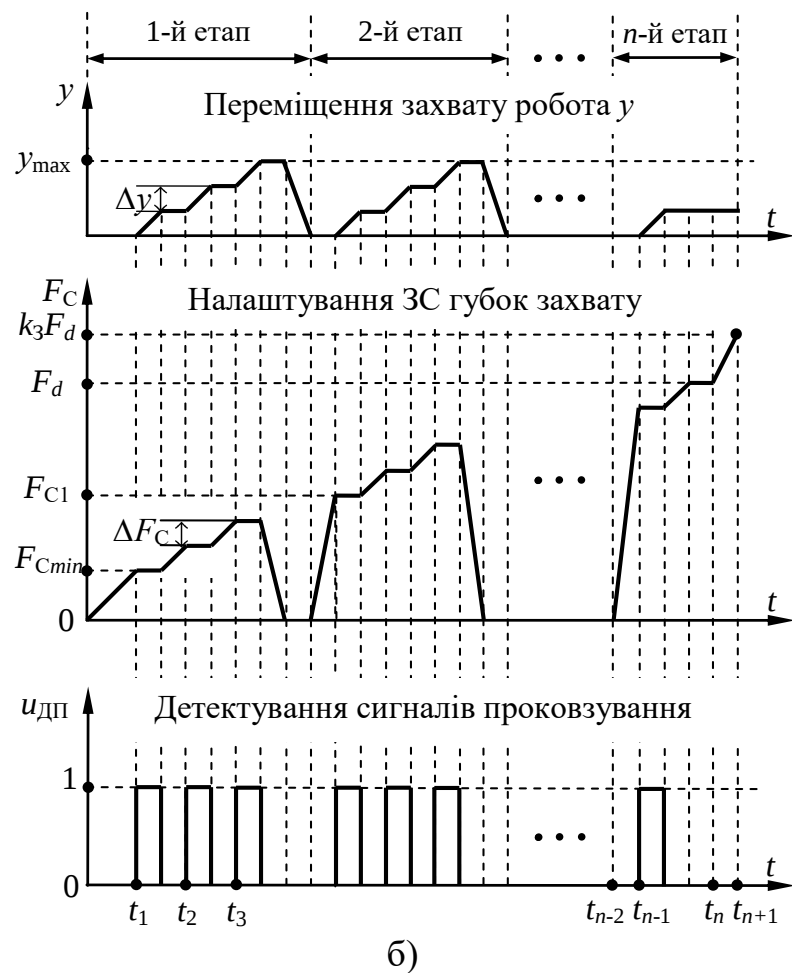
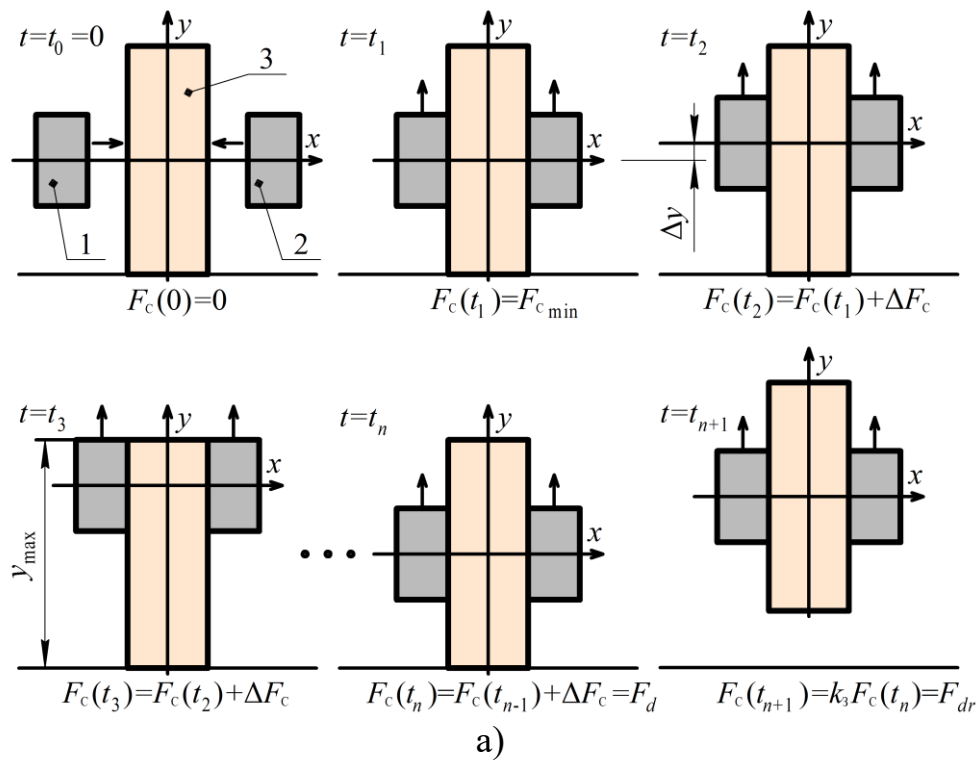


Рисунок 4.3 – Схема багатоетапного процесу захоплювання та підняття об'єкта захватом робота з пробними рухами (а) та часові діаграми зміни ЗС з урахуванням сигналів проковзування (б)

Спочатку (у момент часу t_1 на рисунку 4.3) значення ЗС дорівнює F_{Cmin} [208]. Далі об'єкт покроково переміщується роботом на вертикальну відстань Δy . Коли фіксується сигнал проковзування, збільшується значення ЗС ($F(t_1) + \Delta F_C$). Але, захоплювана поверхня об'єкта обмежена деяким значенням y_{max} (наприклад, висотою об'єкта). Враховуючи це обмеження, перша серія пробних рухів завершується в моменті t_3 , $y = y_{max}$ (висота об'єкта закінчилася). Тоді робот розтискає губки захвату, переміщує захват у вихідне положення і після цього в наступні моменти часу створює нові значення ЗС, перед кожним наступним спробним рухом збільшуючи ЗС на ΔF_C (рисунк 4.3, б). Згідно з рисунком 4.3, необхідне ЗС F_d створюється роботом при t_n (проковзування відсутнє), а у період часу t_{n+1} робот створює ЗС F_{dr} з урахуванням запасу.

Як правило, сенсорні системи ДП реєструють наявність проковзування (сигналу проковзування), коли створене значення ЗС губок робота не відповідає поточній масі об'єкта. Сигнал проковзування можна виявити різними методами [2, 22, 23]. Вибір методу реєстрації проковзування визначається призначення робота, особливостями навколишнього середовища, вимогами до продуктивності або перешкодозахищеності, тощо. Розглянемо далі розроблені конструкції ємнісних та резистивного ДП для МРБП, які реалізують метод відхилення чутливого елемента [23].

Модифіковані ємнісні ДП зі стрижневим чутливим елементом. Початкова конструкція (прототип) ДП представлена на рисунку 4.4, а [209], де прийняті наступні позначення: 1 – конічний паз; 2 – губка захвату адаптивного робота; 3 – стрижень; 4 – пружний елемент; 5 – наконечник; 6 – пружина; 7 – робоча поверхня наконечника; 8, 9 – пластини конденсатора; 10 – блок вимірювання; 11 – детектор; 12 – аналого-цифровий перетворювач; 13 – блок корекції СЗ. Таким чином, перший кінець стрижня з'єднаний з губкою за допомогою багатофункціонального пружного елемента, який утримує стрижень з центром у початковому стані і забезпечує його повернення в початковий стан. Наконечник закріплений на іншому кінці стрижня та підпружинений до нього пружиною. Кожна окрема частина багатокомпонентного реєструвального

елемента розроблена у вигляді двох груп пластин конденсатора. Перша група 8 розташована на зовнішній поверхні стрижня, а інша група 9 розміщена на внутрішній стороні конічного пазу. Кожна з захоплюючих губок пов'язана з приводом їхнього переміщення, підключеним до виходу блоку керування приводом губок. Блок корекції СЗ (рисунок 4.4, а) містить блок вимірювання, детектор і аналого-цифровий перетворювач, які з'єднані послідовно. Реалізація цих блоків можлива за допомогою математичних методів, засобів штучного інтелекту і програмно-апаратних пристроїв [29].

В процесі захоплювання зовнішня поверхня об'єкта контактує з наконечником ДП, пружина стискається так, що наконечник занурюється в паз при процедурі захоплювання об'єкту маніпулювання. Блок корекції СЗ реєструє кутове зміщення стрижня при проковзуванні об'єкта відносно губок захвату. Вихідний сигнал реєструвального елемента змінюється внаслідок відхилення стрижня при проковзуванні. Одночасно маніпулятор здійснює серію пробних рухів з об'єктом маніпулювання для здійснення багатоетапного процесу збільшення СЗ (як на рисунку 4.3).

Однак такий ДП має істотні недоліки. Еластичний елемент створює серію коливальних рухів стрижня перед установкою у вихідний стан після розтискання і випускання об'єкта з губок. Це призводить до зниження швидкодії датчика при здійсненні процесу захоплювання. Крім того, при розробці ДП необхідно приділяти особливу увагу підвищенню надійності і захисту елементів робототехнічних систем від пилу, бруду та агресивних речовин. Електричні характеристики ізолятора в таких негерметичних ДП з конденсаторами може змінюватися внаслідок наявності домішок в повітрі. Тому сучасні ДП МРБП повинні містити відповідні захисні компоненти.

Згідно рисунку 4.4, б (де прийняті наступні позначення: 10 – захисна еластична оболонка; 11 – затискне кільце; 12 – різьбові з'єднання, а інші позиції, як на рисунку 4.4, а) пропонується нове рішення, за яким ДП оснащується додатковою еластичною пружною напівсферичною оболонкою 10, яка контактує з робочою поверхнею наконечника 5 [10].

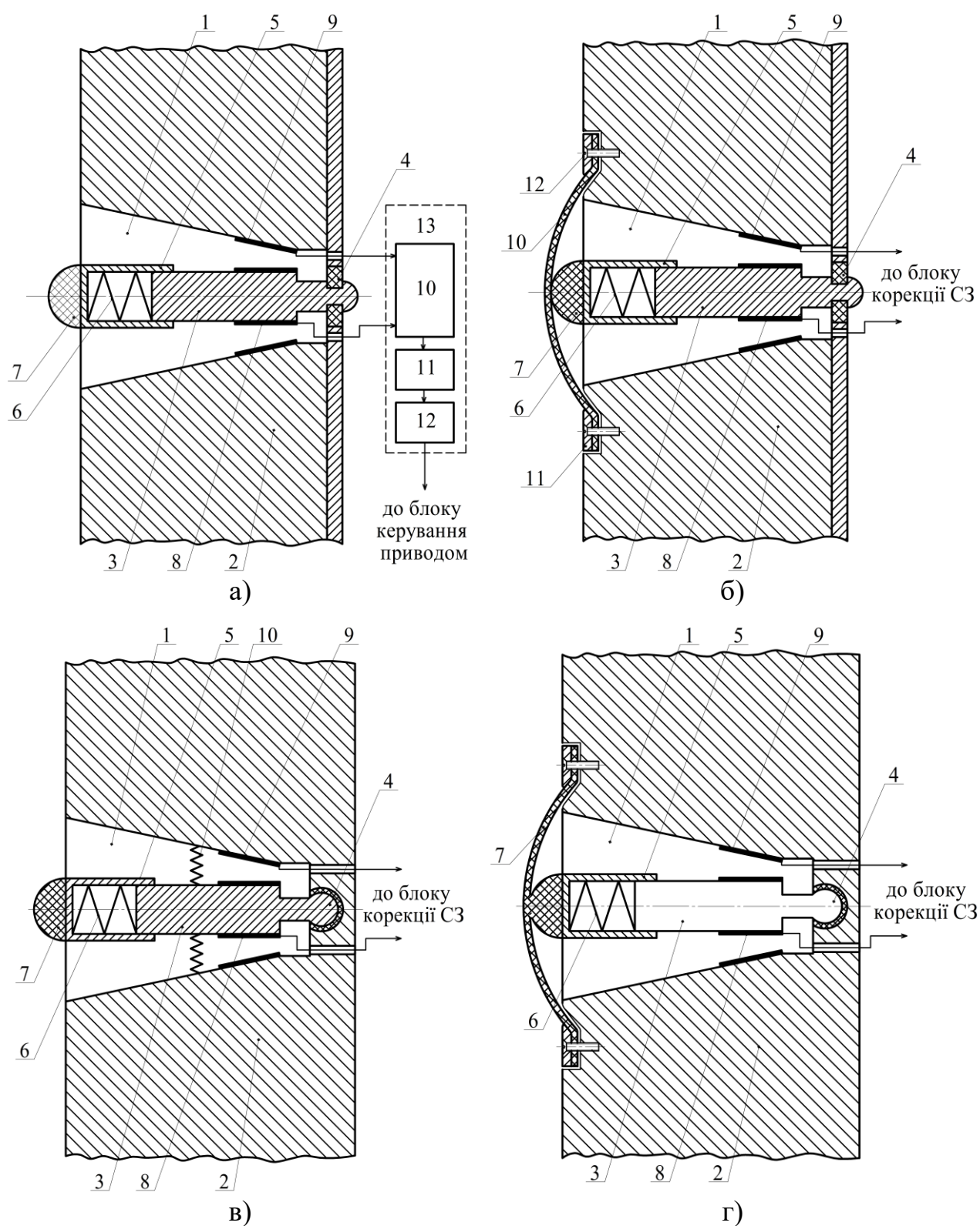


Рисунок 4.4 – Губка захвату МРБП з ДП і схема системи для корекції зусилля стискання губок (а) та модифікації ДП: з напівсферичним типом захисної еластичної оболонки (б), зі сферичним шарніром і багатокомпонентним пружним зворотним елементом (в), зі сферичним шарніром і багатофункціональною напівсферичною еластичною оболонкою (г)

Основа додаткової еластичної оболонки герметично закріплена на контактній поверхні відповідної губки 2 за допомогою затискного кільця 11 і різьбових з'єднань 12. Герметизація конічного пазу додатковою еластичною оболонкою дозволяє забезпечити надійний захист чутливих і реєстраційних елементів від домішок і від зниження функціональних характеристик під впливом навколишнього середовища. Захисна оболонка забезпечує захист від агресивних газів, пилу, рідин, масел, великогабаритних (щодо геометричних розмірів конічного пазу) і електропровідних частин, що потрапляють у паз.

Інший новий підхід до підвищення ефективності ДП полягає у заміні пружного елемента 4 на рисунку 4.4, а на систему циліндричних пружин і сферичного шарніру, які схематично зображені на рисунку 4.4, в, де прийняті наступні позначення: 4 – сферичний шарнір; 10 – циліндрична пружина; інші позиції – як на рисунку 4.4, а. Система циліндричних пружин 10 забезпечує пружний зв'язок між стрижнем 3 і губкою 2. Крім того, вона позиціонує стрижень у початковому стані по центру пазу і повертає його в початковий стан. Сферичний шарнір 4 виключає поздовжні коливання стрижня 3 з конденсаторною пластиною 8 при захоплюванні об'єкта і усуває можливість зміщення центру (точки) повороту стрижня при реалізації спробних рухів роботом [11].

Наступна нова пропозиція полягає в поєднанні попередніх рішень. Згідно з рисунком 4.4, г (де прийняті наступні позначення: 4 – сферичний шарнір; 7 – багатофункціональна еластична оболонка) ДП оснащується напівсферичною пружною оболонкою 7, яка жорстко з'єднана з наконечником стрижня [12]. Інший кінець стрижня з'єднаний з губкою за допомогою сферичного шарніра, а додаткова еластична оболонка герметично закріплена на контактній поверхні відповідної губки.

Сферичний шарнір 4 і багатофункціональна еластична оболонка 7 забезпечують нерухоме стартове положення групи пластин конденсатора 8 (рисунок 4.4, г) під час захоплювання об'єкта. Еластична оболонка утримує стрижень в початковому стані по центру пазу і швидше повертає його в

початковий стан. Також еластична оболонка забезпечує надійний захист стрижня і пластин конденсатора від домішок. Крім того, сферичний шарнір і багатофункціональна еластична оболонка значно зменшують кутові і повністю усувають поздовжні коливання стрижня. Отже, зменшується час захоплення і час між серіями спробних рухів.

Представлені рішення мають аналогічну конструкцію реєструвальних елементів, які є пластинами конічних конденсаторів. Наяність проковзування можна вичерпно описати залежностями координат в часі та їх похідними [29]. Для вирішення завдання реєстрації проковзування доцільно розглянути типовий випадок, коли об'єкт у захваті має один ступінь свободи – по осі u (зміщення центру наконечника з положення N в N' на рисунку 4.5, а).

Для побудови математичної моделі реєструвальний елемент може бути розділений на набір елементарних конденсаторів [29] у вигляді n паралельних з'єднань циліндричних конденсаторів з нескінченною довжиною, утвореною коаксіальними циліндричними пластинами. Таким чином, поздовжній розріз ємнісного датчика можна представити як паралельне з'єднання n циліндричних або плоских конденсаторів. Площа елементарної пластини дорівнює S_K/n , де S_K – загальна площа пластини конічного конденсатора (рисунок 4.5, б) [183 - 185].

Припустимо, що система координат (x, y, z) ортогональна і стаціонарна щодо об'єкта, що проковзує в захваті робота, і внутрішнього циліндра кожного елементарного конденсатора, її початок знаходиться в точці M (рисунок 4.5, б). Зовнішній циліндр кожного елементарного конденсатора є рухомим і може переміщуватися відносно деталі. Відношення проекції переміщення рухомої пластини по осі y (Δy) з відстанями r_1 і r_2 повинно відповідати наступній умові $\Delta y \ll r_1 < r_2$, де r_2 – відстань від осі симетрії до зовнішньої пластини елементарного конденсатора [29, 210].

Відповідно до моделі циліндричного конденсатора [211-214] і ДП [29], враховуючи, що модель гомотетична, ємність розробленого ДП (рисунок 4.5, б) дорівнює

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l_K}{\ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

На рисунку 4.5, б показано, що r_1 має постійне значення вздовж поздовжньої осі циліндра, а r_2 може змінюватися від $r_{2\min}$ до $r_{2\max}$. Радіуси зовнішніх циліндрів залежать від координати вздовж осі z , яка збігається з поздовжньою віссю внутрішніх циліндрів (починаючи з точки M на рисунку 4.5, б), та від кута φ_C як $r_2 = (z + \Delta z)\text{tg}\varphi_C$, де z – поточна координата центру елементарного конденсатора по осі z , $\Delta z = l_{Ki} = l_K/n$ – нескінченно мала довжина елементарного конденсатора. Тоді сумарна ємність кінцевого конденсатора є сумою ємностей елементарних циліндричних конденсаторів:

$$C_\Sigma = \sum_{i=0}^n \frac{2\pi\epsilon_0 \Delta z}{\ln \frac{(z_i + \Delta z)\text{tg}\varphi_C}{r_1 + \Delta x}}.$$

Для малих відхилень $\Delta z \ll z_i$, $\Delta x \ll r_1$ при переході від інтегральної суми до інтеграла отримується

$$C_\Sigma = \int_{z_0}^{z_1} \frac{2\pi\epsilon_0}{z \ln \frac{z \text{tg}\varphi_C}{r_1}} dz, \quad (4.1)$$

де $z_1 - z_0 = l_K$ (рисунок 4.5, б). Отриманий інтеграл (4.1) може бути вирішений шляхом заміни змінної інтегрування, а подальше рішення зводиться до обчислення конвергентного ряду (при $z\text{tg}\varphi_C/r_1 \neq 1$) [29]:

$$C_\Sigma = \frac{2\pi\epsilon_0 r_1}{\text{tg}\varphi_C} \left(\ln A_C - \ln B_C + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{A_C^k}{kk!} - \frac{B_C^k}{kk!} \right) \right), \quad (4.2)$$

де $A_C = \ln(z_1\text{tg}\varphi_C/r_1)$, $B_C = \ln(z_0\text{tg}\varphi_C/r_1)$. Результати моделювання виразу (4.2) для різних значень r_1 між пластинами конденсатора представлені на рисунку 4.5, в.

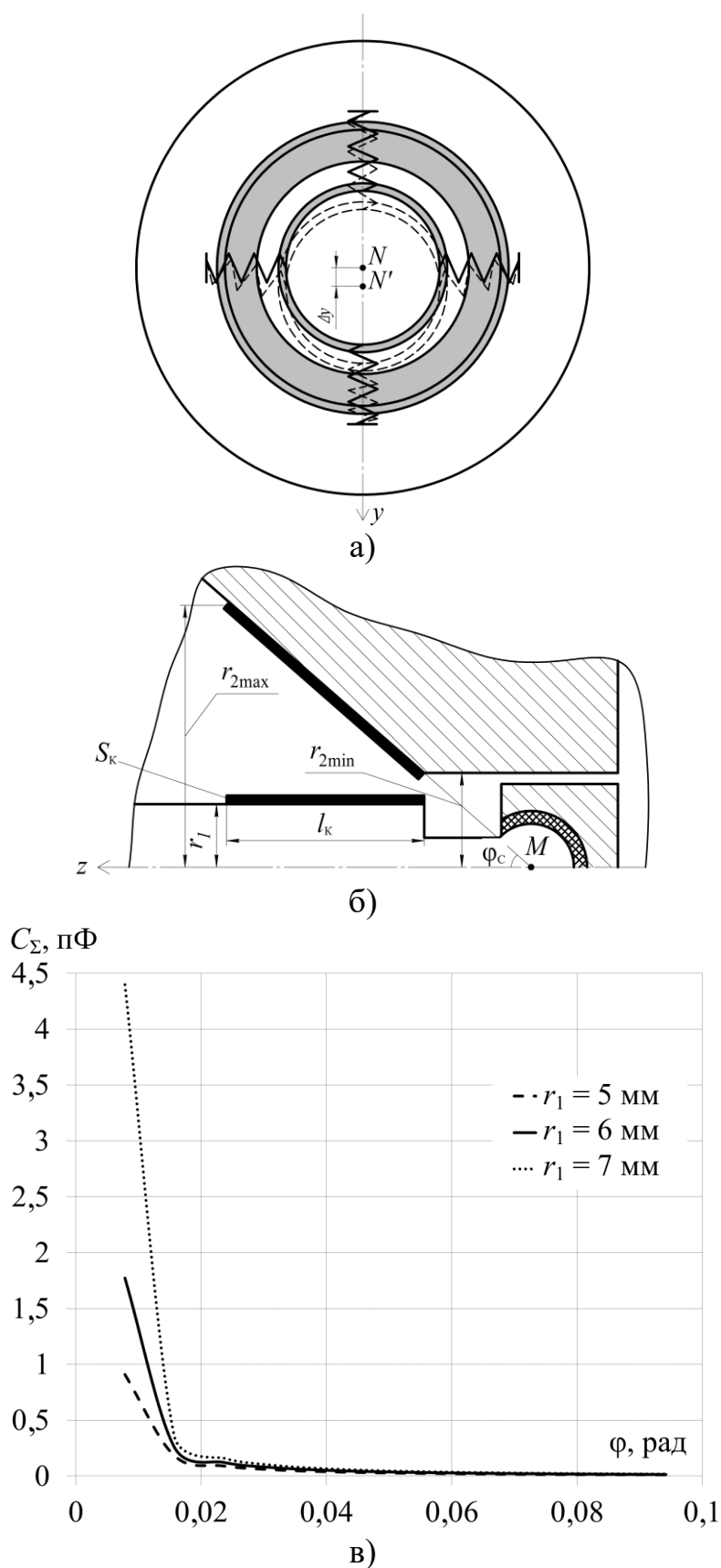


Рисунок 4.5 – Схема ДП при відхиленні стрижня на одиничний кут (а), при вихідному положенні (б) та результати роботи ДП (в): r_1 – радіус внутрішньої пластини конденсатора; Δy – зміни координат центру стрижня одиничного циліндричного конденсатора по осі y ; l_K – довжина пластини конденсатора

Задані параметри моделювання $l_K = 0,05$ м, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹. Як видно з рисунку 4.5, в, геометричні параметри φ_C і r_1 істотно впливають на величину ємності реєструвального елемента. Таким чином, існує значна різниця в значеннях ємності для малих кутів конічного пазу, а при більших кутах – величина ємності знижується до суттєво менших значень та майже не залежить від радіуса внутрішньої пластини. Згідно з алгоритмом реєстрації сигналів проковзування об'єкта (рисунок 4.3) в захваті адаптивного робота ця ситуація є несприятливою, оскільки потенційна кількість спробних рухів зменшується для одного захоплювання деталі і призводить до більшої кількості захоплювальних процедур. У той же час різка зміна ємності датчика при малих кутах вказує на його високу чутливість при малих відхиленнях чутливого елемента (стрижня), що сприяє реєстрації сигналу проковзування. Отже, при розробці нового датчика ємнісного типу доцільно вибирати його основні параметри на основі забезпечення найвищого значення ємності реєструвального елемента, що призводить до спрощення апаратної реалізації системи реєстрації проковзування [29, 215].

Модифікований резистивний ДП зі стрижневим чутливим елементом. Представлені рішення проблеми реєстрації проковзування на основі ємнісних ДП потребують складних інформаційних систем вимірювання та детектування зміни ємності як фізичної величини. Тому іншим новітнім рішенням проблеми реєстрації проковзування є використання ДП з резистивними реєструвальними елементами [2, 13].

У запропонованому датчику з багатокомпонентним реєструвальним елементом на основі електропровідної гуми використовується метод реєстрації змін конфігурації чутливих елементів [2, 13]. На рисунку 4.6, а представлена схема резистивного ДП, де прийняті наступні позначення: 1 – конічний паз; 2 – губка адаптивного захвату робота; 3 – стрижень; 4 – сферичний шарнір; 5 – наконечник; 6 – пружина; 7, 8, 9, 10 – пластини з електропровідної гуми; 11 – поверхня наконечника; 12 – блок корекції ЗС; 13 – багатовходовий вимірювальний блок; 14 – перший суматор; 15 – другий суматор, 16 –

пороговий елемент; 17 – елемент затримки. Кожен окремий компонент багатокompонентного реєструвального елемента виконаний у вигляді еластичних пластин з електропровідної гуми (7, 8, 9, 10 на рисунку 4.6, б).

Вхід блоку керування приводом захвату з'єднаний з виходом блоку корекції ЗС 12, який містить послідовно з'єднаний багатовходовий вимірювальний блок 13, перший суматор 14, другий суматор 15 і пороговий елемент 16. Багатовходовий вимірювальний блок виконаний у вигляді вимірювального моста зі змінними резисторами і живиться від джерела напруги. Пластини з електропровідної гуми з'єднані з вимірювальним блоком за симетричною мостовою схемою Уітсона для компенсації окремих компонентів і виключення похибки, викликаного постійною складовою вимірювання напруги [22, 216].

Таким чином, еластичні пластини, виконані з електропровідної гуми, безпосередньо являють собою резистори зі змінними електричними опорами (рисунк 4.6, в). Ці пластини змінюють свій електричний опір внаслідок деформації (стискання або розтягу пластин при русі стрижня з наконечником), крім того, вони врівноважують стрижень у початковому положенні в центрі кінцевого пазу, одночасно це положення відповідає стану рівноваги вимірювального моста. Після подачі напруги пластини, виконані з електропровідної гуми, у разі натягу або стискання між ключовими точками вимірювального моста формується різниця потенціалів, яка показує (вказує) факт проковзування об'єкта між губками захвату.

Вимірювальна напруга мосту U_m може бути представлена як різниця напруг $U_m = U_1 - U_2$, вона залежить від напруги живлення U_0 і резисторів R_1, R_2, R_3, R_4 (RV1-RV4 на рисунку 4.6, в), які відповідають електричним опорам окремих елементів багатокompонентного реєструвального елемента [13]:

$$U_m = \frac{R_1}{R_1 + R_4} U_0 - \frac{R_2}{R_2 + R_3} U_0.$$

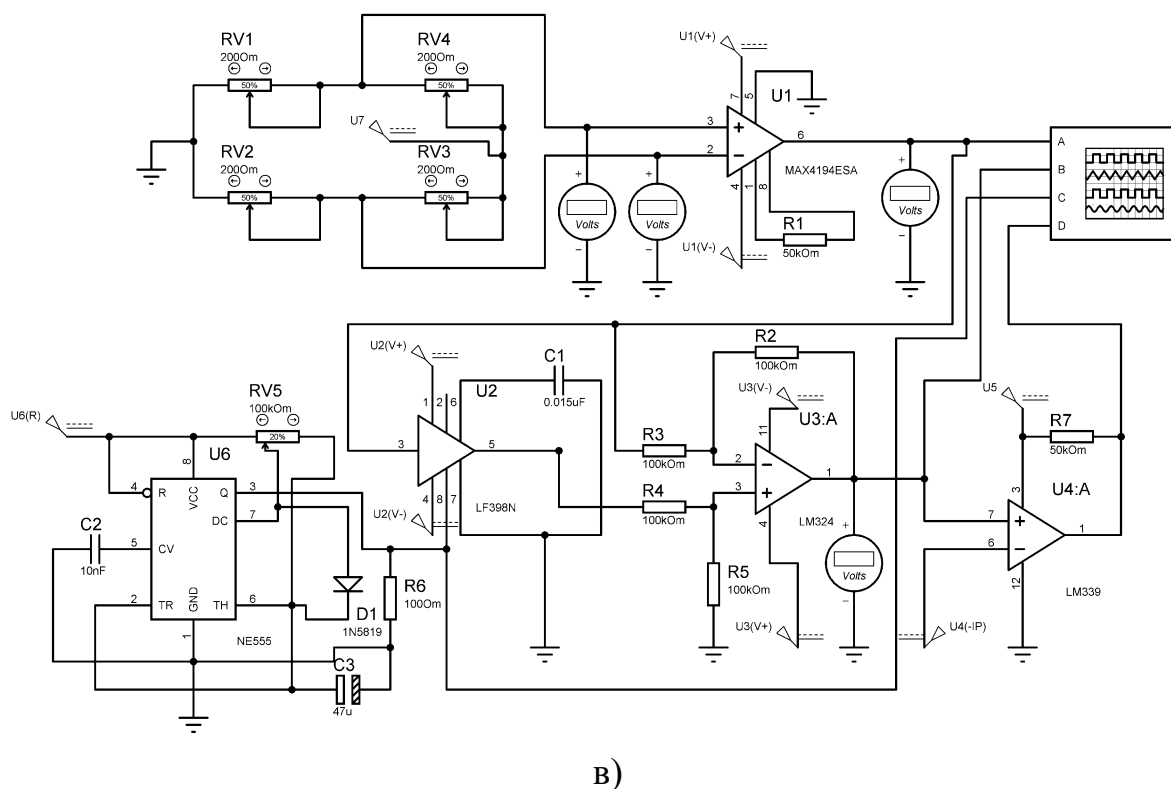
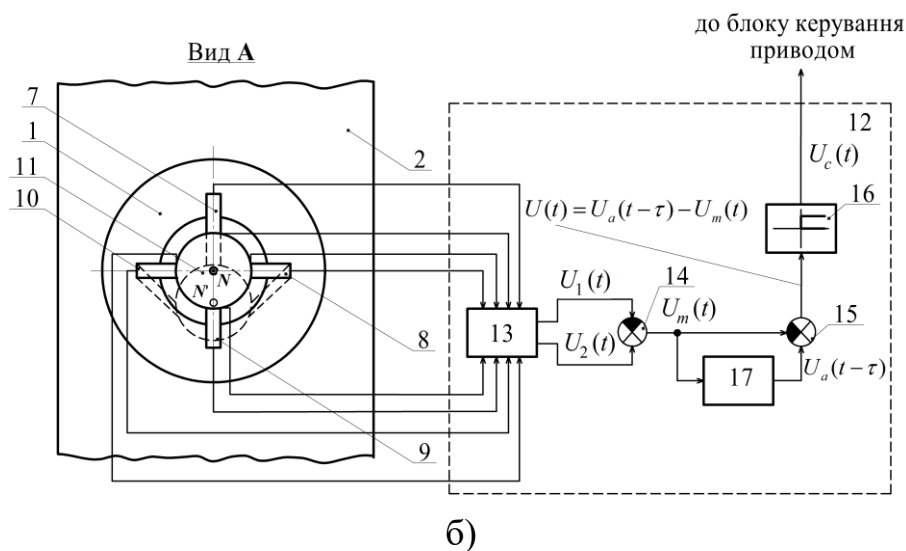
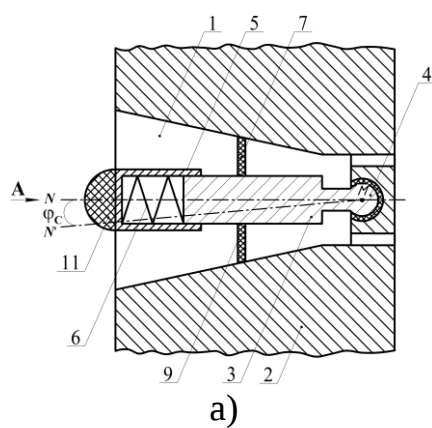


Рисунок 4.6 – Запропонований ДП з електропровідними пластинами:
а – механічна частина, б – схема системи очулення, в – імітаційна модель

Вимірювальна напруга обчислюється за допомогою першого суматора, який представляє собою інструментальний операційний підсилювач. Він розраховує різницю напруг $U_m = U_1 - U_2$. Для моделювання використовується інструментальний підсилювач MAXIM MAX4194. Вихідний сигнал першого суматора U_m подається одночасно на інвертуючий вхід другого суматора, який представляє собою операційний підсилювач LM324, і через елемент затримки – на неінвертуючий вхід другого суматора [2].

Елемент затримки аналогового сигналу реалізується за допомогою пристрою вибірки і зберігання (ПВЗ) LF398 з накопичувальним конденсатором. Генератор тактових сигналів для ПВЗ побудований на мікросхемі NE555. Розрахунок основних параметрів генератора тактових сигналів наведений в [2, 23].

Вихідна напруга ПВЗ $U_a(t - \tau)$ повторює значення вхідної напруги із затримкою в певний проміжок часу τ , що відповідає затримці між спробувальними рухами адаптивного захвату. При цьому формується другий вихідний сигнал суматора:

$$U(t) = U_a(t - \tau) - U_m(t),$$

що відповідає різниці між вихідними сигналами першого суматора перед $U_a(t - \tau)$ і після $U_m(t)$ спробного руху.

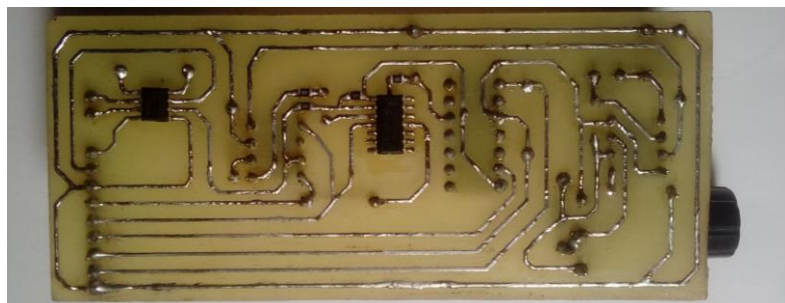
Вихідний сигнал другого суматора, коли відбувається проковзування, отримує тільки додатні значення $U(t) > 0$ і надсилає їх до порогового елемента (на основі LM339), ідеальна статична характеристика якого:

$$U_c(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } U(t) > 0 \\ 0, & \text{if } U(t) \leq 0 \end{cases}.$$

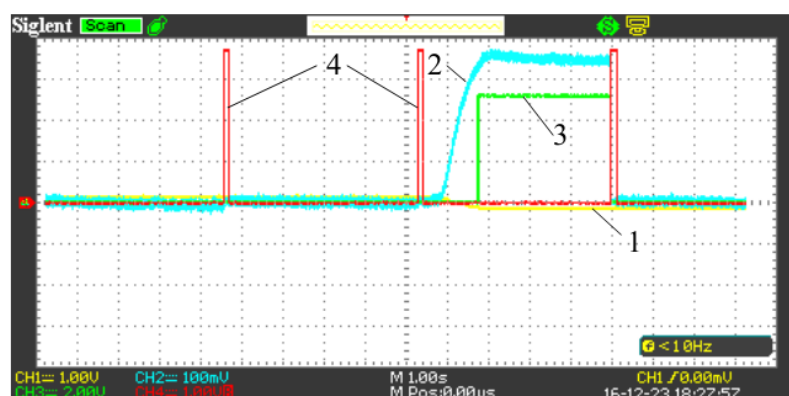
На основі імітаційної моделі (рисунок 4.6, в) розроблена апаратна реалізація сенсорної системи очулення робота у вигляді друкованої плати, яка разом з експериментальними результатами представлена на рисунку 4.7.



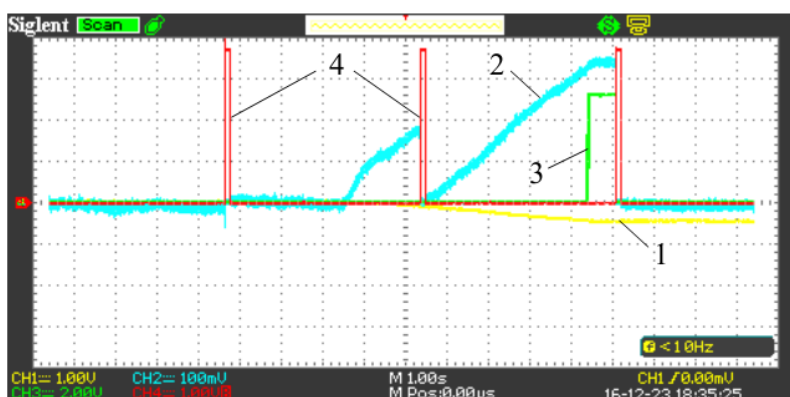
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.7 – Розроблена система очулення МРБП: вид зверху (а) і вид знизу (б) друкованої плати; експериментальні часові діаграми напруги з одним (в) і двома (г) періодами генератора тактових імпульсів:

$$U_m(t) - 1, U(t) - 2, U_C(t) - 3, U_T(t) - 4$$

Кожна електропровідна гумова пластина представлена змінним резистором (не показані на рисунку 4.7). Вимірювальний міст винесено за межі друкованої плати і з'єднано за допомогою кабелю з витой пари. Пороговим елементом виступає компаратор, що використовується для високошвидкісних цифрових мікросхем, та є стійким до перевантажень (друкована плата представлена на рисунку 4.7, а, б). Комп'ютерне моделювання та експеримент проводилися за низької частоти генератора тактових сигналів (0,22 Гц). Перехідні процеси в схемі відстежувалися за допомогою реальних цифрового (рисунок 4.7, в, г) і віртуального (рис. 4.8) осцилографів.

Коли рівновага вимірювального мосту порушується (стрижень відхиляється в напрямку ковзання об'єкта), в цьому випадку опір (R_1) провідної еластичної пластини 9 зменшується (пластина 9 стискається) і опір (R_4) пластини 7 збільшується (пластина 7 розтягується). Одночасно, пластини 8 і 10 розтягуються приблизно однаково, відповідно їх електричні опори (R_2 , R_3), приблизно однаково збільшуються в кінці спробного руху [13]. У цей час напруга на виході першого суматора $U_m(t)$ зменшується до певного значення (діаграма часу з лінією 1 на рисунку 4.7, в, г). Перший суматор на основі інструментального підсилювача показує хорошу завадостійкість і стабільність вимірюваної величини. Напруга на виході другого суматора, який обчислює різницю між прямим сигналом і сигналом від першого суматора з затримкою, $U(t)$ на рисунку 4.7, в позначена лінією 2.

Коли відбувається повторний заряд накопичувального конденсатора, ПВЗ перемикається на трасування, про що свідчить перемикання сигналу таймера U_T від логічного нуля до логічної одиниці (лінія 4 на рисунку 4.7, в, г), відповідно вихідна напруга другого суматора дорівнює нулю. Слід зазначити, що час зарядки набагато менше часу розрядки накопичувального конденсатора. Тому накопичувальний конденсатор встигає зберегти значення напруги без суттєвих втрат.

Вихідна напруга компаратора U_C (лінія 3 на рисунку 4.7, в, г) переходить в логічну одиницю лише тоді, коли напруга другого суматора зростає від нуля

до додатнього значення, що вказує на присутність проковзування [2]. Поріг компаратора є налаштовуваним та для експерименту встановлений 300 мВ (рисунок 4.6, в, г).

Другий суматор, побудований на операційному підсилювачі, показує наявність слабкого шуму (менше 25 мВ), який не впливає на реєстрацію сигналу ковзання. Результати тестів на рисунку 4.7, г також показують працездатність датчика проковзування між тактовими імпульсами таймера. У цьому випадку компаратор видає 5 В на наступному періоді. Отже, немає необхідності вирівнювати вимірювальні плечі моста перед кожним спробним рухом робота і захоплювати об'єкт з початкового положення. Формування логічної одиниці $U_C(t) = 1$ на виході порогового елемента вказує на наявність ковзання. Цей сигнал надходить на блок керування приводом губок, який генерує відповідний командний сигнал для збільшення СЗ на деяку задану величину.

Значний вплив на чутливість вимірювального моста чинять фізичні властивості електропровідної гуми. Як видно з результатів моделювання (рисунок 4.8), вихідна напруга першого суматора $U_m(t)$ різним чином змінюється в залежності від об'ємної провідності електропровідних гумових пластин [13]. Баланс вимірювального моста швидко втрачається за рахунок збільшення чутливості провідних пластин при однакових переміщеннях стрижня, що, в свою чергу, впливає на обробку сигналу проковзування. Так, при одній і тій же уставці за напругою компаратор має різний час затримки t_{d1} , t_{d2} , t_{d3} , причому $t_{d3} < t_{d2} < t_{d1}$ (на рисунку 4.8). Ця особливість дозволяє підвищити продуктивність запропонованого датчика за допомогою більш чутливого електропровідного каучуку [2, 217].

Час від часу захват робота може стикатися з перешкодами, коли робот переміщує об'єкт маніпулювання в динамічному середовищі відповідно до запланованих траєкторій. Перешкоди можуть з'являтися випадковим чином у динамічній робочій зоні робота [2, 207]. В результаті зіткнення між захватом робота і перешкодою може виникнути проковзування об'єкта, якщо стисне

зусилля недостатньо для надійної фіксації об'єкта між губками захвату. Напрямок $\{N, NE, E, SE, S, SW, W, NW\}$ такого переміщення при проковзуванні об'єкта залежить від положення перешкоди на бажаній траєкторії (див. рисунок 4.9).

Таблиця 4.1 визначає функціональну залежність між напрямком проковзування об'єкта (рисунок 4.9), поточним станом кожного опору $\{R_1, R_2, R_3, R_4\}$ і вимірюваної мостом напруги U_m , де «>» – позначення, відповідне зростанню опору R_i ($i = 1...4$) в процесі проковзування об'єкта; «<» – позначення, відповідне зменшенню опору R_i ($i = 1...4$) в процесі проковзування об'єкта; «=» – позначення, відповідне рівності пари опорів у поточному та минулому станах згідно з умовами $R_i = R_j$, ($i = 1...4$), ($j = 1...4$), $i \neq j$.

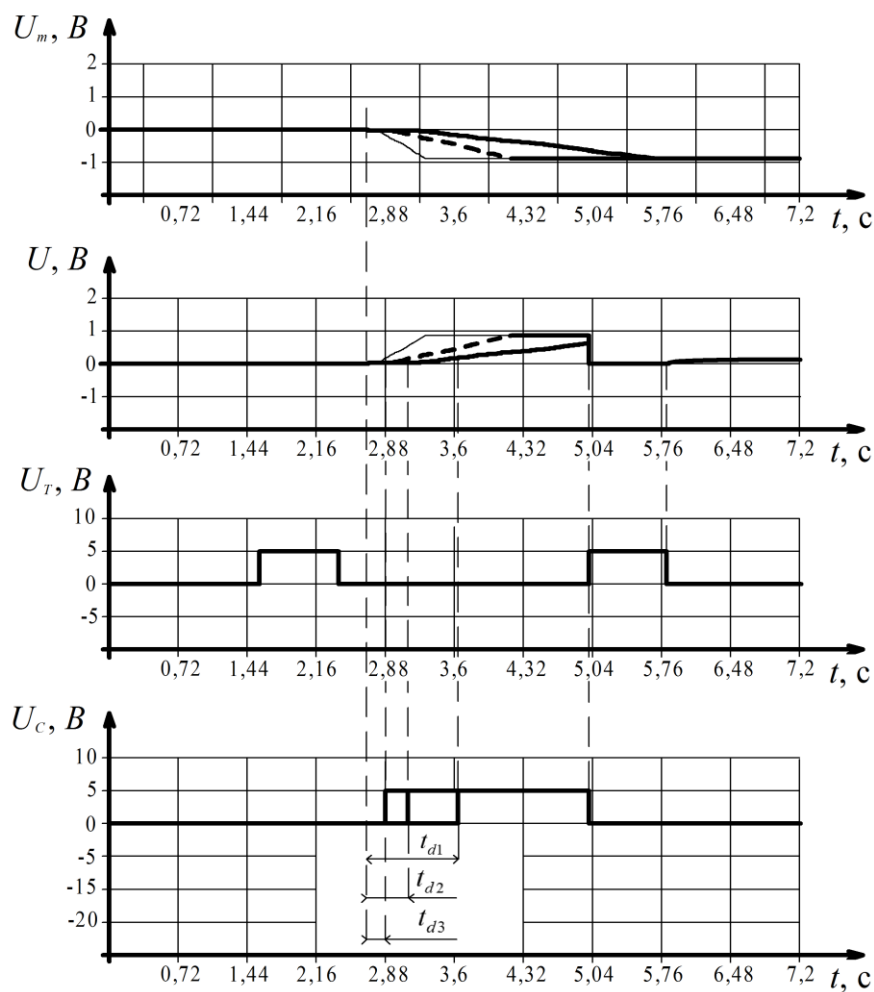


Рисунок 4.8 – Часові діаграми моделювання системи очулення з аналізом чутливості реєструвального елемента ДП

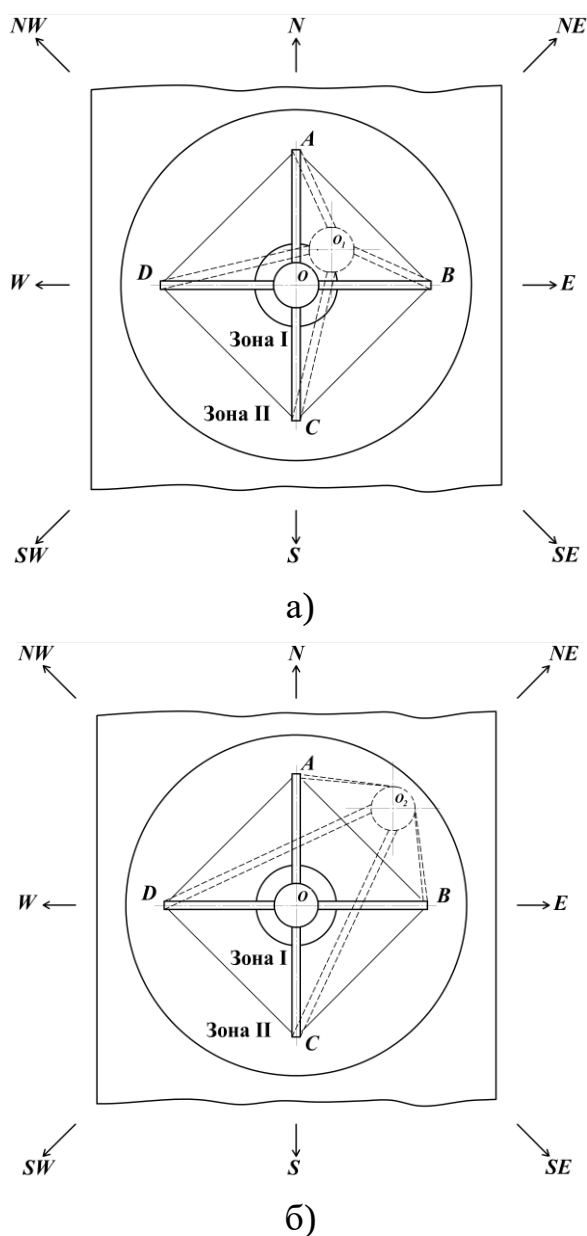


Рисунок 4.9 – Можливі розташування наконечника стрижня в кінцічному пазу:

а – в точці O_1 зони I, б – в точці O_2 зони II

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань сигналів U_m за однакового переміщення стрижня в різних напрямках

Напрямок проковзування	R_1	R_2	R_3	R_4	U_m, B
S (Південь)	<	=	=	>	-1,2
N (Північ)	>	=	=	<	1,2
W (Захід)	=	>	<	=	-1,2
E (Схід)	=	<	>	=	1,2
SE (Південний схід)	=	=	>	>	0
SW (Південний захід)	=	>	=	>	-1
NE (Північний схід)	>	=	>	=	1
NW (Північний захід)	>	>	=	=	0

Як видно з таблиці 4.1, одне і те ж значення вихідної напруги вимірювального моста U_m може відповідати декільком напрямкам проковзування з однаковим зміщенням в кожному напрямку, наприклад 1,2 В відповідає напрямкам N і E . Крім того, мостова схема Уїтсона має труднощі з реєстрацією проковзування в проміжних напрямках SE і NW , які ідентифікуються як 0 В.

Для визначення напрямку проковзування можна використовувати потенціометричну схему вимірювання [216]. Однак такий підхід вимагає додаткових компонентів для вимірювання напруги кожної провідної пластини. Тому, повертаючись до вимірювального мосту Уїтсона, доцільно розглянути не різницю між U_1 і U_2 , але кожен з цих напруг (U_1 і U_2) окремо.

Урахування особливостей ДП, пов'язаних з нерівномірною зміною опору провідних пластин при відхиленні стрижня по всій конічній канавці може бути здійснено шляхом використання двох баз продукційних правил «IF-THEN» [2]. Перша база (таблиця 4.2) описує визначення проковзування, коли наконечник стрижня розташований в межах чотирикутної зони $ABCD$ (зона I на рисунку 4.9, а). Друга база (таблиця 4.3) описує визначення проковзування, коли наконечник розташований між чотирикутною геометричною областю $ABCD$ і внутрішньою поверхнею пази (зона II на рисунку 4.9, б). Попередній стан U'_i ($i = 1...4$) для зони I на рисунку 4.9, а наведено для порівняння [2].

Обидві бази правил визначають функціональну залежність між наступним: напрямком проковзування об'єкта (рисунк 4.9), поточними станами опорів $\{R_1, R_2, R_3, R_4\}$ для кожного окремого компонента реєструвального елемента; відповідними вихідними сигналами вимірювального мосту $\{U_1, U_2\}$; попередніми вихідними сигналами вимірювального мосту $\{U'_1, U'_2\}$ (для таблиці 4.3), де: «>» – позначення, відповідне зростанню сигналів U_i та U'_i , ($i = 1...2$) в процесі проковзування об'єкта; «<» – позначення, відповідне зменшенню сигналів U_i та U'_i , ($i = 1...2$) в процесі проковзування об'єкта; «=» – позначення, відповідне рівності пари напруг опорів у поточному та минулому

станах згідно з умовами $U_i = U_j$, $U'_i = U'_j$, ($i = 1...2$), ($j = 1...2$), $i \neq j$ в антецедентах продукційних правил.

Інтелектуальна сенсорна система для ідентифікації напрямку проковзування, отримана на основі таблиць 4.2 і 4.3, показана на рисунку 4.10. Збільшення та зменшення напруги визначаються 4 пороговими елементами з двома порогами a і b ($a > 0$, $b < 0$) і блоком визначення напрямку проковзування на базі програмованої користувачем вентильної матриці (FPGA), що зберігає попередній стан логічних входів $X1$, $X2$, $X3$, $X4$ і забезпечує ідентифікацію напрямку проковзування (вихід Y означає напрямок проковзування) в обох зонах згідно рисунку 4.9 [2].

Тоді ідентифікації всіх напрямків проковзування зводиться в таблицю 4.4 для обох зон. Перехід від зони I до зони II при ідентифікації напрямку проковзування описується наступними логічними функціями:

$$\text{для NW: } Y = X2_{-1} \wedge X4_{-1} \wedge X1 \wedge X3,$$

$$\text{для SW: } Y = X2_{-1} \wedge X3_{-1} \wedge X1 \wedge X4,$$

$$\text{для NE: } Y = X1_{-1} \wedge X4_{-1} \wedge X2 \wedge X3,$$

$$\text{для SE: } Y = X1_{-1} \wedge X3_{-1} \wedge X2 \wedge X4,$$

де $X1$, $X2$, $X3$, $X4$ – поточні стани відповідних входів FPGA (при вході в зону II); $X1_{-1}$, $X2_{-1}$, $X3_{-1}$, $X4_{-1}$ – попередні стани відповідних входів ($X1...X4$) FPGA (при виході із зони I).

Тоді VHDL-модель [2, 23, 218] запропонованої сенсорної системи для ідентифікації напрямку проковзування (рисунок 4.11) розроблена на основі таблиці істинності (таблиця 4.4). VHDL-модель ДП у вигляді блок-схеми, що складається з логічних елементів, розроблена в комп'ютерному середовищі Active-HDL (фірма Aldec Inc., США) з використанням вбудованого редактора блок-схем BDE (Block Diagram Editor). Результати поведінкового моделювання показані у вигляді часових діаграм на рисунку 4.12, які відображають і дозволяють проаналізувати залежність виходів від входів для різних режимів роботи [23]. Рисунок 4.13 ілюструє переваги ідентифікації проковзування в ДП.

Таблиця 4.2 – База продукційних правил «IF-THEN» для ідентифікації напрямку проковзування в зоні I

№ правила	Антецедент		Консеквент
	U_1	U_2	Напрямок проковзування
1	$<$	$=$	S (стрижень рухається вниз)
2	$>$	$=$	N (стрижень рухається вгору)
3	$=$	$>$	W (стрижень рухається ліворуч)
4	$=$	$<$	E (стрижень рухається праворуч)
5	$>$	$<$	NE (стрижень рухається вгору праворуч)
6	$>$	$>$	NW (стрижень рухається вгору ліворуч)
7	$<$	$>$	SW (стрижень рухається вниз ліворуч)
8	$<$	$<$	SE (стрижень рухається вниз праворуч)

Таблиця 4.3 – База продукційних правил «IF-THEN» для ідентифікації напрямку проковзування в зоні II

№ правила	Антецедент				Консеквент
	U'_1	U_1	U'_2	U_2	Напрямок проковзування
1	$>$	$<$	$<$	$>$	NE
2	$>$	$<$	$>$	$<$	NW
3	$<$	$>$	$>$	$<$	SW
4	$<$	$>$	$<$	$>$	SE

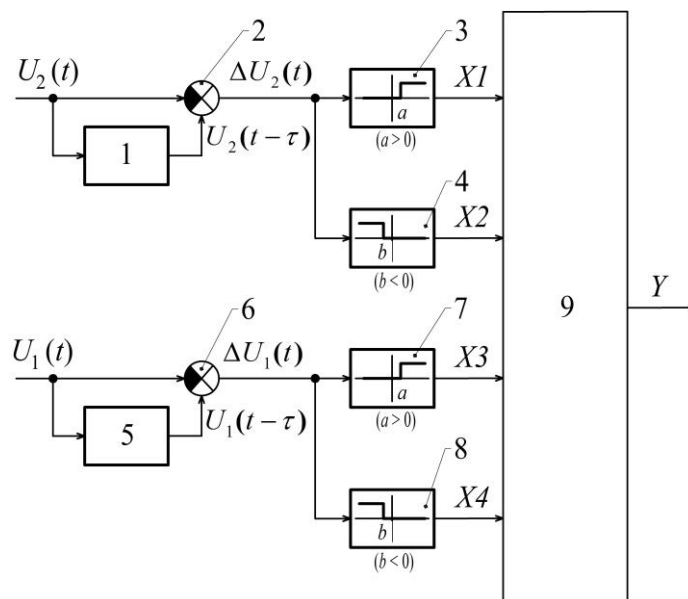


Рисунок 4.10 – Запропонована сенсорна система для ідентифікації напрямку проковзування: 1, 5 – елементи затримки; 2, 6 – суматори; 3, 4, 7, 8 – порогові елементи; 9 – блок визначення проковзування на основі FPGA

Таблиця 4.4 – Таблиця істинності для ідентифікації напрямку проковзування в зоні I і зоні II

Входи для зони I				Входи для зони II				Вихід
<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>X3</i>	<i>X4</i>	<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>X3</i>	<i>X4</i>	(напрямок проковзування)
0	0	0	0	-	-	-	-	<i>I</i> (початковий стан)
0	0	0	1	-	-	-	-	<i>N</i>
0	0	1	0	-	-	-	-	<i>S</i>
0	1	0	0	-	-	-	-	<i>W</i>
1	0	0	0	-	-	-	-	<i>E</i>
0	1	0	1	1	0	1	0	<i>NW</i>
0	1	1	0	1	0	0	1	<i>SW</i>
1	0	0	1	0	1	1	0	<i>NE</i>
1	0	1	0	0	1	0	1	<i>SE</i>

Розглянемо детальніше результати комп'ютерного моделювання запропонованої системи, представлені на часових діаграмах (рисунок 4.12) при переміщенні стрижня у всіх можливих напрямках для зони I і зони II. Початкове положення стрижня відповідає рівню логічної одиниці на вхід/вихід «I». Потім проковзування відбувається в напрямку *N*, позначеному як "0001" комбінації входів *X1...X4* (рядок "N_area_1" на рисунку 4.12) згідно з таблицею 4.4. Отже, кожне нове переміщення стрижня в новому напрямку починається з переходу логічної одиниці до логічного нуля на вході/виході "I" (через початковий стан). Така ж ситуація спостерігається для інших напрямків проковзування в зоні I (рисунок 4.9).

Істотною перевагою запропонованої системи ідентифікації напрямку проковзування є відсутність додаткової затримки для збереження попередніх станів входів. Це завдання вирішується логічними елементами за допомогою тригерної схеми (рисунок 4.11). Блок визначення проковзування на основі FPGA формує вихідний сигнал протягом одного синхронізуючого імпульсу, що особливо важливо при переході від зони I до зони II (наприклад, від "NW_area_1" до "NW_area_2" на рисунку 4.12).

Необхідно зазначити, що для врахування властивостей ДП, пов'язаних з нерівномірною зміною опору провідних пластин при відхиленні стрижня, у всій конічній канавці повинні бути застосовані певні налаштування.

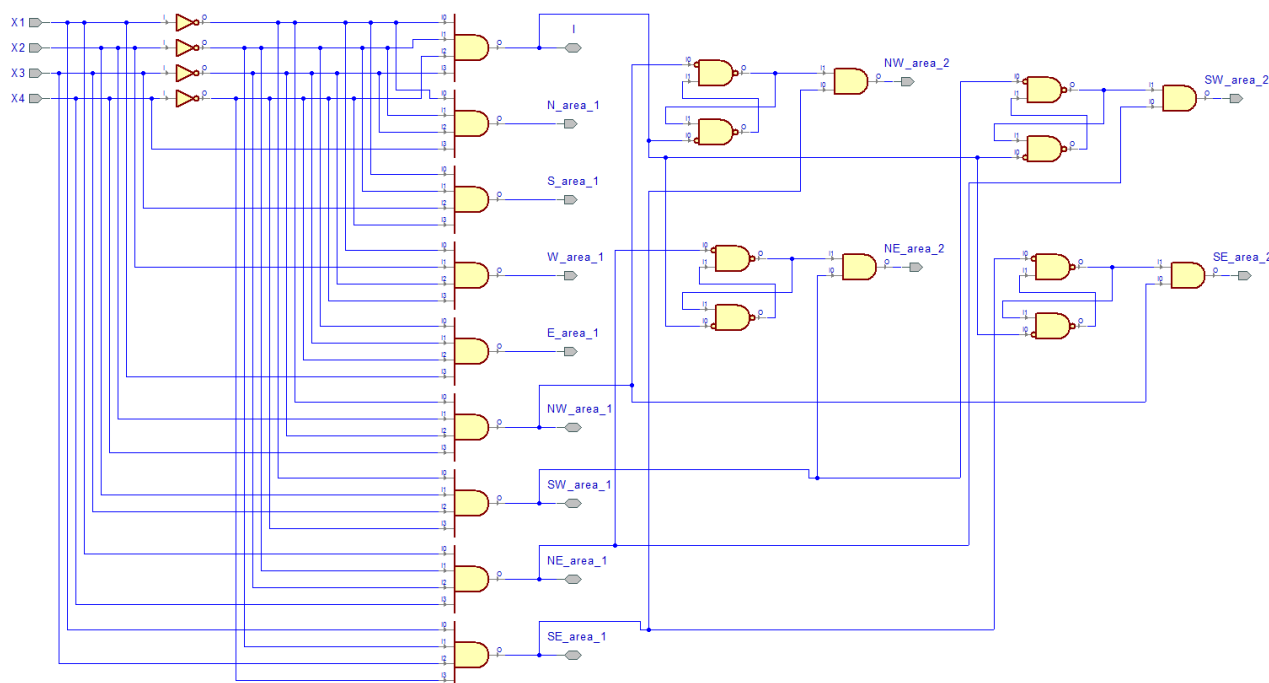


Рисунок 4.11 – VHDL-модель сенсорної системи у вигляді блок-схеми

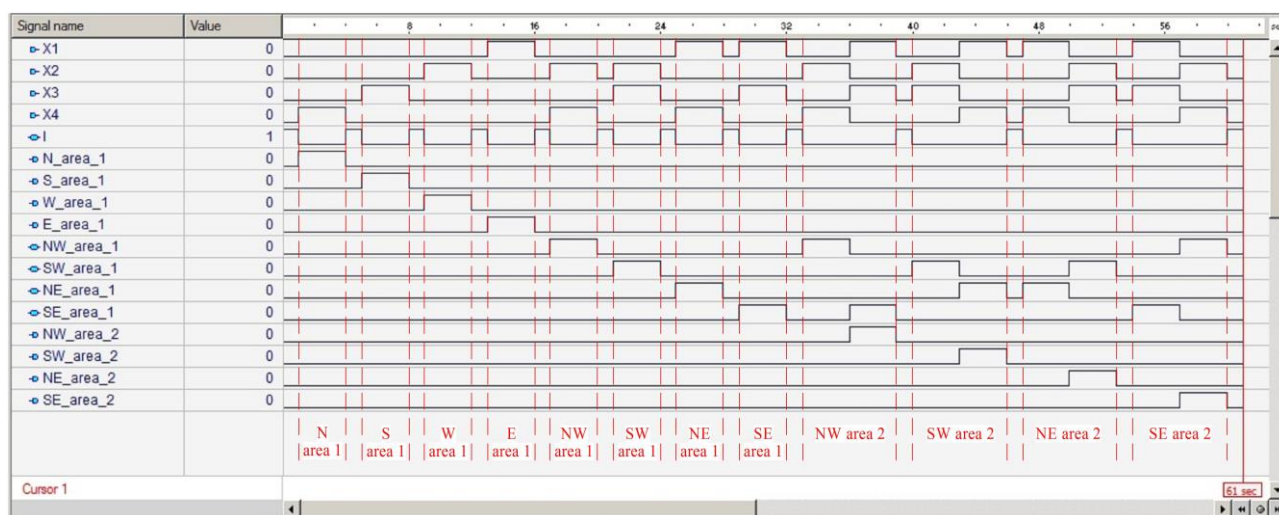


Рисунок 4.12 – Часові діаграми для інтелектуальної системи ідентифікації напрямку проковзування

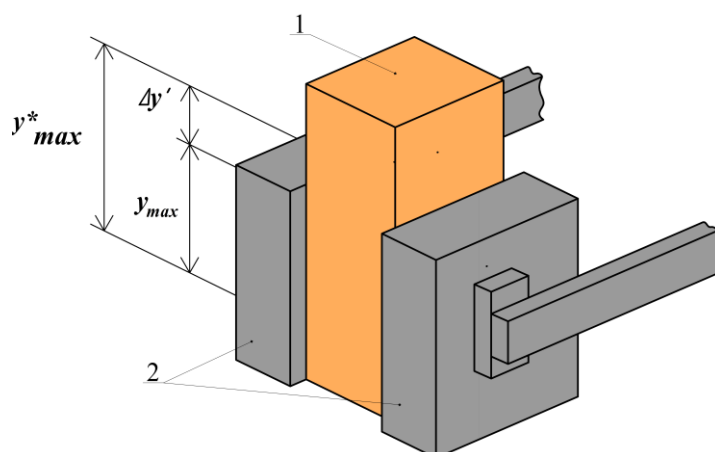


Рисунок 4.13 – Початкові положення об'єкта (1) і захвату (2) перед підйомом

Так, згідно рисунку 4.9, відхилення стрижня в кінчному пазу, в межах чотирикутної геометричної області $ABCD$ (зона I) від початкового просторового положення (точка O) до точки O_1 пластини 7 і 8 стискаються, а пластини 9 і 10 розтягуються (як на рисунку 4.9, б). При подальшому зміщенні стрижня в просторове положенні O_2 всі пластини розтягуються. Таким чином, процедура визначення проковзування повинна порівнювати поточні виміряні стани U_i , ($i = 1...2$) з попередніми станами U'_i (для зони I на рисунку 4.9), коли наконечник розташований між чотирикутною областю $ABCD$ і внутрішньою поверхнею кінчного пазу (зона II на рисунку 4.9).

З рисунку 4.13 видно, що функціональність ДП розширюється за рахунок збільшення відстані максимального руху $y_{\max}$ до нового значення $y^*_{\max}$, за рахунок загального збільшення меж робочої зони датчика $\Delta y'$ завдяки можливості роботи в зоні II (на рисунку 4.9): $y^*_{\max} = y_{\max} + \Delta y'$.

4.4. Висновки за розділом 4

За результатами проведених в розділі 4 досліджень можна зробити наступні висновки:

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 та керування ПЗ, швидкістю та курсом, як основними параметрами МРБП та подібних робототехнічних комплексів.

В якості експериментальної моделі вищенаведеної КСКК для керування МРБП розроблено систему дистанційного керування експериментальним гусеничним мобільним роботом, яка дозволяє керувати просторовим рухом робота з будь-якої точки світу при наявності доступу до мережі Інтернет. Керуючими пристроями даної системи є плата NodeMCU та мобільний пристрій оператора (смартфон, планшет), які мають прийнятну вартість та використовуються для вирішення дослідницьких задач в IoT-системах. Для організації людино-машинного інтерфейсу в розробленій системі застосовано

додаток Blynk, що дозволило організувати динамічний інтерактивний інтерфейс для задання напрямку просторового руху із наперед заданою швидкістю. Застосування такої системи робить можливим віддалений доступ до процесів керування стороннім експертам при недостатній кваліфікації чергового оператора.

Для забезпечення функцій багатоцільового мобільного робота розроблено інформаційні системи очулення на основі датчиків проковзування для адаптивного захвату робота. Зокрема, розроблено 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. Ефективність розробленої системи очулення для резистивного ДП підтверджується експериментальним тестуванням її апаратної реалізації в реальному часі. Крім того, розроблена система очулення дешева і проста у виготовленні.

Розвинуто метод контролю проковзування об'єкта маніпулювання в адаптивному захваті МРБП та самого МРБП на похилій ФП на основі ДП з резистивними реєструвальними елементами, який дозволяє визначати напрям проковзування. Завдання ідентифікації напрямку проковзування вирішується за допомогою FPGA і мови апаратного опису обладнання VHDL. 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 захвата та ПЗ МРБП до апріорно невідомої маси об'єкта маніпулювання. Розроблена інформаційна система очулення з ідентифікацією напрямку проковзування є універсальною, зокрема для контролю проковзування робота на похилій ФП, що підвищує безпеку його експлуатації.

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 захвата 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герасін О. С. Аналіз особливостей мобільних роботів багатоцільового призначення. *Науково-методичний журнал, Серія “Комп’ютерні технології”*. Миколаїв : ЧДУ ім. П. Могили, 2014. Т. 50, № 238. С. 25–32.
2. Kondratenko Y., Gerasin O., Topalov A. A simulation model for robot’s slip displacement sensors. *International Journal of Computing*. 2016. V. 15, № 4. P. 224–236.
3. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Герасін О. С. Нейро-нечіткі спостерігачі для ідентифікації притискного зусилля магнітокерованих рушіїв мобільних роботів. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 53–61.
4. Kozlov O. V., Gerasin O. S., Kondratenko G. V. Complex of tasks of monitoring and automatic control of mobile robots for vertical movement. *International Journal “SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE”*. 2017. № 2(8). P. 77–87.
5. Герасін О., Козлов О., Кондратенко Г., Таранов М., Рудольф Й., Кондратенко Ю. Функціональні особливості спеціалізованої комп’ютерної системи керування колісним мобільним роботом багатоцільового призначення. *Технічні вісті*. 2017. № 1 (45), № 2 (46). С. 54–58.
6. Kozlov O. V., Kondratenko G. V., Gerasin O. S., Mingxin H. Modeling of an automatic control system for a multipurpose mobile robot’s spatial motion. *Електротехнічні та комп’ютерні системи*. 2018. № 28 (104). С. 248–256.
7. Gerasin O. S., Kozlov O. V., Kondratenko G. V., Mingxin H. Synthesis and study of the mathematical model of a caterpillar mobile robot for vertical movement. *Проблеми інформаційних технологій*. 2018. № 1 (23). С. 87–97.
8. Kozlov O. V., Gerasin O. S., Kondratenko Y. P., Kushnir V. O. Automation of the monitoring and control processes of a mobile robot for processing

of large inclined surfaces. *International Journal "SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE"*. 2018. № 1 (9). P. 59–66.

9. Kondratenko Y., Zaporozhets Y., Rudolph J., Gerasin O., Topalov A., Kozlov O. Modeling of clamping magnets interaction with ferromagnetic surface for wheel mobile robots. *International Journal of Computing*. 2018. № 17 (1). P. 33–46.

10. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 93671 Україна: МПК В25J 19/02. № u2014 04989; заявл. 12.05.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19. 7 с.

11. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 93997 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 04715; заявл. 05.05.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 20. 7 с.

12. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 95803 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 07322; заявл. 01.07.2014; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1. 8 с.

13. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 97831 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 10537; заявл. 26.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. 9 с.

14. Мобільний робот для механічного очищення корпусу судна: пат. 100341 Україна: МПК В25J 19/00. № u 2015 00063; заявл. 05.01.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 8 с.

15. Мобільний робот для очищення підводних поверхонь суден: пат. 104222 Україна: МПК В25J 19/00, В25J 21/00. № а 2015 06778; заявл. 08.07.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2. 8 с.

16. Мобільний робот для переміщення по довільно орієнтованим у робочому просторі поверхням: пат. 104113 Україна: МПК В25J 9/00, В25J 15/00. № u 2015 06969; заявл. 13.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. № 1. 8 с.

17. Колесо-рушій мобільного робота: пат. 125523 Україна: МПК В63В 59/00, В60В 19/00, В60F 3/00. № u 2017 12633; заявл. 19.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9. 13 с.

18. Спосіб магнітокерованого переміщення мобільного робота: пат. 126444 Україна: МПК В25J 9/10. № у 2017 12632; заявл. 19.12.2017; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 8 с.
19. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V., Topalov A. M., Korobko O. V., Gerasin O. S. Automation of Control Processes in Specialized Pyrolysis Complexes Based on Industrial Internet of Things / Vyacheslav Kharchenko, Ah Lian Kor, Andrzej Rucinski (Eds.). *Dependable IoT for Human and Industry. Modeling, Architecting, Implementation. Series in Information Science and Technology*. Delft, Gistrup : River Publishers, 2018. P. 367-387.
20. Коробко О. В., Кочанов В. Ю., Герасін О. С., Топалов А. М. Експериментальні випробування вогнестійкого покриття інтумісцентного типу з використанням комп'ютеризованого вимірювального комплексу. *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти*. 2014. Т. 5, Вип. 1. С. 40–47.
21. Кондратенко Ю. П., Коробко О. В., Козлов О. В., Топалов А. М., Герасін О. С. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для контролю рівня і об'єму рідини в резервуарах зі складною геометрією. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2015. № 18 (94). С. 114–121.
22. Kondratenko Y., Topalov A., Gerasin O. Analysis and Modeling of the Slip Signals' Registration Processes Based on Sensors with Multicomponent Sensing Elements. *Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці* : матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції CADSM 2015. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. С. 109–112.
23. Kondratenko Y. P., Gerasin O. S., Topalov A. M. Modern Sensing Systems of Intelligent Robots Based on Multi-Component Slip Displacement Sensors. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*: Proceedings of the 2015 IEEE 8th Int. Conf. (Warsaw, Poland, September 24–26, 2015). Warsaw, 2015. V. 2. P. 902–907.
24. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V., Gerasin O. S., Zaporozhets Y. M. Synthesis and Research of Neuro-Fuzzy Observer of Clamping Force for Mobile

Robot Automatic Control System. *Data Stream Mining & Processing (DSMP)* : Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference (Lviv, Ukraine, August 23–27, 2016). Lviv, 2016. P. 90–95.

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

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

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

28. Gerasin O., Zaporozhets Y., Kondratenko Y. Models of Magnetic Driver Interaction with Ferromagnetic Surface and Geometric Data Computing for Clamping Force Localization Patches. *Data Stream Mining & Processing (DSMP)*: Proc. of the *IEEE Second Int. Conf.* (Lviv, Ukraine, August 21–25, 2018). Lviv, 2018. P. 44–49.

29. Gerasin O., Kondratenko Y., Topalov A. Dependable Robot's Slip Displacement Sensors Based on Capacitive Registration Elements. *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2018)*: Proceedings of the 9th IEEE Int. Conf. (Kyiv, Ukraine, 24–27 May, 2018). Kyiv, 2018. P. 378–383.

30. Kushnir, V. O., Gerasin O. S. Mobile robot for technological cleaning of ferromagnetic surfaces. *Автоматика 2015* : матеріали XXII міжнар. конф. з автоматичного управління (м. Одеса, 10–11 вересня 2015 р.) 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., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П. Розробка підсистеми автоматичного керування притискним зусиллям для мобільного робота. *Автоматика 2016* : матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління (м. Суми, 22-23 вересня 2016 р.). Суми : Сумський державний університет, 2016. С. 112–113.

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

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

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

35. Герасін О. С., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П. Особливості побудови математичних моделей мобільних роботів на базі притискних гусеничних рушіїв. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., Національна металургійна академія України (м. Дніпропетровськ, 29-31 березня 2016 р.). Дніпропетровськ : НМетАУ, 2016. С. 97.

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

37. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Запорожець Ю. М., Герасін О. С. Мобільний робот для технологічного очищення складних просторових феромагнітних поверхонь. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали VII міжнар. наук.-техн. конф., м. 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. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : XI міжнародна науково-технічна конференція. 2016. URL : <https://goo.gl/ERWA6L>.
39. Герасін О. С. Комплекс задач контролю та автоматичного управління мобільним роботом багатоцільового призначення. *«Могилянські читання – 2014: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти»* : матеріали всеукр. наук.-метод. конф., м. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 29–31.
40. Герасін О. С., Козлов О. В., Запорожець Ю. М. Система автоматичного керування очисним мобільним роботом гусеничного типу на базі постійних магнітів. *«Могилянські читання – 2015: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти»* : матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. Т. 1. С. 35–37.
41. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Запорожець Ю. М., Козлов О. В., Кондратенко Г. В., Герасін О. С., Таранов М. О. Метод синтезу притискного зусилля мобільного робота з магнітокерованими колесами-рушіями. *Могилянські читання – 2016: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти* : матеріали всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. Т. 5. С. 34–35.
42. Герасин А. С., Килиманов Б. А. «Умный» почтовый ящик, как компонент «Умного дома». *Сучасні проблеми автоматики та електротехніки* : матеріали всеукр. наук.-техн. конф. (м. Миколаїв, 4–5 квітня 2019 р.). Миколаїв : НУК, 2019. С. 7.

43. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления / Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб : Профессия, 2003. 752 с.
44. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. Москва : Издательский центр «Академия», 2007. 576 с.
45. Выжигин А. Ю. Гибкие производственные системы : учеб. пособие. Москва : Машиностроение, 2009. 288 с.
46. Хватов Б. Н. Гибкие производственные системы. Расчет и проектирование: учеб. пособ., Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. 112 с.
47. Хартли, Дж. ГПС в действии / Пер. с англ. Москва : Машиностроение, 1987. 328 с.
48. Классификация, разработка и применение технологических процессов, Р 50-54-93-88, Москва, 1988, 35 с.
49. Проектирование роботизированных технологических процессов, Р 50-54-85-88, Москва, 1988, 39 с.
50. Кoryтин А. М., Петров Н. К., Радимов С. Н., Шапарев Н. К. Автоматизация типовых технологических процессов и установок. Москва : Энергоатомиздат, 1988. 432 с.
51. Стефании Е. П. Основы построения АСУ ТП : Учеб. пособ. Москва : Энергоиздат, 1982. 352 с.
52. Довбня И. М., Кондратьев А. Н., Юревич Е. И. Роботизированные технологические комплексы в ГПС. – Ленинград : Машиностроение. Ленингр. издание, 1990. 303 с.
53. Козырев Ю. Г. Промышленные роботы : Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1988. 392 с.
54. Юревич Е. И. Основы робототехники : Учебное пособие. 2-е издание. БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
55. МРК-27 – мобильный робототехнический комплекс для силовых структур. URL: <https://topwar.ru/97030-mrk-27-mobilnyy-robototekhnicheskiiy-kompleks-dlya-silovyh-struktur.html>

56. Коваль С. Г. Программно-аппаратный комплекс „робот-разведчик”. URL: <http://masters.donntu.edu.ua/2010/fknt/koval/library/robot.pdf>.
57. Коваль С. Г., Иванов А. Ю. Программно-аппаратный комплекс, предназначенный для поиска локального источника радиации. *«Информатика и компьютерные технологии 2006»* : Сборник трудов второй международной студенческой науч.-техн. конф., (13.12.2006, Донецк). Донецк, 2006. С. 322–323.
58. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами : Учеб. для вузов. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 400 с.
59. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника / Пер. с англ. Москва : Мир, 1989. 624 с.
60. Промышленная робототехника / Л. С. Ямпольский и др. ; Под ред. Л. С. Ямпольского. Київ : Техніка, 1984. 264 с.
61. Ульянов С.В. Мобильные интеллектуальные системы с роботами вертикального перемещения. *Электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании»*. 2011. Вып. № 2. С. 1-20.
62. Шахинпур М. Курс робототехники / Пер. с англ. Москва : Мир, 1990. 527 с.
63. Mobile Robotics: Solutions and Challenges. Proceedings of the Twelfth International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines / Edited by O. Tosun, H. L. Akin, M. O.Tokhi, G. S. Virk. Istanbul, Turkey, 9-11 September, 2009.
64. Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций : Краткое описание. URL: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=456&lvl=02.01.02.02>.
65. Corke P. Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB[®]. Springer Tracts in Advanced Robotics / Edit by Bruno Siciliano, Oussama Khatib, Frans Groen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. Volume 73.
66. Siciliano B., Khatib O. Springer handbook of robotics. Springer, 2016.

67. Kondratenko Y. P. Robotics, automation and information systems: future perspectives and correlation with culture, sport and life science, in decision making and knowledge decision support system / A.M. Gil-Lafuente, C. Zopounidis (Eds.) : Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Switzerland : Springer International Publishing, 2015. Vol. 675. P. 43–56.
68. Niku S. B., Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications. New Jersey : Publisher Prentice Hall, 2001.
69. Robotics and automation handbook / ed. T. R. Kurfess. CRC press, 2004.
70. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Распределенные системы планирования действий коллективом роботов. Москва : Янус-К., 2002.
71. Ахапкин С. В., Городецкий В. И., Васильев С. В., Станкевич Л. А. Футбол роботов – многоагентная среда для исследования группового поведения интеллектуальных роботов. Научно-техн. конф. "Экстремальная робототехника". СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1999.
72. Промислові роботи і робототехнічні системи. URL: <http://www.virtual.ks.ua/essays-term-papers-and-diplomas/3598-industrial-robots-and-robotic-systems.html>
73. Braunl T. Embedded Robotics. Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems. Third Edition. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008, 2006, 2003.
74. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калиниченко С. В., Кравчук Л. Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. Москва : Наука, 2001. 369 с.
75. Ross B., Bares J., Fromme C. A Semi-Autonomous Robot for Stripping Paint from Large Vessels. *The International Journal of Robotics Research*. July-August, 2008. P. 617-626.
76. Gardit A.S. Environmental paint removal with hydro blasting / Maritime surface protection. URL: <http://goo.gl/EhY99g>.

77. Градецкий В., Рачков М. Роботы вертикального перемещения. Москва : Тип. Мин. Образования РФ, 1997. 223 с.
78. Souto D., Faica A., Lypez-Peca F., Duro R.J. Lappa: a New Type of Robot for Underwater Non-magnetic and Complex Hull Cleaning. *Robotics and Automation : Proceedings of IEEE International Conference (Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013)*. Germany, 2013. P. 3394-3399.
79. VertiGo – робот, якого не зупинять стіни і інші перешкоди. URL: <https://goo.gl/4cQV1s>.
80. Робот, який може підніматися по будь-якій вертикальній поверхні, використовуючи розплавлений пластик. URL: <https://goo.gl/3iIRPs>.
81. Abigaille – робот-гекон, прототип майбутніх космічних роботів-ремонтників. URL: <https://goo.gl/KtEYf2>.
82. Пристрій для механічного очищення корпусу судна: пат. 63172 Україна: МПК В63В 59/00. № у 2011 04125; заявл. 05.04.2011; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. 3 с.
83. Колесо-рушій мобільного робота : пат. 45369 Україна: МПК В63В 59/00, В60В 19/00, В60F 3/00. № у 2009 04782; заявл. 18.05.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. 5 с.
84. Christensen L., Fischer N., Kroffke S., Lemburg J., Ahlers R. Cost-Effective Autonomous Robots for Ballast Water Tank Inspection. *Journal of Ship Production and Design*. 2011. 27 (3). P. 127-136.
85. Souto, D., Faiña, A., Deibe, A., Lopez-Peña, F., Duro, R. J. A Robot for the Unsupervised Grit-Blasting of Ship Hulls. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012. Vol. 9. P. 1-16.
86. Робот-верхолаз HR-MP значно спростить процедуру діагностики конструкцій турбін вітрогенераторів. URL: <https://goo.gl/iXlvty>.
87. Fugro Subsea Services Limited. Case Study. Hull Cleaning and Inspection Robot. 2014. URL: <http://goo.gl/XEVRw0>.
88. Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П., Жучинський Л. А. Розрахункова модель притискних зусиль мобільних роботів, що пересуваються

по феромагнітних поверхнях. *Автоматика 2013* : матеріали XX Міжнар. конф. з автоматичного управління, 25-27 вересня 2013 р. Миколаїв, 2013. С. 167-168.

89. Longo D., Muscato G. A Small Low-Cost Low-Weight Inspection Robot with Passive-Type Locomotion. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2004. Vol. 11. P. 339-348.

90. Robot strips marine growth at sea. JOTUN. Solving the maintenance puzzle. Corrosion Protection Systems for Offshore Structures, Subsea Structures, FPSOs. Number 224. URL: <http://goo.gl/U6lXlB>.

91. Faina A., Orjales F., Souto D., Bellas F., Duro R. A Modular Architecture for Developing Robots for Industrial Applications. *Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation* / Y. Kondratenko, R. Duro, Eds. River Publishers Series in Automation, Control and Robotics, 2015.

92. Василенко Н. В., Никитин К. Д., Пономарёв В. П., Смолин А. Ю. Основы робототехники / Под общей редакцией К.Д. Никитина. Томск : МГП «РАСКО», 1993. 475 с.

93. Накано Э. Введение в робототехнику /Пер. с япон. Мир, 1988. 334 с.

94. Сташинський О.П. Система інтелектуального управління робототехнічним пристроєм для діагностики трубопроводів компресорних станцій. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012, №10 (97). С. 192-195.

95. Шаруда, В. Г. Практикум з теорії автоматичного управління : Навч. посібник. Д.: НГУ, 2002. 414 с.

96. Кутовська О.В. Методологія системного підходу та наукових досліджень : Курс лекцій. Тернопіль : Економічна думка, 2005. 124 с.

97. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : Учебное пособие. СПб. : КОРОНА принт, 2001. 320 с.

98. Спосіб магнітокерованого переміщення мобільного робота : пат. 47369 Україна: МПК В25J 9/10. № и 2009 09043; заявл. 31.08.2009; опубл. 25.01.2010, Бюл. № 2. 4 с.

99. Кондратенко Ю. П., Козлов О. В. Аналіз комплексу задач та координат керування технологічним процесом екопірогенезісу. *Технічні вісті*. Вип.1(33), 2(34). 2011. С. 13-16.
100. Смолянский М. Л. Таблицы неопределенных интегралов. М. : Физматгиз, 1963. 112 с.
101. Марков Э. Т. Судовые электрические аппараты : Учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. Л. : Вид-во «Судостроение», 1981. 344 с.
102. Электрические аппараты в ТВН. URL: <https://bit.ly/2lqMPJN>.
103. Ганзбург Л. Б., Федотов А. И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. 364 с.
104. Коэффициенты трения скольжения. URL: <http://minkor.ru/upload/spravochnik/170310-2.pdf>
105. Каталог электромагнитов. URL: <http://www.electromagnit.ru/catalog/electromagnit>
106. Sew-eurodrive. Практика приводной техники. Проектирование приводов. URL: www.sew-eurodrive.ru/files/pdf/11322853.pdf
107. High performance actuator catalogue. URL: <https://is.gd/I60JCT>
108. Шарико-винтовая передача. Общий каталог. URL: http://www.thk.ru/cataloguespdf/510-1RU_15_BallScrew.pdf
109. Терехов В. М., Осипов И. О. Системы управления электроприводов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. В.М. Терехова. 2-е изд., стер. М. : Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.
110. Башарин А. В., Новиков В.А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами : Учебное пособие для вузов. Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 392 с.
111. Онищенко Г. Б., Аксенов М. И., Грехов В. П., Зарицкий М. Н., Куприков А. В., Нитиевская А. И. Автоматизированный электропривод промышленных установок : Учебное пособие. М. : РАСХН, 2001. 520 с.

112. Колосков С. С. Разработка мобильного робота и визуализация его движения. *Молодежный научно-технический вестник*. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/602336.html>

113. Campion G., Bastin G., Dandrea-Novel B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996. Vol. 12, no. 1. P. 47-62.

114. Кабанов А. А. Моделирование и управление движением гусеничного мобильного робота. *Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах*. Санкт-Петербург, 9 – 11 октября 2012. Санкт-Петербург, 2012. С. 740–743.

115. Вікович І. А. Теорія руху транспортних засобів : підруч. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 672 с.

116. Taranov M., Wolf C., Rudolph J., Kondratenko Y. P. Simulation of robot's wheel-mover on ferromagnetic surfaces. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* : Proceedings of the 2017 IEEE 9th, 2017 International Conference. Vol. 1. P. 283-288.

117. Піцан Р. М. Збірник задач до курсу «Електропривід». *Розімкнені системи електропривода*. Львів : Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1999. 425 с.

118. Сергеев Л.В. Теория танка. Москва, 1973. 495 с.

119. Котиков В. М., Ерхов А. В. Тракторы и автомобили : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. М. : Издательский центр «Академия», 2008. 416 с.

120. Беспятый Ф. С., Троицкий И. Ф. Конструкция, основы теории и расчет трактора. Изд. второе. М. : «Машиностроение», 1972. 502 с.

121. Tosun O., Akin H. L., Tokhi M. O., Virk G. S. (ed.). Mobile robotics: solutions and challenges. *Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines* : Proceedings of the Twelfth International Conference. Istanbul, 2009.

122. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. New York : Publisher Wiley, 2006.

123. Черноусько Ф. Л. Принципы движения и проблемы динамики мобильных роботов. *Мехатроника и робототехника* : сб. материалов международной выставки-конгресса. Ленэкспо, 2007, С. 89-90.

124. Churavy C., Baker M., Mehta S., Pradhan I., Scheidegger N., Shanfelt S., Rarick R., Simon D. Effective implementation of a mapping swarm of robots. *IEEE Potentials*, 2008. Vol. 27, no. 4. P. 28-33.

125. Balaguer C. Robotics and Automation in Construction Croatia. *In-Teh*, 2008 P. 295-306.

126. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338-353.

127. Zimmermann H. J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. Boston/Dordrecht/London : Kluwer Academic Publishers, 1992.

128. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. 300 с.

129. Герасимов Б. М., Грабовский Г. Г., Рюмшин М. А. Нечеткие множества в задачах проектирования, управления и обработки информации. К. : Техніка, 2002. 140 с.

130. Ямпольський Л. С., Ткач Б. П., Лісовиченко О. І. Системи штучного інтелекту в плануванні, моделюванні та управлінні. К. : ДП Видавничий дім «Персонал», 2011. 544 с.

131. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М. : БИНОМ Лаборатория Знаний, 2009. 798 с.

132. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / пер. с польск. Рудинского И. Д. М. : Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с.

133. Захаров В. Н., Ульянов С. В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. Научно-организационные,

технико-экономические и прикладные аспекты. *Техническая кибернетика*. 1992. № 5, С. 171-196.

134. Hampel R., Wagenknecht M., Chaker N. (Eds.). *Fuzzy Control: Theory and Practice*. Heidelberg, New York : Physika-Verlag, 2000.

135. Jamshidi M., Vadiiee N., Ross T. J. (Eds.). *Fuzzy Logic and Control: Software and Hardware Application. Series on Environmental and Intelligent Manufacturing Systems*. Vol. 2. Prentice Hall, 1993.

136. Jamshidi M., Kreinovitch V., Kacprzyk J. (Eds.). *Advance Trends in Soft Computing. Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Germany : Springer-Verlag, 2013. Vol. 312.

137. Kondratenko Y .P., Kozlov O. V., Klymenko L. P., Kondratenko G. V. Synthesis and Research of Neuro-Fuzzy Model of Ecopyrogenesis Multi-Circuit Circulatory System. *Advance Trends in Soft Computing* / M.Jamshidi, V.Kreinovich, J.Kazprzyk (Eds.). Series: Studies in Fuzziness and Soft Computing. 2014. Vol. 312. P. 1-14.

138. Kondratenko Y., Gordienko E. Neural Networks for Adaptive Control System of Caterpillar Turn. *"Intelligent Manufacturing and Automation"* : Annals of DAAAM for 2011 & Proceeding of the 22th Int. DAAAM Symp., (20-23 Oct., 2011, Vienna, Austria). Austria, Vienna : DAAAM International, 2011. P. 305-306.

139. Kondratenko Y., Gordienko E. Implementation of the Neural Networks for Adaptive Control System on FPGA. *"Intelligent Manufacturing and Automation"* : Annals of DAAAM for 2012 & Proc. of the 23th Int. DAAAM Symp. / B. Katalinic (Ed.). Austria, Vienna : DAAAM International, 2012. Vol. 23, No.1. P. 389-392.

140. Tamir D. E., Rishé N. D., Kandel A. (Eds.) *Fifty Years of Fuzzy Logic and Its Applications. Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Cham-Heidelberg-New York-Dordrecht-London, Springer International Publishing Switzerland, 2015. Vol. 326.

141. Gacto M. J., Alcalá R., Herrera F. Adaptation and Application of Multi-Objective Evolutionary Algorithms for Rule Reduction and Parameter Tuning of Fuzzy Rule-Based Systems. *Soft Computing*. 2009. Vol. 13, No. 5. P. 419-436.

142. Ko C.-N., Lee T.-L., Fan H.-T., Wu C.-J. Genetic Auto-Tuning and Rule Reduction of Fuzzy PID Controllers. *Systems, Man and Cybernetics* : IEEE International Conference. 2006. Vol. 2. P. 1096-1101.
143. Oh S. K., Pedrycz W. The Design of Hybrid Fuzzy Controllers Based on Genetic Algorithms and Estimation Techniques. *Kybernetes*. 2002. Vol. 31, Issue 6. P. 909–917.
144. Pedrycz W., Li K., Reformat M. Evolutionary Reduction of Fuzzy Rule-Based Models. *Fifty Years of Fuzzy Logic and its Applications*. Springer International Publishing, 2015. P. 459-481.
145. Simon, D. Evolutionary Optimization Algorithms: Biologically Inspired and Population-Based Approaches to Computer Intelligence. *John Wiley & Sons*. 2013.
146. Hao X., Xie K., Xu X. Fuzzy Hierarchy Control Strategy of the Double Inverted Pendulum Based on Granular Computing. *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery* : Proceedings of Fourth Int. Conf., 2007. Vol. 2. P. 570-574.
147. Kondratenko Y. P. Robotics, Automation and Information Systems: Future Perspectives and Correlation with Culture, Sport and Life Science. *Decision Making and Knowledge Decision Support Systems. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* 675 / A. M. Gil-Lafuente, C. Zopounidis (Eds). Springer International Publishing Switzerland, 2015. P. 43–56.
148. Hayajneh M. T., Radaideh S. M., Smadi I. A. Fuzzy Logic Controller for Overhead Cranes. *Engineering Computations*. 2006. Vol. 23, Issue 1. P. 84–98.
149. Kondratenko G. V., Kondratenko Y. P., Romanov D. O. Fuzzy Models for Capacitive Vehicle Routing Problem in Uncertainty. *"Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Mechatronics & Robotics"* : Proc. of 17th International DAAAM Symposium. Vienna, Austria, 2006. P. 205-206.
150. Kondratenko Y. P., Sidenko Ie. V. Decision-Making Based on Fuzzy Estimation of Quality Level for Cargo Delivery. *Recent Developments and New Directions in Soft Computing. Series: Studies in Fuzziness and Soft Computing* 317 / Zadeh, L.A. et al. (Eds.). Springer Int. Publishing Switzerland, 2014. P. 331-344.

151. Werners B., Kondratenko Y.P. Tanker Routing Problem with Fuzzy Demands of Served Ships. *Int. J. System Research & Information Technologies*. 2009. Vol. 1. P. 47-64.
152. Jakubczyk M., Kaminski B. Fuzzy Approach to Decision Analysis with Multiple Criteria and Uncertainty in Health Technology Assessment. *Ann Oper Res*. New York : Springer Science + Business Media, 2015.
153. Shahbazova S. N. Application of Fuzzy Sets for Control of Student Knowledge. *An International Journal Applied and Computational Mathematics*. 2011. Vol. 10, No. 1. P. 195-208.
154. Gil-Aluja J. Investment in Uncertainty. Dordrecht, Boston, London : Kluwer Academic Publishers, 1999.
155. Imanov G., Barquero-Cabrero J. D. Economy & Society 29. *ESERP*. Madrid, Barcelona, Palma de Mallorca, 2015.
156. Suna Q., Li R., Zhang P. Stable and Optimal Adaptive Fuzzy Control of Complex Systems Using Fuzzy Dynamic Model. *Fuzzy Sets and Systems*. 2003. Vol. 133. P. 1–17.
157. Vachkov G., Kiyota Y., Komatsu K. Identification of Dynamic Cause-Effect Relations for Systems Performance Evaluation. *Applications and Science in Soft Computing*. Vol. 24. P. 187–194.
158. Wang L., Kazmierski T. J. VHDL-AMS Based Genetic Optimization of Fuzzy Logic Controllers. *International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2007. Vol. 26, No. 2. P. 447–460.
159. Yager R. R., Filev D. P. Unified Structure and Parameter Identification of Fuzzy Models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993. Vol. 23, Issue 4. P. 1198–1205.
160. Хлопенко М. Я., Шерейко Д. Ю., Кошкін Д. Л. Методичне керівництво до курсового проектування з дисципліни "Теорія автоматичного керування". Миколаїв : НУК, 2007. 88 с.
161. Collon C., Rudolph J. Invariant feedback control for the kinematic car on the sphere. *Systems & Control Letters*. 2012. Vol. 61, no. 10. P. 967-972.

162. Franke M., Rudolph J., Woittennek F. Motion planning and feedback control of a planar robotic unicycle model. *Methods and Models in Automation and Robotics*. 2009. Vol. 14, no. 1. P. 501-506.
163. Maykiv I., Stepanenko A., Wobschall D., Kochan R., Kochan V., Sachenko A. Software–hardware method of serial interface controller implementation. *Elsevier Computer Standards & Interfaces*. 2012. Vol. 34. P. 509-516.
164. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. *Physica*. 2013. Vol. 69.
165. Rotshtein A. P., Rakytyanska H. B., Fuzzy evidence in identification, forecasting and diagnosis. Heidelberg : Springer, 2012. Vol. 275.
166. Субботін С. О., Олійник А. О., Олійник О. О. Ітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей : Монографія / Під заг. ред. С.О. Субботіна. Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. 375 с.
167. Drozd J., Drozd A., Maevsky D., Shapa L. The Levels of Target Resources Development in Computer Systems. *East-West Design & Test : Proc. of IEEE Symposium*. Kiev, Ukraine, 26–29 September, Kiev, 2014. P. 185–189.
168. Kacprzyk J., Multistage Fuzzy Control: A Prescriptive Approach. *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 1997.
169. Trunov A. Recurrent approximation as the tool for expansion of functions and models of operation of neural networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, 4 (83). P. 41-48.
170. Britain S. L., Gibb A. J., Roberts C. Automatic reconfiguration of a robotic arm using a multi-agent approach. *Journal of Systems and Control Engineering*, February 2008. Vol. 222(2). P. 127-135.
171. Yaoyao W., Tianlin L., Yian D. Learning to Chase a Ball Efficiently and Smoothly for a Wheeled Robot. *Mechatronics and Machine Vision in Practice : Proceedings of 24th International Conference*. Auckland, New Zealand, Nov. 21-23, 2017. Auckland, 2017. P. 36-41.

172. Запорожец Ю. М., Кондратенко Ю. П. Задачи и особенности управления магнитными движителями колесного мобильного робота. *Электронное моделирование* : междун. науч.-техн. журнал. 2013. Т. 35, № 5. С. 109-122.
173. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. May 1993. Vol. 23, No.3. P. 665–685.
174. Королюк В. С., Портенко Н. И., Скороход А. В., Турбин А. Ф. Справочник по теории вероятности и математической статистике. М. : Наука, 1985. 640 с.
175. Федотов А. В. Моделирование нейронных сетей в MATLAB : Методические указания к лабораторным работам. Омск, 2010. 14 с.
176. Tkachenko A. N., Brovinskaya N. M., Kondratenko Y. P., Evolutionary adaptation of control processes in robots operating in non-stationary environments. *Mechanism and Machine Theory*. Great Britain, 1983. Vol. 18, no. 4., P. 275-278.
177. Огорелков Б. И., Татевосян А. С., Пимонова У. В., Поляков Д. А. Экспериментальное исследование и математическое моделирование динамики электромагнита постоянного тока. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2015. Т. 11, №1. С. 5–15.
178. Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита. *Вестник Иркутского Государственного Технического Университета*. 2015. №. 2 (97). С. 214-217.
179. Gerdt V. P., Prokopenya A. N., Simulation of quantum error correction with Mathematica. *Computer Algebra in Scientific Computing* / V.P. Gerdt, W. Koepf, E.W. Mayr, E.V. Vorozhtsov (Eds.) : Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Springer-Verlag, 2013. Vol. 8136. P. 116-129.
180. Черкасова О. А. Исследование магнитного поля постоянного магнита с помощью компьютерного моделирования. URL: <https://goo.gl/biytjI>.

181. Трунов О. М. Критерій адекватності як оцінка ефективності процесу побудови моделі. Східно-Європейський журнал передових технологій. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Вип. 1, № 4 (73), С. 36-41.

182. Черно А. А., Гуров А. П., Грань А. Н., Топалов А. Н. Расчет трехмерного магнитного поля электромагнитного вибратора с шихтованным магнитопроводом. *Електричні машини і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. Кременчук: КрНУ, 2013. Вип. 2/2013 (22). Частина 2. С. 25–28.

183. Измайлов С. В. Курс электродинамики : учебник для физико-математических факультетов педагогических институтов. Москва : Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1962. 439 с.

184. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / пер. с англ. Москва : Энергия, 1970. 376 с.

185. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики : учебное пособие. 5-е изд. Москва : Изд-во МГУ, 1977.

186. Запорожец Ю. М., Кроль В. И., Шарейко Д. Ю. Математическая модель обнаружения и идентификации подводных ферромагнитных объектов. *Електрооборудование судов* : Сб. науч. тр. Николаев : НКИ, 1992. С. 84–89.

187. Kondratenko Y. P., Korobko O. V., Kozlov O. V. PLC-based systems for data acquisition and supervisory control of environment-friendly energy-saving technologies. *Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures, Studies in Systems, Decision and Control* / V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, 2016. Vol. 74. P. 247–267.

188. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М. : Горячая линия – Телеком, 2009. 608 с.

189. Графкин А. В. Принципы программного управления модулями ICP DAS серии I-7000 в задачах промышленной автоматизации. СНЦ РАН, 2010. 133 с.
190. Dulău I. L., Abrudean M., Bică D. SCADA simulation of a distributed generation system with storage technologies. *Procedia Technology*. 2015. Vol. 19. P. 665–672.
191. Реализация комплексной системы управления промышленным роботом-манипулятором, 2018. URL: <http://www.svaltera.ua/solutions/typical/mashinostroenie/8762.php>.
192. Kondratenko Y., Kozlov O., Korobko O., Topalov A. Complex Industrial Systems Automation Based on the Internet of Things Implementation. *Communications in Computer and Information Science* / Bassiliades N. et al. (eds). Springer, Cham, 2018. Vol. 826. P. 164-187. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-76168-8_8
193. Ефимов И. П., Солуянов Д. А. SCADA – система TraceMode. Ульяновск : УЛГТУ, 2010. 158 с.
194. Jeschke S., Brecher C., Song H. Rawat D., Industrial Internet of Things. Switzerland : Springer International Publishing, 2017.
195. Vermesan O., P. Friess, Digitising the Industry – Internet of Things Connecting the Physical. *Digital and Virtual Worlds*. River Publishers, 2016.
196. Bottone M., Palumbo F., Primiero G., Raimondi F., Stocker R. Implementing virtual pheromones in BDI robots using MQTT and Jason, *5th IEEE International Conference on Cloud Networking*. Pisa, Italy, 2016. P. 196–199.
197. Kor A., Pattinson C., Yanovsky M. Kharchenko V. IoT-Enabled Smart Living. *Technology for Smart Futures* / M. Dastbaz, H. Arabnia and B. Akhgar, Ed. Cham : Springer, 2018.
198. Markopoulos P., Nichols J., Paternò F. Pipek V. Editorial: End-user development for the internet of things. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. 2017. Vol. 24, no. 2. P. 1-3.

199. Russo D. Domotics and Robotics. *Dolentium hominum*. 2014. Vol. 84. P. 137–144.
200. The Apache Hadoop project develops open-source software for reliable, scalable, distributed computing. URL: <https://hadoop.apache.org>.
201. ESP8266 NodeMCU WiFi Devkit : user manual v1.2. *Handson Technology*. URL: https://www.handsontec.com/pdf_learn/esp8266-V10.pdf.
202. ESP-12E Motor Shield : user manual. Shedzhen Doctors of Intelligence and Technology. URL: <https://cdn.hackaday.io/files/8856378895104/user-mannual-for-esp-12e-motor-shield.pdf>.
203. The open-source Arduino Software (IDE). URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.
204. Омельченко Е. Я., Танич В. О., Маклаков А. С., Карякина Е. А. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino. *Электротехнические системы и комплексы*. 2013. № 21. С. 28–33.
205. Blynk IoT platform. URL: <https://blynk.io/>.
206. Osadchy S., Zozulya V., Timoshenko A. The dynamic characteristics of the manipulator with parallel kinematic structure based on experimental data. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)* : Proc. of the 2013 IEEE 7th Int. Conf. (Sept. 12-14, 2013. Berlin), Germany, 2013. vol. 2. P. 905–911.
207. Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П., Шишкін О. С. Математична модель датчика проковзування з реєстрацією поперечних складових магнітного поля чутливого елемента. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 4. С. 67–72.
208. Kondratenko Y.P., Kondratenko V.Y. Advanced Trends in Design of Slip Displacement Sensors for Intelligent Robots. *Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation* : River Publishers Series in Automation / Y. Kondratenko, R. Duro, Eds. Control and Robotics, 2015. P. 167–192.
209. Схват оцувствленного манипулятора: а. с. SU 1252168: МПК В25J 19/02. № 3810558/25-08; заявл. 05.11.84; опубл. 23.08.86, Бюл. № 31. 3 с.

210. Кондратенко Ю. П., Назарова І. Л. Математична модель ємнісного датчика з кінечною конфігурацією чутливого елемента. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. Донецьк : ДНТУ, 2011. Вип. 11(186). С. 186–191.

211. Tiwana M. I., Shashank A., Redmond S. J., Lovell N. H. Characterization of a capacitive tactile shear sensor for application in robotic and upper limb prostheses. *Sensors and Actuators*. 2011. A-165. P. 164–172.

212. Guo S., Shiraoka T., Inada S., Mukai T. A two-ply polymer-based flexible tactile sensor sheet using electric capacitance. *Sensors*. 2014. Vol. 14. P. 2225–2238.

213. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. Москва : Энергия, 1974.

214. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Электричество. Т. 3. М.: Наука, 1977. 704 с.

215. Yurish S. Y., Malayeri A. D., Eds., *Sensors & Signals*. S.L. : Int. Frequency Sensor Association (IFSA) Publishing, 2014.

216. Дорожовець М. М., Івахів О. В., Мокрицький В. О. Уніфікуючі перетворювачі інформаційного забезпечення мехатронних систем : Навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2009. 304 с.

217. Бараночников Б. Г., Блинов А. Журавлев В. С., Кельми В. А. Влияние деформации растяжения на свойства электропроводящих резин. *Каучук и Резина*. 1979. Вып. 10, С. 34–36.

218. Кондратенко Ю. П., Сидоренко С. А., Підпригора Д. М. Поведінковий синтез цифрових пристроїв в середовищі Active-HDL : навчальний посібник. Під ред. Ю.П. Кондратенка. Миколаїв, МФ НаУКМА, 2001. 136 с.

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Герасін О. С. Аналіз особливостей мобільних роботів багатоцільового призначення. *Науково-методичний журнал, Серія “Комп’ютерні технології”*. Миколаїв : ЧДУ ім. П. Могили, 2014. Т. 50, № 238. С. 25–32.
2. Kondratenko Y., Gerasin O., Topalov A. A simulation model for robot’s slip displacement sensors. *International Journal of Computing*. 2016. V. 15, № 4. P. 224–236.
3. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Герасін О. С. Нейро-нечіткі спостерігачі для ідентифікації притискного зусилля магнітокерованих рушіїв мобільних роботів. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 53–61.
4. Kozlov O. V., Gerasin O. S., Kondratenko G. V. Complex of tasks of monitoring and automatic control of mobile robots for vertical movement. *International Journal “SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE”*. 2017. № 2(8). P. 77–87.
5. Герасін О., Козлов О., Кондратенко Г., Таранов М., Рудольф Й., Кондратенко Ю. Функціональні особливості спеціалізованої комп’ютерної системи керування колісним мобільним роботом багатоцільового призначення. *Технічні вісті*. 2017. № 1 (45), № 2 (46). С. 54–58.
6. Kozlov O. V., Kondratenko G. V., Gerasin O. S., Mingxin H. Modeling of an automatic control system for a multipurpose mobile robot’s spatial motion. *Електротехнічні та комп’ютерні системи*. 2018. № 28 (104). С. 248–256.
7. Gerasin O. S., Kozlov O. V., Kondratenko G. V., Mingxin H. Synthesis and study of the mathematical model of a caterpillar mobile robot for vertical movement. *Проблеми інформаційних технологій*. 2018. № 1 (23). С. 87–97.

8. Kozlov O. V., Gerasin O. S., Kondratenko Y. P., Kushnir V. O. Automation of the monitoring and control processes of a mobile robot for processing of large inclined surfaces. *International Journal "SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE"*. 2018. № 1 (9). P. 59–66.
9. Kondratenko Y., Zaporozhets Y., Rudolph J., Gerasin O., Topalov A., Kozlov O. Modeling of clamping magnets interaction with ferromagnetic surface for wheel mobile robots. *International Journal of Computing*. 2018. № 17 (1). P. 33–46.
10. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 93671 Україна: МПК В25J 19/02. № u2014 04989; заявл. 12.05.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19. 7 с.
11. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 93997 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 04715; заявл. 05.05.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 20. 7 с.
12. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 95803 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 07322; заявл. 01.07.2014; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1. 8 с.
13. Пристрій для реєстрації сигналу проковзування: пат. 97831 Україна: МПК В25J 19/02. № u 2014 10537; заявл. 26.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. 9 с.
14. Мобільний робот для механічного очищення корпусу судна: пат. 100341 Україна: МПК В25J 19/00. № u 2015 00063; заявл. 05.01.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 8 с.
15. Мобільний робот для очищення підводних поверхонь суден: пат. 104222 Україна: МПК В25J 19/00, В25J 21/00. № а 2015 06778; заявл. 08.07.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2. 8 с.
16. Мобільний робот для переміщення по довільно орієнтованим у робочому просторі поверхням: пат. 104113 Україна: МПК В25J 9/00, В25J 15/00. № u 2015 06969; заявл. 13.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. № 1. 8 с.

17. Колесо-рушій мобільного робота: пат. 125523 Україна: МПК В63В 59/00, В60В 19/00, В60F 3/00. № у 2017 12633; заявл. 19.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9. 13 с.

18. Спосіб магнітокерованого переміщення мобільного робота: пат. 126444 Україна: МПК В25J 9/10. № у 2017 12632; заявл. 19.12.2017; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 8 с.

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

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

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

21. Кондратенко Ю. П., Коробко О. В., Козлов О. В., Топалов А. М., Герасін О. С. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для контролю рівня і об'єму рідини в резервуарах зі складною геометрією. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2015. № 18 (94). С. 114–121.

22. Kondratenko Y., Topalov A., Gerasin O. Analysis and Modeling of the Slip Signals' Registration Processes Based on Sensors with Multicomponent Sensing Elements. *Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці* : матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції CADSM 2015. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. С. 109–112.

23. Kondratenko Y. P., Gerasin O. S., Topalov A. M. Modern Sensing Systems of Intelligent Robots Based on Multi-Component Slip Displacement Sensors. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*: Proceedings of the 2015 IEEE 8th Int. Conf. (Warsaw, Poland, September 24–26, 2015). Warsaw, 2015. V. 2. P. 902–907.
24. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V., Gerasin O. S., Zaporozhets Y. M. Synthesis and Research of Neuro-Fuzzy Observer of Clamping Force for Mobile Robot Automatic Control System. *Data Stream Mining & Processing (DSMP)* : Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference (Lviv, Ukraine, August 23–27, 2016). Lviv, 2016. P. 90–95.
25. Taranov M., Rudolph J., Wolf C., Kondratenko Y., Gerasin O. Advanced Approaches to Reduce Number of Actors in a Magnetically-Operated Wheel-Mover of a Mobile Robot. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* : Proceedings of the 2017 13th International Conference (Polyana, Ukraine, April 20–23, 2017). Polyana, 2017. P. 96–100.
26. Kondratenko Y. P., Zaporozhets Y. M., Rudolph J., Gerasin O. S., Topalov A. M., Kozlov O. V. Features of clamping electromagnets using in wheel mobile robots and modeling of their interaction with ferromagnetic plate. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* : Proceedings of the 9th IEEE International Conference. Bucharest, Romania, 2017. Vol. 1. P. 453–458.
27. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V., Gerasin O. S., Topalov A. M., Korobko O. V. Automation of Control Processes in Specialized Pyrolysis Complexes Based on Web SCADA Systems. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* : Proceedings of the 9th IEEE International Conference. Bucharest, Romania, 2017. Vol. 1. P. 107–112.
28. Gerasin O., Zaporozhets Y., Kondratenko Y. Models of Magnetic Driver Interaction with Ferromagnetic Surface and Geometric Data Computing for Clamping Force Localization Patches. *Data Stream Mining & Processing (DSMP)*: Proc. of the *IEEE Second Int. Conf.* (Lviv, Ukraine, August 21–25, 2018). Lviv, 2018. P. 44–49.

29. Gerasin O., Kondratenko Y., Topalov A. Dependable Robot's Slip Displacement Sensors Based on Capacitive Registration Elements. *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2018)*: Proceedings of the 9th IEEE Int. Conf. (Kyiv, Ukraine, 24-27 May, 2018). Kyiv, 2018. P. 378–383.

30. Kushnir, V. O., Gerasin O. S. Mobile robot for technological cleaning of ferromagnetic surfaces. *Автоматика 2015* : матеріали XXII міжнар. конф. з автоматичного управління (м. Одеса, 10-11 вересня 2015 р.) 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., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П. Розробка підсистеми автоматичного керування притискним зусиллям для мобільного роботу. *Автоматика 2016* : матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління (м. Суми, 22-23 вересня 2016 р.). Суми : Сумський державний університет, 2016. С. 112–113.

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

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

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

35. Герасін О. С., Козлов О. В., Запорожець Ю. М., Кондратенко Ю. П. Особливості побудови математичних моделей мобільних роботів на базі притискних гусеничних рушіїв. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., Національна

металургійна академія України (м. Дніпропетровськ, 29-31 березня 2016 р.). Дніпропетровськ : НМетАУ, 2016. С. 97.

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

37. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Запорожець Ю. М, Герасін О. С. Мобільний робот для технологічного очищення складних просторових феромагнітних поверхонь. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали VII міжнар. наук.-техн. конф., м. 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. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : XI міжнародна науково-технічна конференція. 2016. URL : <https://goo.gl/ERWA6L>.

39. Герасін О. С. Комплекс задач контролю та автоматичного управління мобільним роботом багатоцільового призначення. *«Могилянські читання – 2014: досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти»* : матеріали всеукр. наук.-метод. конф., м. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 29–31.

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

41. Кондратенко Ю. П., Рудольф Й., Запорожець Ю. М., Козлов О. В., Кондратенко Г. В., Герасін О. С., Таранов М. О. Метод синтезу притискного зусилля мобільного робота з магнітокерованими колесами-рушіями. *Могилянські читання – 2016: досвід та тенденції розвитку суспільства в*

Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти : матеріали всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. Т. 5. С. 34–35.

42. Герасин А. С., Килиманов Б. А. «Умный» почтовый ящик, как компонент «Умного дома». *Сучасні проблеми автоматики та електротехніки* : матеріали всеукр. наук.-техн. конф. (м. Миколаїв, 4–5 квітня 2019 р.). Миколаїв : НУК, 2019. С. 7.

Додаток Б

Акти впровадження та патенти, що підтверджують практичне значення наукових результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ «Респект Бізнес»
О.В. Моспаненко
"19" серпня 2017 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи О.С. Герасіна в галузі розробки спеціалізованих комп'ютерних систем керування

Комісія у складі представників ТОВ «Респект Бізнес»: заступника директора Кабанова М.В. та заступника директора з виробництва Стребного Є.Ю., а також представників Національного університету кораблебудування (НУК) ім. адм. Макарова: д.т.н., професора Кондратенка Ю.П. і аспіранта Герасіна О.С. підтверджує, що у ТОВ «Респект Бізнес» в практику проектування автоматизованого виробничого комплексу піролізу та системи керування обладнанням для переробки органічної частини твердих побутових відходів впроваджені наступні результати досліджень, виконаних в рамках дисертаційної роботи Герасіна О.С.:

- методи структурної організації та процедура синтезу розгалужених цифрових систем автоматичного керування виконавчими механізмами піролізної установки в режимі реального часу;

- сенсорно-інформаційні та програмно-алгоритмічні засоби побудови спеціалізованих комп'ютерних систем для керування складними об'єктами та для контролю параметрів технологічного процесу переробки твердих побутових відходів, які потребують додаткової ідентифікації.

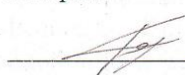
Отримані результати дисертаційної роботи впроваджені на підприємстві «Респект Бізнес» та застосовуються для виготовлення автоматизованого виробничого комплексу для переробки органічної частини твердих побутових відходів.

Від НУК ім. адм. Макарова

Д.т.н., професор

 Ю.П. Кондратенко

Аспірант

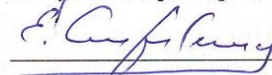
 О.С. Герасін

Від ТОВ «Респект Бізнес»

Заступник директора

 М.В. Кабанов

Заступник директора з виробництва

 Є.Ю. Стребний



**DAAD
Ostpartnerschaftsprogramm**



CERTIFICATION

about the main results of the project “Design and implementation of a mobile robot with controlled electromagnetic wheel-movers for automating tool movement on inclined and vertical ferromagnetic surfaces”

Forschungsprojekt im Rahmen der Kooperation zwischen der Universität des Saarlandes und der Petro-Mohyla-Schwarzmeeruniversität, Mykolajiv für den Zeitraum 2015-2017

1. Principal Investigators

**Petro-Mohyla-Schwarzmeeruniversität,
Mykolajiv**

Name: Yuriy P. KONDRATENKO
Prof. Dr.Sc.
Address:
Petro Mohyla Black Sea State University
10, 68th Desantnykiv Str.
Mykolaiv, 54003, Ukraine
Email: y_kondrat2002@yahoo.com
Tel.: +380 512 464074
Fax: +380 512 500333, +380 512 500069

Universität des Saarlandes

Name: Joachim RUDOLPH
Prof. Dr.-Ing.
Address: Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und
Regelungstechnik, Campus A5 1
66123, Saarbrücken, Germany
Email: j.rudolph@lsr.uni-saarland.de
Tel.: +49 (0) 681 302-64721
Fax: +49 (0) 681 302-64722

2. Ukrainian team members

Mykyta Taranov, Ph.D. student
Yuriy Zaporozhets, PhD, Assoc. prof.
Galyna Kondratenko, PhD., Assoc. prof.
Oleksiy Kozlov, PhD., Assoc. prof.
Oleksandr Gerasin, Ph.D. student
Andriy Topalov, Ph.D. student

German team members

Christian Wolf, Lecturer

3. Main research results

1) The kinematic mathematical model and simulation of electromagnetic wheel mover's (EWM) movement are investigated for confirmation of the EWM efficiency and investigation of the EWM center's trajectory of the movement on the ferromagnetic surface with different profiles.

2) The mathematical models for the permanent and electromagnets of the wheeled MR is developed for determination of main parameters of the clamping magnets (windings and a core). The mathematical models take into account (a) ferromagnetic and non-ferromagnetic uncertainties of working ferromagnetic surface (FS), and (b) electromagnets' constructions and modes.

3) The hybrid neuro-fuzzy clamping force (CF) observer for mobile robot (MR) is designed. The force observer synthesis procedures of the MR's clamping electromagnet based on experimental data and adaptive-network-based fuzzy inference system is considered for



DAAD Ostpartnerschaftsprogramm



preliminary calculating CF using Gaussian membership functions for linguistic terms of input variables in the uncertain working surface (before MR leg adhesion with working surface).

4) Clamping force control system (CFCS) based on Hall sensors is developed. The combination-generation method based on the finite elements is proposed for computing geometrical parameters of CF localization patches in the developed CFCS. The developed CFCS can significantly improve reliability of EWM's movement along inclined FS.

5) Recommendations on choosing construction of the reverse - moving forward sliding spoke of electromagnetic wheel-movers (EWMs) are given based on conducted comparative analysis of existing solutions: linear motor, "screw-nut", "gear-rake" transmission, combined transmission and others.

6) The main results of the project are presented and published by joint Ukrainian-German teams, including such Scopus-publications:

- Yuriy Kondratenko, Yuriy Zaporozhets, Joachim Rudolph, Oleksandr Gerasin, Andriy Topalov, Oleksiy Kozlov: Modeling of clamping magnets interaction with ferromagnetic surface for wheel mobile robots. *International Journal of Computing*, Vol.17, Issue 1, Open Access, 2018, pp. 33-46.

- M. Taranov, C. Wolf, J. Rudolph, Y. Kondratenko: Simulation of Robot's Wheel-Mover on Ferromagnetic Surfaces. *Proceedings of 2017 IEEE 9th International Conference IDAACS'2017*, Bucharest, Romania, vol. 1, Sept. 21-23, 2017, pp. 283-288.

- Y. Kondratenko, Y. Zaporozhets, J. Rudolph, O. Gerasin, A. Topalov, O. Kozlov: Features of clamping electromagnets using in wheel mobile robots and modeling of their interaction with ferromagnetic plate. *Proceedings of 2017 IEEE 9th International Conference IDAACS'2017*, Bucharest, Romania, vol. 1, Sept. 21-23, 2017, pp. 453-458.

- Taranov, M., Rudolph, J., Wolf, C., Kondratenko, Y., Gerasin, O. Advanced approaches to reduce number of actors in a magnetically-operated wheel-mover of a mobile robot. *2017 13th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2017 - Proceedings*, 2017. pp. 96-100.

- Kondratenko, Y.P., Rudolph, J., Kozlov, O.V., Zaporozhets, Y.M., Gerasin, O.S. Neuro-fuzzy observers of clamping force for magnetically operated movers of mobile robots, *Technical Electrodynamics*, Issue 5, 2017, pp. 53-61, (in Ukrainian)

Place, date, signatures

From the Petro-Mohyla Black Sea National University
Saarbrücken, October 25, 2018



Yuriy P. KONDRATENKO

From the University of Saarland,
Saarbrücken, October 25, 2018



Joachim RUDOLPH

Lehrstuhl für
Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität des Saarlandes, Geb. A5 1
Postfach 151150 • 66041 Saarbrücken
Prof. Dr.-Ing. habil. J. Rudolph

ДОВІДКА

з впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Герасіна Олександра Сергійовича в області автоматизації процесів керування та комп'ютерно-інтегрованих технологій при виконанні освітнього європейського проекту ALIOT за програмою Erasmus+

Наукові результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук в області автоматизації процесів керування та комп'ютерно-інтегрованих технологій Герасіна Олександра Сергійовича (науковий керівник д.т.н., професор, заслужений винахідник України Кондратенко Юрій Пантелійович, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили) впроваджені при виконанні освітнього європейського проекту ALIOT "Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications", 573818-EPP-1-2016-1-UK-EPPKA2-CBHE-JP, 2016-2019 (за програмою Erasmus+), що спрямований на розробку магістерських і аспірантських курсів за тематикою «Structures, models and technologies for development of industrial IoT-based systems» та «Advanced techniques and means for design, modernization and implementation of industrial IoT-based systems».

Розроблена Герасіним О.С. комп'ютеризована IoT система для автоматичного управління основними параметрами магніто-керованого мобільного робота увійшла до курсу «ITM6 IoT for industrial systems», який призначено для підвищення кваліфікації спеціалістів з виробничих підприємств та викладається для студентів магістерської підготовки за IoT напрямом. В практичних роботах у складі створеного модуля «ITMM6.2 Advanced techniques and means for design, modernization and implementation of industrial IoT-based systems» даного курсу застосовуються розроблені в дисертаційній роботі моделі компонентів сенсорно-рушійного комплексу IoT мобільного робота на основі магніто-керуваних рушіїв.

Національний координатор ALIOT-проекту,
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж
Національного аерокосмічного університету
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»,
заслужений винахідник України,
доктор технічних наук, професор

В.С. Харченко

Підпис професора Харченка В.С. засвідчую:
в. о. декана факультету радіоелектроніки,
комп'ютерних систем та інфокомунікацій
Національного аерокосмічного університету
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»



О.В. Одокієнко

ДОВІДКА

з впровадження результатів дисертаційної роботи О.С. Герасіна в галузі автоматизації процесів керування та спеціалізованих комп'ютерних систем при виконанні освітнього європейського проекту TEMPUS CABRIOLET «Model-Oriented Approach And Intelligent Knowledge-Based System for Evolvable Academia-Industry Cooperation in Electronic and Computer Engineering» (544497-TEMPUS-1-2013-1-UK-TEMPUS-JPHES)

Наукові результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук в галузі автоматизації процесів керування та спеціалізованих комп'ютерних систем Герасіна Олександра Сергійовича (науковий керівник д.т.н., професор, заслужений винахідник України Кондратенко Юрій Пантелійович, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили) впроваджені при виконанні освітнього європейського проекту TEMPUS CABRIOLET «Model-Oriented Approach And Intelligent Knowledge-Based System for Evolvable Academia-Industry Cooperation in Electronic and Computer Engineering» (544497-TEMPUS-1-2013-1-UK-TEMPUS-JPHES).

Розроблені Герасіним О.С. програмне забезпечення та інструментальні засоби синтезу інтелектуальних компонентів комп'ютерних систем автоматичного управління параметрами мобільного робота були впроваджені у розділі монографії другого тому навчальних матеріалів «Університетсько-індустріальна кооперація. Інтелектуальна знання-орієнтована система прийняття рішень. Вимоги, алгоритми, верифікація і застосування», під редакцією д.т.н., проф. Ю.П. Кондратенка, д.т.н., проф. В.С. Харченка. Крім того, результати досліджень впроваджені в тренінги для студентів і викладачів університетів та спеціалістів ІТ-компаній в рамках проекту TEMPUS CABRIOLET.

Національний координатор CABRIOLET-проекту,
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж
Національного аерокосмічного університету
ім. М.С. Жуковського «ХАІ»,
заслужений винахідник України,
доктор технічних наук, професор

В.С. Харченко

Підпис професора Харченка В.С. засвідчую:
в. о. декана факультету радіоелектроніки,
комп'ютерних систем та інфокомунікацій
Національного аерокосмічного університету
ім. М.С. Жуковського «ХАІ»,
кандидат технічних наук



О.В. Одокієнко



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор

Національного університету
кораблебудування ім. адм. Макарова
проф. С.І. Трушляков
"15" лютого 2019 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Олександра Сергійовича Герасіна "Спеціалізована комп'ютерна система для керування інтелектуальним мобільним роботом багатоцільового призначення"

Комісія у складі:

д.т.н., професора Павлова Г.В. – директора Навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки (ННІАЕ), д.т.н., професора Ю.П. Кондратенка – професора кафедри комп'ютеризованих систем управління (КСУ), Савенкова О.В. – начальника науково-дослідної частини (НДЧ) НУК, підписала дійсний акт про те, що основні теоретичні положення наукових досліджень в рамках кандидатської дисертації молодшого наукового співробітника НДЧ Герасіна О.С., а саме:

- структурна організація спеціалізованої комп'ютерної системи моніторингу та автоматичного керування мобільним роботом багатоцільового призначення (МРБП), що дозволяє автоматизувати технологічні операції судноремонту та підвищувати показники якості роботизованих комплексів;
- математичні моделі МРБП та його компонентів, що враховують особливості конструктивної побудови МРБП та дають змогу досліджувати процеси керування його просторовим рухом, зокрема при переміщенні робочого інструменту по нахиленим феромагнітним поверхням та виконанні відповідних технологічних операцій;
- алгоритми ідентифікації параметрів складних технічних об'єктів на основі багатодатчикових інформаційно-вимірювальних схем та експериментальних даних;

впроваджені в Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова при виконанні (в рамках наукових досліджень на замовлення Міністерства освіти і науки України) держбюджетних тем №2110 "Розробка комп'ютеризованої системи моніторингу та автоматичного керування мобільним роботом багатоцільового призначення на основі інтелектуальних технологій", номер державної реєстрації 0117U007282 (2017-2020 рр.) та №1990 "Дослідження та розробка модулю термоакустичного перетворювача теплових викидів енергетичних установок транспорту та промисловості", номер державної реєстрації 0115U000301 (2015-2017 рр.).

Директор ННІАЕ,
д.т.н., професор

Професор кафедри КСУ,
д.т.н., професор

Начальник науково-дослідної частини НУК

Г.В. Павлов

Ю.П. Кондратенко

О.І. Савенков



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук О.С. Герасіна у навчальний процес

Комісія у складі:

д.т.н., професора Павлова Г.В. – директора Навчально-наукового інституту автоматики і електротехніки (ННІАЕ), к.т.н., доцента Черно О.О. – завідуючого кафедрою комп'ютеризованих систем управління (КСУ), к.т.н., Покровського М.В. – доцента кафедри КСУ, підписала дійсний акт про те, що основні теоретичні положення наукових досліджень викладача кафедри комп'ютеризованих систем управління Герасіна О.С., проведених у рамках кандидатської дисертації, впроваджені та використовуються в навчальному процесі НУК ім. адм. Макарова, а саме:

- механізми ідентифікації складових частин технічних об'єктів, розробки структур та функціональних схем з використанням методів побудови систем керування на базі нейронних мереж та нечіткої логіки – при викладанні дисциплін "Теорія систем і системний аналіз", "Комп'ютеризовані системи штучного інтелекту";
- програмно-алгоритмічні засоби побудови людино-машинного інтерфейсу систем контролю складних технічних об'єктів – при викладанні дисциплін "Комп'ютерна графіка", "Автоматизоване проектування цифрових пристроїв";
- методи проектування систем автоматичного керування, в тому числі синтезу регуляторів, знайшли відображення в роботі «Проектування пристроїв та систем управління : Методичні вказівки до практичних занять» / Ю.П. Кондратенко, О.В. Козлов, О.С. Герасін. – Миколаїв : НУК, 2017. – 108 с.

Результати дисертаційної роботи використовуються, зокрема, в лекційному матеріалі та лабораторних роботах, а також для дипломного проектування при підготовці фахівців за спеціальністю 151 – "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

Директор ННІАЕ,
д.т.н., професор

Завідуючий кафедрою КСУ,
к.т.н., доцент

к.т.н., доцент кафедри КСУ

Г.В. Павлов

О.О. Черно

М.В. Покровський

**China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of
Shipping and Marine Engineering**

Address: No. 2 Mengxi Road, Zhenjiang, Jiangsu. Post Code: 212003, CPR
Tel.: 86-511-84401190

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

OF CONTRACT № 03.2013/02 "THE DEVELOPMENT OF SHIP MULTIFUNCTIONAL LIQUID
LEVEL REMOTE MEASUREMENT AND ALARM SYSTEM"

about the implementation of Oleksandr Gerasin's PhD-dissertation results
to the field of the automation of control processes

The present Act-Certificate confirms that China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of O.S. Gerasin's PhD-thesis, in the practice of designing of automated ship multifunctional liquid level remote measurement and alarm systems, including:

- the techniques of structural organization and procedure for the synthesis of branched digital automatic control systems of main components of automated ship multifunctional liquid level remote measurement and alarm systems in real time mode;
- the methodology of sensory-informational automatic control systems building with remote measurements and control influences forming;
- the software-algorithmic tools capable to increase flexibility and scalability for the complex objects control and alarm systems implementation based on SCADA Trace Mode 6.

The results of dissertation work implemented by China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering (China) and used for the manufacture of automated ship multifunctional liquid level remote measurement and alarm systems.

Yours sincerely,

China-Ukraine (Jiangsu) Transnational
Technology Transfer Centre of Shipping
and Marine Engineering



" 28 " 03, 2016

China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering

Address: No. 2 Mengxi Road, Zhenjiang, Jiangsu. Post Code: 212003, CPR
Tel.: 86-511-84401190

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

OF CONTRACT № 03.2013/02 "THE DEVELOPMENT OF SHIP MULTIFUNCTIONAL LIQUID LEVEL REMOTE MEASUREMENT AND ALARM SYSTEM"

about the implementation of Oleksandr Gerasin's PhD-dissertation results to the field of the automation of control processes

The present Act-Certificate confirms that China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of O.S. Gerasin's PhD-thesis, in the practice of designing of automated systems for the control of floating docks docking operations, including:

- the techniques of automatic control systems designing for multiparameter objects, taking into account the emerging uncertainties and features of the floating dock structure operating mode;
- the intelligent mechanisms for identifying of the floating dock controlled parameters, which have difficulties with direct measurements in the functioning process, and also considering the peculiarities of operating conditions;
- the algorithms and software tools for the complex distributed-in-space flexible scalable embedded systems synthesis task using the capabilities of SCADA Trace Mode 6, as well as recommendations for the selection of additional software and hardware means for a floating dock control system adjustment.

The results of dissertation work implemented by China-Ukraine (Jiangsu) Transnational Technology Transfer Centre of Shipping and Marine Engineering (China) and used for the manufacture of automated systems for the control of floating docks docking operations.

Yours sincerely,

China-Ukraine (Jiangsu) Transnational
Technology Transfer Centre of Shipping
and Marine Engineering

" 28 " 03.2016



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 93671

(13) U

(51) МПК

B25J 19/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2014 04989**
(22) Дата подання заявки: **12.05.2014**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.10.2014**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.10.2014, Бюл. № 19**

(72) Винахідник(и):
**Кондратенко Юрій Пантелійович (UA),
Топалов Андрій Миколайович (UA),
Герасін Олександр Сергійович (UA)**
(73) Власник(и):
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА
МАКАРОВА,
пр. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв,
54025 (UA)**

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛУ ПРОКОВЗУВАННЯ

(57) Реферат:

Пристрій для реєстрації сигналу проковзування містить датчик проковзування, встановлений у кінці конічного пазу однієї з губок захвату адаптивного робота, кожна з яких пов'язана з приводом їх переміщення, підключеним до виходу блоку керування, вхід якого зв'язаний з блоком корекції стискального зусилля, який містить вимірювальний блок, детектор та аналого-цифровий перетворювач, а датчик проковзування виконаний у вигляді стрижня, розташованого усередині паза кінцевої форми і одним кінцем зв'язаного з губкою, наконечника, розташованого на іншому кінці стрижня й підпружиненого до нього, та реєструвального елемента, виконаного у вигляді конденсатора. Крім цього, введено додаткову пружну еластичну оболонку напівсферичного типу з можливістю контактування її опуклої форми з робочою поверхнею наконечника, а на контактній поверхні відповідної губки виконано круговий паз, в якому по круговому контуру основи кінцевого паза за допомогою притискного кільця і гвинторізьбових з'єднань герметично закріплена основа додаткової пружної оболонки.

UA 93671 U



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **93997** (13) **U**
(51) МПК
B25J 19/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2014 04715**

(22) Дата подання заявки: **05.05.2014**

(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: **27.10.2014**

(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **27.10.2014, Бюл. № 20**

(72) Винахідник(и):
**Кондратенко Юрій Пантелійович (UA),
Кондратенко Галина Володимирівна
(UA),
Топалов Андрій Миколайович (UA),
Герасін Олександр Сергійович (UA)**

(73) Власник(и):
**ЧОРНОМОРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ,
вул. 68-ми Десантників, 10, м. Миколаїв,
54003 (UA)**

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛУ ПРОКОВЗУВАННЯ

(57) Реферат:

Пристрій для реєстрації сигналу проковзування містить датчик проковзування, встановлений у кінчному пазу принаймні однієї з губок захвату адаптивного робота, блок керування, блок корекції стискального зусилля, який містить вимірювальний блок, детектор та аналого-цифровий перетворювач, реєструвальний елемент виконаний у вигляді конденсатора. Поверхня паза виконана кінчною, а датчик проковзування виконаний у вигляді стрижня. При цьому стрижень пружно зв'язаний з губкою, робочу поверхню наконечника виконано з еластичного матеріалу, а обкладинки конденсатора підключені до входів вимірювального блока, зв'язаного через детектор з аналого-цифровим перетворювачем, вихід якого підключений до блока керування приводом губок. Один кінець стрижня зв'язаний з відповідною губкою за допомогою сферичного шарніра, а пружний зв'язок стрижня з губкою виконано у вигляді системи циліндричних пружин, закріплених одними кінцями на стрижні, а іншими - на внутрішній поверхні кінчного паза. При цьому подовжні осі всіх пружин розташовані в площині, яка одночасно паралельна контактній поверхні відповідної губки, перпендикулярна подовжній осі стрижня і проходить між наконечником та обкладинками конденсатора, а подовжні осі будь-яких сусідніх пружин утворюють між собою однаковий за величиною кут.

UA 93997 U



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **95803** (13) **U**
(51) МПК
B25J 19/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2014 07322	(72) Винахідник(и):	Кондратенко Юрій Пантелійович (UA), Топалов Андрій Миколайович (UA), Герасін Олександр Сергійович (UA)
(22) Дата подання заявки:	01.07.2014	(73) Власник(и):	НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА, пр. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	12.01.2015		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	12.01.2015, Бюл. № 1		

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛУ ПРОКОВЗУВАННЯ

(57) Реферат:

Пристрій для реєстрації сигналу проковзування містить датчик проковзування, встановлений у конічному пазу принаймні однієї з губок захвату адаптивного робота, кожна з яких пов'язана із приводом їхнього переміщення, підключеним до виходу блоку керування, вхід якого зв'язаний з блоком корекції стискального зусилля, який містить вимірювальний блок, детектор та аналого-цифровий перетворювач, поверхня паза виконана конічною, а датчик проковзування виконаний у вигляді стрижня, розташованого усередині паза конічної форми і одним кінцем зв'язаного з губкою, наконечника, розташованого на іншому кінці стрижня й підпружиненого до нього, та реєструвального елемента, виконаного у вигляді конденсатора, причому стрижень пружно зв'язаний з губкою, а обкладинки конденсатора, що розташовані на зовнішній поверхні стрижня та внутрішній поверхні конічного паза, підключені до входів вимірювального блока, зв'язаного через детектор з аналого-цифровим перетворювачем, вихід якого підключений до блока керування приводом губок. Введено додаткову пружну еластичну оболонку напівсферичного типу, яка жорстко зв'язана з наконечником в околі точки контактування опуклої форми додаткової оболонки з робочою поверхнею наконечника, один кінець стрижня зв'язаний з відповідною губкою за допомогою сферичного шарніру, а на контактній поверхні відповідної губки виконано круговий паз, в якому по круговому контуру основи конічного паза за допомогою притисного кільця і гвинто-різбових з'єднань герметично закріплена основа додаткової пружної оболонки.

UA 95803 U



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **97831** (13) **U**
(51) МПК
B25J 19/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2014 10537**
(22) Дата подання заявки: **26.09.2014**
(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: **10.04.2015**
(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **10.04.2015, Бюл. № 7**

(72) Винахідник(и):
**Кондратенко Юрій Пантелійович (UA),
Кондратенко Галина Володимирівна
(UA),
Герасін Олександр Сергійович (UA),
Топалов Андрій Миколайович (UA)**
(73) Власник(и):
**ЧОРНОМОРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ,
вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003
(UA)**

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛУ ПРОКОВЗУВАННЯ

(57) Реферат:

Пристрій для реєстрації сигналу проковзування містить датчик проковзування, блок керування, блок корекції стискального зусилля, багатовходовий вимірювальний блок, губку, наконечник, багатокомпонентний реєструвальний елемент, сферичний шарнір, суматори, пороговий елемент та блок затримки.

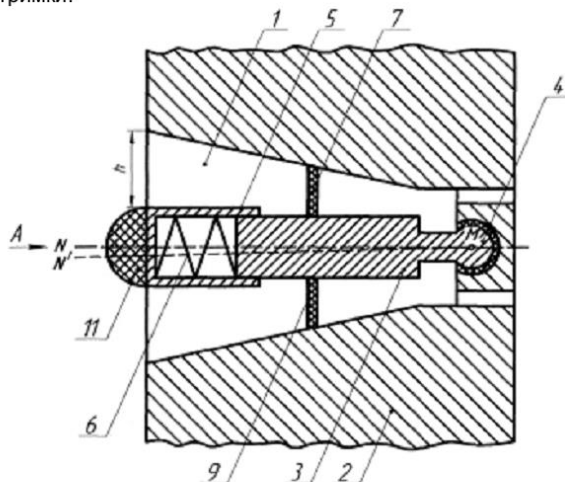


Fig. 1

UA 97831 U



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **100341** (13) **U**

(51) МПК (2015.01)

B25J 19/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2015 00063**

(22) Дата подання заявки: **05.01.2015**

(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: **27.07.2015**

(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **27.07.2015, Бюл. № 14**

(72) Винахідник(и):
**Кушнір Володимир Олександрович (UA),
Кондратенко Юрій Пантелійович (UA),
Топалов Андрій Миколайович (UA),
Герасін Олександр Сергійович (UA)**

(73) Власник(и):
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА
МАКАРОВА,
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв,
54025 (UA)**

(54) МОБІЛЬНИЙ РОБОТ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ КОРПУСУ СУДНА

(57) Реферат:

Мобільний робот для механічного очищення корпусу судна містить основні постійні магніти для утримання робота на феромагнітній поверхні корпусу судна та двокомпонентну раму плоскої конструкції. Прямокутна частина рами оснащена ємністю нульової плавучості та гусеничним механізмом переміщення, а кожна гусениця переміщення (ліва і права) оснащена натяжним пристроєм гусеничної стрічки, спареним електродвигуном-редуктором та ведучим і веденим колесами. Трикутна частина загальної рами оснащена механізмом для механічного очищення корпусу судна, що складається з робочого інструменту у вигляді сталевих фрез із зачисними сталевими щітками, системи конічних зубчатих коліс та додаткового електродвигуна з двостороннім редуктором. Фрези рівномірно розташовані по обидві сторони трикутної частини загальної рами та кінематично з'єднані за допомогою системи конічних зубчатих коліс з додатковим електродвигуном з двостороннім редуктором. На нижній поверхні трикутної частини рами встановлені додаткові постійні магніти для додаткового утримання робота на корпусі судна в процесі його очищення, а вали редукторів і електродвигунів для забезпечення водонепроникності оснащені композитними феромагнітними і сальниковими ущільненнями. Основні постійні магніти встановлені за допомогою сферичних шарнірів на нижній поверхні прямокутної частини рами між лівою і правою гусеницями з забезпеченням відповідного зазору щодо феромагнітної поверхні корпусу судна.

UA 100341 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **104222** (13) **U**
 (51) МПК (2016.01)
B25J 19/00
B25J 21/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: а 2015 06778	(72) Винахідник(и): Кушнір Володимир Олександрович (UA), Кондратенко Юрій Пантелійович (UA), Герасін Олександр Сергійович (UA), Топалов Андрій Миколайович (UA)
(22) Дата подання заявки: 08.07.2015	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.01.2016	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.01.2016, Бюл. № 2	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА, пр. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025 (UA)

(54) МОБІЛЬНИЙ РОБОТ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПІДВОДНИХ ПОВЕРХОНЬ СУДЕН

(57) Реферат:

Мобільний робот для очищення підводних поверхонь суден містить корпус, механізм переміщення корпусу та два виконавчі модулі, кожний з яких виконаний у вигляді гребного гвинта з маточинами, що оснащений приводом обертання і встановлений на корпусі з можливістю обертання навколо своєї подовжньої осі, яка перпендикулярна до підводної поверхні судна. При цьому, введено додатковий виконавчий модуль та модуль нульової плавучості, корпус виконано у вигляді прямокутної рами, на якій закріплено модуль нульової плавучості та механізм переміщення корпусу, виконаний у вигляді оснащених відповідними підшипниками коліс, встановлених на корпусі з можливістю контактування з підводною поверхнею суден та оснащених відповідними приводами у вигляді спарених електродвигунів-редукторів, кожне колесо механізму переміщення корпусу покрито фрикційним матеріалом, кожний гребний гвинт відповідного виконавчого модуля виконаний у вигляді принаймні двох лопатей, подовжні осі яких співпадають і утворюють одну подовжню вісь відповідної пари лопатей, причому лопаті кожного гребного гвинта виконано у вигляді прямокутних пластин з загнутими під кутом 45° кінцями, кінці кожної пари лопатей з однією спільною подовжньою віссю загнуті в протилежних напрямках, при цьому кожний виконавчий модуль встановлений у відкритій камері напівсферичного типу, яка вершиною закріплена на корпусі, півсферу кожної відкритої камери зафіксовано на корпусі в повернутому до підводної поверхні судна стані, привод обертання виконавчих модулів виконано у вигляді електродвигуна з двостороннім редуктором та системи конічних зубчатих передач, а місця розташування виконавчих модулів утворюють рівнобедрений трикутник, в вершинах якого виконавчі модулі закріплені на корпусі.

U
UA 104222



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **104113** (13) **U**
 (51) МПК (2015.01)
B25J 9/00
B25J 15/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 06969	(72) Винахідник(и): Кушнір Володимир Олександрович (UA), Кондратенко Юрій Пантелійович (UA), Топалов Андрій Миколайович (UA), Герасін Олександр Сергійович (UA), Тростинський Михайло Миколайович (UA), Рижков Ростислав Сергійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 13.07.2015	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА, пр. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 12.01.2016	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 12.01.2016, Бюл. № 1	

(54) МОБІЛЬНИЙ РОБОТ ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПО ДОВІЛЬНО ОРІЄНТОВАНИМ У РОБОЧОМУ ПРОСТОРІ ПОВЕРХНЯМ

(57) Реферат:

Мобільний робот для переміщення по довільно орієнтованим у робочому просторі поверхням містить вакуумний захватний пристрій безконтактного типу, дистанційний блок керування електродвигунами мобільного робота та раму плоскої конструкції, яка оснащена колісним механізмом переміщення мобільного робота, що містить ведене колесо та пару ведучих коліс, які закріплені на задній частині плоскої рами і зв'язані між собою за допомогою двостороннього редуктора. Ведене колесо оснащено механізмом повороту у вигляді черв'ячного редуктора. Кожне колесо покрите фрикційним матеріалом в зоні контактування з поверхнею. Вакуумний захватний пристрій безконтактного типу виконаний у вигляді повітряного гвинта. Камера встановлена на рамі із забезпеченням відповідного зазору між єдиною відкритою стороною циліндричної камери та довільно орієнтованою у робочому просторі поверхнею. Повітряний гвинт виконаний у вигляді двох лопатей. Вакуумний захватний пристрій безконтактного типу встановлений у центральній частині плоскої рами у відповідному круглому отворі.

UA 104113 U



УКРАЇНА

(19) UA (11) 125523 (13) U

(51) МПК (2018.01)

B63B 59/00

B60B 19/00

B60F 3/00

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2017 12633	(72) Винахідник(и): Кондратенко Юрій Пантелійович (UA), Запорожець Юрій Михайлович (UA), Герасін Олександр Сергійович (UA), Кондратенко Галина Володимирівна (UA)
(22) Дата подання заявки: 19.12.2017	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.05.2018	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.05.2018, Бюл. № 9	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА, пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025 (UA)

(54) КОЛЕСО-РУШІЙ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

(57) Реферат:

Колесо-рушій мобільного робота містить маточину з геометричною віссю колеса, обід зі стрижнями з їх геометричними осями, шину, багатоканальний блок керування елементами вузла, а сам вузол для з'єднання маточини з ободом виконаний у вигляді жорстких радіальних спиць, нерухомі та рухомі елементи. Багатоканальний блок керування додатково оснащений групою входів, число яких відповідає кількості притискних магнітів колеса-рушія. Кожний притискний магніт оснащений пружною ізоляційною накладкою, закріпленою на притискній поверхні притискного магніту, та сенсорною системою з принаймні п'яти датчиків магнітного поля, один з датчиків магнітного поля закріплений в геометричному центрі, а інші датчики - в периферійній зоні притискної поверхні. Датчики магнітного поля кожного притискного магніту розташовані між притисною поверхнею та пружною ізоляційною накладкою відповідного притискного магніту. Виходи датчиків магнітного поля кожного притискного магніту підключені до відповідного багатовходового обчислювального блока, вихід якого з'єднаний з другим інвертованим входом відповідного суматора, вихід якого, в свою чергу, з'єднаний з входом відповідного регулятора притискного зусилля, вихід якого підключений до відповідного входу з групи входів блока керування. Перший прямий вхід відповідного суматора з'єднаний через відповідний керований ключ з виходом джерела опорної напруги, а керований вхід кожного керованого ключа з'єднаний з відповідним виходом першої групи виходів багатоканального блока керування.

U
125523
UA



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **126444** (13) **U**
(51) МПК
B25J 9/10 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2017 12632	(72) Винахідник(и): Кондратенко Юрій Пантелійович (UA), Запорожець Юрій Михайлович (UA), Герасін Олександр Сергійович (UA), Таранов Микита Олександрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 19.12.2017	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.06.2018	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.06.2018, Бюл.№ 12	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА, пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025 (UA)

(54) СПОСІБ МАГНІТОКЕРОВАНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

(57) Реферат:

Спосіб магнітокерованого переміщення мобільного робота включає оснащення його ведучими колесами та притискними магнітами, далі його розміщують у робочій зоні, за допомогою притискних магнітів утримують його корпус на оброблюваній феромагнітній поверхні, приводять до руху ведучі колеса і здійснюють покрокове переміщення мобільного робота по оброблюваній феромагнітній поверхні, для чого по чергові крок за кроком вводять у зчеплення з феромагнітною поверхнею наступні за напрямком руху передні робочі притискні магніти та виводять із зчеплення з нею останні за напрямком руху задні робочі притискні магніти, між ведучими колесами та притискними магнітами утворюють керований кінематичний зв'язок, забезпечують кероване зусилля зчеплення притискних магнітів з феромагнітною поверхнею та надають їм лінійний та кутовий ступені рухомості відносно відповідних осей кінематичного зв'язку. Кожний крок переміщення мобільного робота розбивають на етапи і здійснюють шляхом зчеплення кожного ведучого колеса з феромагнітною поверхнею з використанням принаймні двох робочих притискних магнітів при максимальних утримуючих зусиллях. При цьому на першому етапі, коли попередньо створені максимальні утримуючі зусилля для задніх і проміжних робочих притискних магнітів, передні притискні магніти вводять у зчеплення з феромагнітною поверхнею при мінімальних значеннях зусилля кінематичного зв'язку та утримуючого зусилля зчеплення з феромагнітною поверхнею, на другому етапі для передніх притискних магнітів зусилля зчеплення з феромагнітною поверхнею підвищують до максимального значення, на третьому етапі зусилля кінематичного зв'язку заднього робочого притискного магніту кожного ведучого колеса поступово послаблюють до мінімального значення, а зусилля кінематичного зв'язку переднього робочого притискного магніту кожного ведучого колеса - поступово посилюють до максимального значення, на четвертому етапі повністю вимикають кінематичний зв'язок кожного заднього притискного магніту, зменшують зусилля зчеплення до мінімального значення і виводять його з контакту з феромагнітною поверхнею, при цьому перед наступним кроком переміщення мобільного робота функцію заднього притискного магніту передають проміжному притискному магніту, а функцію проміжного притискного магніту - передньому притискному магніту. Додатково формують інформаційні сигнали, які відповідають поточним значенням магнітної індукції в геометричному центрі та в периферійній зоні притискної поверхні кожного притискного магніту, що перебуває в безпосередньому зчепленні з феромагнітною поверхнею, після чого за допомогою спеціалізованого обчислювального алгоритму здійснюють обробку сформованих інформаційних

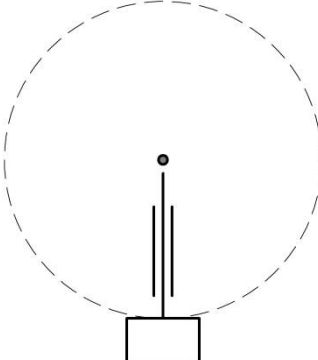
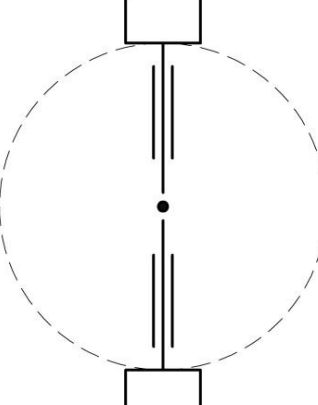
U
UA 126444 U

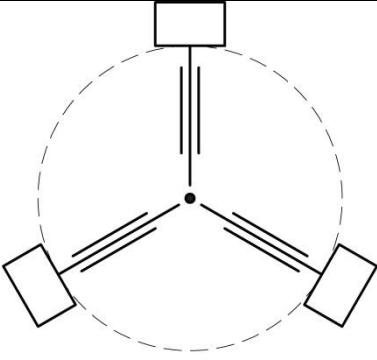
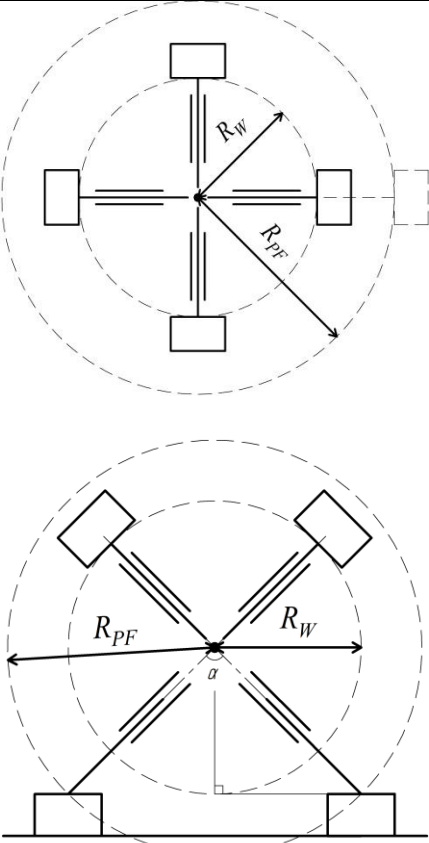
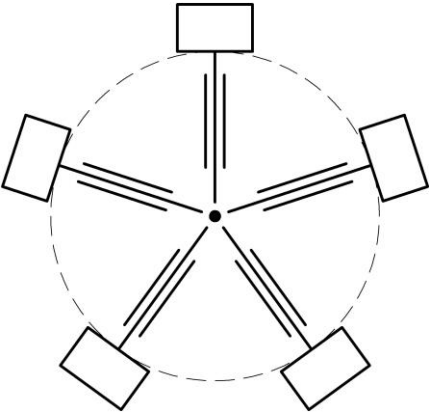
Додаток В

Аналіз особливостей колеса-рушія МРБП для робіт на складних поверхнях

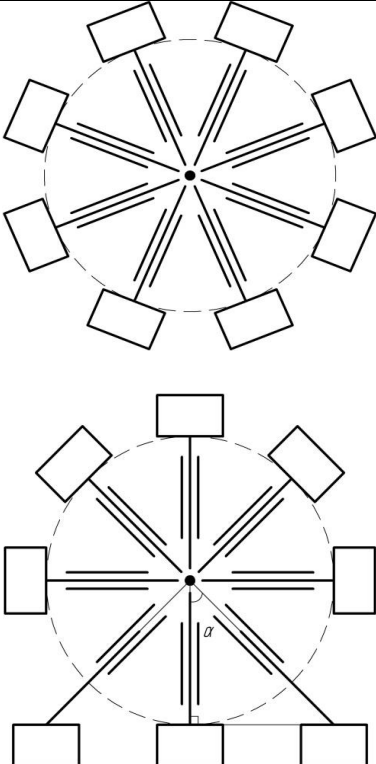
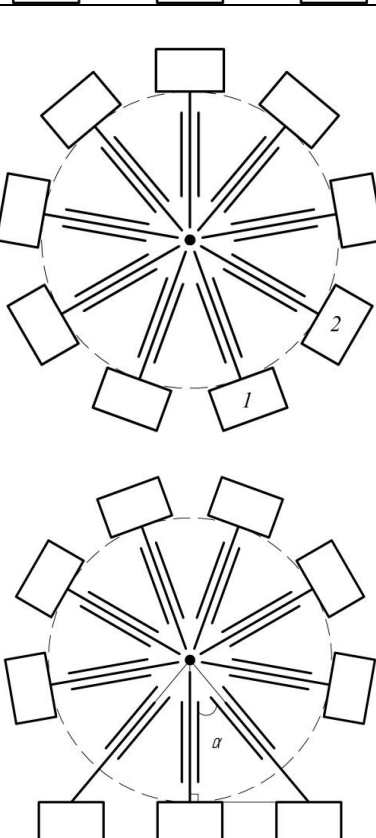
Більша кількість розсувних спиць в конструкції колеса-рушія дозволяє підвищити надійність зчеплення з робочою поверхнею та величину сумарної сили тяги колеса, що доцільно при виконанні енерговитратних транспортних операцій або очищення, однак таке покращення веде до суттєвого збільшення масогабаритних показників кожного окремого колеса-рушія МРБП. При меншій кількості розсувних спиць такі колеса мають обмежене застосування та можуть бути використані в окремих спеціальних операціях. В таблиці В.1 наведені можливі схемотехнічні рішення коліс-рушіїв та їх застосування.

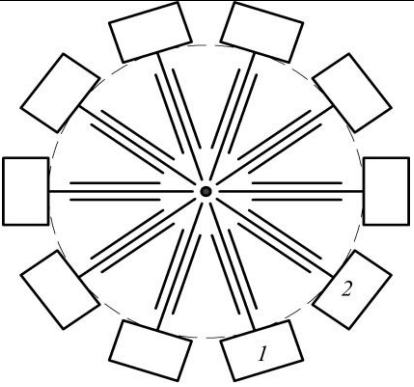
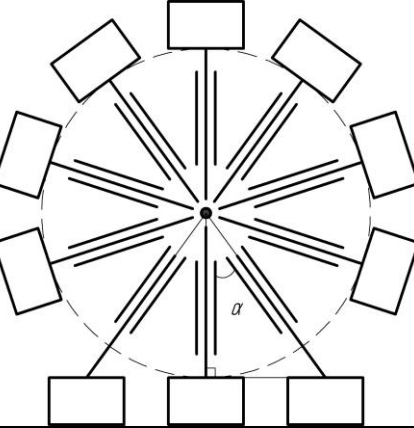
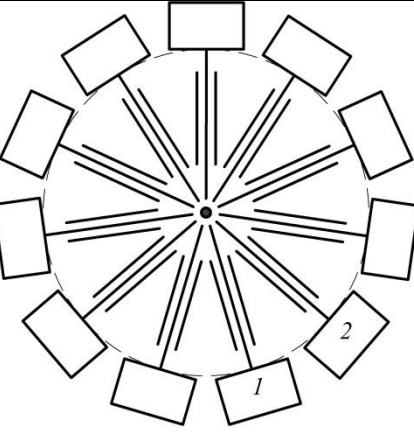
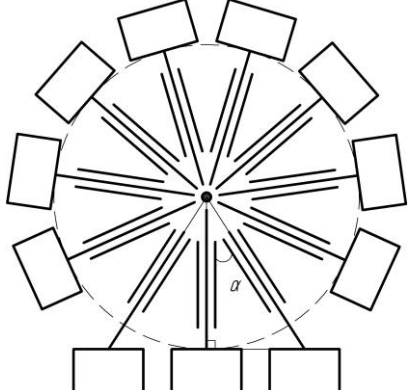
Таблиця В.1 – Аналіз схемотехнічних рішень коліс-рушіїв

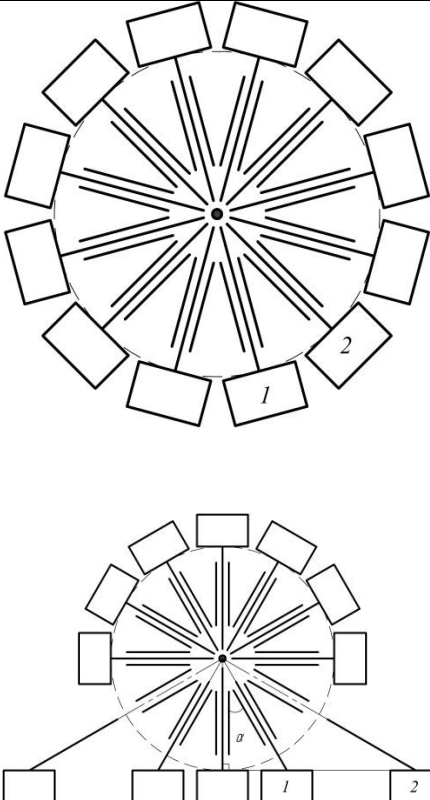
Кількість ПЕ, N	Кут між сусідніми рухомими спицями, α	Схематичне розміщення притискних магнітів на ободі колеса	Особливості та можливості конструкції	Шляхи застосування конструкції
1	$\alpha = 360^\circ$ $\alpha = \frac{360^\circ}{N}$		окремо переміщення тільки під дією сили тяжіння вниз. Котитися не може	як складова частина підйомних перевантажувальних механізмів; гравітаційний робот (керування притискним зусиллям)
2	$\alpha = 180^\circ$		окремо переміщення тільки під дією сили тяжіння. Котитися не може	позиціонування обладнання у вузькостях, очищення трубопроводів, димоходів

3	$\alpha = 120^\circ$		в деяких випадках можливі переміщення вгору. Котитися не може	переміщення у вузькостях, очищення резервуарів, димоходів; робот-ползун (коли площа колеса паралельна поверхні)
4	$\alpha = 90^\circ$		може стояти на 2-х ногах. Котитися не може. R_W – загальна довжина розсувної спиці при втягнутому стані; R_{PF} – відстань від центру колеса до краю спиці у повністю висунутому стані. $R_{PF} = R_W / \cos(\alpha)$ ($R_{PF} = \infty$)	робот-ползун для переміщення по гладкій феромагнітній поверхні
5	$\alpha = 72^\circ$		теоретично можливе переміщення колеса за допомогою 2-х спиць при закріпленні на 2-х магнітах, однак практично: $R_{PF} = 3,23R_W$ – дуже великий виліт спиці (конструкція не дозволяє	робот-ползун; в якості рушія для переміщення МРБП по криволінійним поверхнях з малим радіусом кривизни (не більше $1,5R_W$)

			помістити)	
6	$\alpha = 60^\circ$		переміщення здійснюють дві спиці, закріплення на двох магнітах $R_{PF} = 2R_W$ – вразливе місце закріплення при повністю висунутих двох крайніх спицях (немає запасу довжини)	робот-ползун; в якості рушія для переміщення МРБП по криволінійним поверхнях з малим радіусом кривизни (не більше $2R_W$) – майже колесо-рушій
7	$\alpha = 51,4^\circ$		можливе закріплення та переміщення за допомогою двох спиць $R_{PF} = 1,6R_W$ – в деякі моменти часу можуть працювати 3 спиці	колесо-рушій для МРБП, але є обмеження по масі робота, через невеликий запас довжини робочої частини спиці ($0,4R_W$), тому може знадобитися для задач інспекції та розвідки

8	$\alpha = 45^\circ$		більшу частину робочого часу можна використовувати 3 спиці $R_{PF} = 1,41R_W$	повноцінне колесо-рушій для МРБП
9	$\alpha = 40^\circ$		практично весь робочий час можна використовувати 3 спиці $R_{PF1} = 1,06R_W;$ $R_{PF2} = 2R_W$ ($R_{PF1}, R_{PF2} - R_{PF}$, які відповідають вказаному на рисунку зліва номеру спиці) $R_{PF} = 1,31R_W$	потужне колесо- рушій для транспортних платформ, операції очищення

10	$\alpha = 36^\circ$	 	мінімум три спиці в роботі. Частину робочого часу можлива робота з 4-ма спицями. $R_{PF1} = 1,05R_W$; $R_{PF2} = 1,7R_W$ $R_{PF} = 1,24R_W$	потужне колесо-рушій для великогабаритних транспортних платформ, операції очищення
11	$\alpha = 32,7^\circ$	 	переважну частину часу можлива робота на 4 спицях. $R_{PF1} = 1,04R_W$; $R_{PF2} = 1,53R_W$ $R_{PF} = 1,19R_W$	потужне високопрохідне колесо-рушій для великогабаритних транспортних платформ

12	$\alpha = 30^\circ$		постійно можуть працювати 4 спиці. $R_{PF1} = 1,035R_W;$ $R_{PF2} = 1,41R_W$ $R_{PF1} = 1,15R_W;$ $R_{PF2} = 2R_W$	потужне високопрохідне колесо-рушій для великогабаритних транспортних платформ
----	---------------------	---	--	---

Тому, враховуючи можливі схемотехнічні рішення колеса-рушія (див. табл. В.1) можна зробити висновок, що найбільш доцільним є застосування восьми розсувних спиць (внутрішній кут α складає 45°) для створення універсальної конструкції МРБП для широкого спектру застосувань.

Додаток Г

**Навчальна та контрольна вибірки гібридного нейро-нечіткого
спостерігача для обчислення притискного зусилля МРБП**

Таблиця Г.1 – База експериментальних даних для навчання нейро-нечіткого СЗ МРБП

№ Виміру	Вхідні змінні та вихідна величина				
	$u_{\text{ПЕ}}$	α_1	α_2	R_B	F
1	4,2	0	0	15,51009	10,8
2	4,2	0	0,03427	15,51009	1,8
3	4,2	0	0,06859	15,51009	1,45
4	4,2	0,01032	0	15,21097	3,65
5	4,2	0,01032	0,03521	15,21097	1,4
6	4,2	0,02183	-0,03427	14,87983	2,3
7	4,2	0,02183	0	14,87983	1,8
8	4,2	0,02183	0,03427	14,87983	1,4
9	4,2	0,03274	-0,03521	14,56825	2
10	4,2	0,03274	0	14,56825	1,8
11	4,2	0,04366	-0,06859	14,25904	1,7
12	4,2	0,04366	-0,03427	14,25904	1,4
13	4,2	0,04366	0	14,25904	1,5
14	4,2	-0,01032	0,0162	15,81132	2,3
15	4,2	-0,01032	0,05142	15,81132	1,78
16	4,2	0	-0,0162	14,90974	3,45
17	4,2	0	0,01807	14,90974	2,1
18	4,2	0	0,05236	14,90974	1,4
19	4,2	0,01151	-0,01807	14,57624	1,55
20	4,2	0,01151	0,01713	14,57624	1,45
21	4,2	0,02242	-0,05142	14,26242	2,15

22	4,2	0,02242	-0,01713	14,26242	1,6
23	4,2	0,02242	0,01713	14,26242	1,25
24	4,2	0,03334	-0,05236	13,95097	1,4
25	4,2	0,03334	-0,01713	13,95097	1,5
26	4,2	-0,02183	0	16,14981	2,35
27	4,2	-0,02183	0,03427	16,14981	1,48
28	4,2	-0,02183	0,06859	16,14981	1,28
29	4,2	-0,01151	0	15,24587	1,3
30	4,2	-0,01151	0,03521	15,24587	1
31	4,2	0	-0,03427	14,24011	1,75
32	4,2	0	0	14,24011	1,45
33	4,2	0	0,03427	14,24011	1,2
34	4,2	0,01091	-0,03521	13,9238	1,3
35	4,2	0,01091	0	13,9238	1,28
36	4,2	0,02183	-0,06859	13,60986	1,3
37	4,2	0,02183	-0,03427	13,60986	1,2
38	4,2	0,02183	0	13,60986	1
39	4,2	-0,03274	0,0162	16,47322	1,5
40	4,2	-0,03274	0,05142	16,47322	1
41	4,2	-0,02242	-0,0162	15,56704	2
42	4,2	-0,02242	0,01807	15,56704	1,28
43	4,2	-0,02242	0,05236	15,56704	1
44	4,2	-0,01091	-0,01807	14,55879	1,4
45	4,2	-0,01091	0,01713	14,55879	1,2
46	4,2	0	-0,05142	13,60513	1,5
47	4,2	0	-0,01713	13,60513	1,2
48	4,2	0	0,01713	13,60513	1,15
49	4,2	0,01091	-0,05236	13,28882	1,3
50	4,2	0,01091	-0,01713	13,28882	1,15

51	4,2	-0,04366	0	16,79899	1,65
52	4,2	-0,04366	0,03427	16,79899	1,15
53	4,2	-0,04366	0,06859	16,79899	1
54	4,2	-0,03334	0	15,89057	1,45
55	4,2	-0,03334	0,03521	15,89057	1,1
56	4,2	-0,02183	-0,03427	14,87983	1,58
57	4,2	-0,02183	0	14,87983	1
58	4,2	-0,02183	0,03427	14,87983	1
59	4,2	-0,01091	-0,03521	13,9238	1,1
60	4,2	-0,01091	0	13,9238	1
61	4,2	0	-0,06859	12,97014	1,6
62	4,2	0	-0,03427	12,97014	1,15
63	4,2	0	0	12,97014	1
64	5,6	0	0,0162	15,51009	5,25
65	5,6	0	0,05142	15,51009	2,25
66	5,6	0,01032	-0,0162	15,21097	5,95
67	5,6	0,01032	0,01807	15,21097	2,5
68	5,6	0,01032	0,05236	15,21097	1,45
69	5,6	0,02183	-0,01807	14,87983	3
70	5,6	0,02183	0,01713	14,87983	2,05
71	5,6	0,03274	-0,05142	14,56825	2,6
72	5,6	0,03274	-0,01713	14,56825	2,6
73	5,6	0,03274	0,01713	14,56825	1,6
74	5,6	0,04366	-0,05236	14,25904	1,65
75	5,6	0,04366	-0,01713	14,25904	1,9
76	5,6	-0,01032	0	15,81132	7,85
77	5,6	-0,01032	0,03427	15,81132	2,1
78	5,6	-0,01032	0,06859	15,81132	1,3
79	5,6	0	0	14,90974	2,6

80	5,6	0	0,03521	14,90974	1,6
81	5,6	0,01151	-0,03427	14,57624	2,85
82	5,6	0,01151	0	14,57624	2
83	5,6	0,01151	0,03427	14,57624	1,4
84	5,6	0,02242	-0,03521	14,26242	2,65
85	5,6	0,02242	0	14,26242	1,9
86	5,6	0,03334	-0,06859	13,95097	2,3
87	5,6	0,03334	-0,03427	13,95097	1,75
88	5,6	0,03334	0	13,95097	1,38
89	5,6	-0,02183	0,0162	16,14981	2,2
90	5,6	-0,02183	0,05142	16,14981	1,55
91	5,6	-0,01151	-0,0162	15,24587	2,85
92	5,6	-0,01151	0,01807	15,24587	1,5
93	5,6	-0,01151	0,05236	15,24587	1,38
94	5,6	0	-0,01807	14,24011	1,38
95	5,6	0	0,01713	14,24011	1,35
96	5,6	0,01091	-0,05142	13,9238	2,6
97	5,6	0,01091	-0,01713	13,9238	1,35
98	5,6	0,01091	0,01713	13,9238	1
99	5,6	0,02183	-0,05236	13,60986	1,95
100	5,6	0,02183	-0,01713	13,60986	1,5
101	5,6	-0,03274	0	16,47322	2,65
102	5,6	-0,03274	0,03427	16,47322	1,85
103	5,6	-0,03274	0,06859	16,47322	1,5
104	5,6	-0,02242	0	15,56704	2
105	5,6	-0,02242	0,03521	15,56704	1,45
106	5,6	-0,01091	-0,03427	14,55879	2,2
107	5,6	-0,01091	0	14,55879	1,48
108	5,6	-0,01091	0,03427	14,55879	1,3

109	5,6	0	-0,03521	13,60513	1,5
110	5,6	0	0	13,60513	1,2
111	5,6	0,01091	-0,06859	13,28882	2
112	5,6	0,01091	-0,03427	13,28882	1,55
113	5,6	0,01091	0	13,28882	1,15
114	5,6	-0,04366	0,0162	16,79899	2
115	5,6	-0,04366	0,05142	16,79899	1,65
116	5,6	-0,03334	-0,0162	15,89057	2,25
117	5,6	-0,03334	0,01807	15,89057	1,48
118	5,6	-0,03334	0,05236	15,89057	1,35
119	5,6	-0,02183	-0,01807	14,87983	1,65
120	5,6	-0,02183	0,01713	14,87983	1,4
121	5,6	-0,01091	-0,05142	13,9238	2,05
122	5,6	-0,01091	-0,01713	13,9238	1,45
123	5,6	-0,01091	0,01713	13,9238	1,15
124	5,6	0	-0,05236	12,97014	1,75
125	5,6	0	-0,01713	12,97014	1,3
126	6,8	0	0	15,51009	19
127	6,8	0	0,03427	15,51009	4,9
128	6,8	0	0,06859	15,51009	3,2
129	6,8	0,01032	0	15,21097	6,9
130	6,8	0,01032	0,03521	15,21097	3,85
131	6,8	0,02183	-0,03427	14,87983	7,4
132	6,8	0,02183	0	14,87983	4,6
133	6,8	0,02183	0,03427	14,87983	2,45
134	6,8	0,03274	-0,03521	14,56825	3,9
135	6,8	0,03274	0	14,56825	3,2
136	6,8	0,04366	-0,06859	14,25904	4,2
137	6,8	0,04366	-0,03427	14,25904	2,2

138	6,8	0,04366	0	14,25904	2,65
139	6,8	-0,01032	0,0162	15,81132	5,5
140	6,8	-0,01032	0,05142	15,81132	3,1
141	6,8	0	-0,0162	14,90974	6,7
142	6,8	0	0,01807	14,90974	3,15
143	6,8	0	0,05236	14,90974	2,05
144	6,8	0,01151	-0,01807	14,57624	2,6
145	6,8	0,01151	0,01713	14,57624	1,5
146	6,8	0,02242	-0,05142	14,26242	4,05
147	6,8	0,02242	-0,01713	14,26242	3,05
148	6,8	0,02242	0,01713	14,26242	1,85
149	6,8	0,03334	-0,05236	13,95097	3,05
150	6,8	0,03334	-0,01713	13,95097	2,25
151	6,8	-0,02183	0	16,14981	5,1
152	6,8	-0,02183	0,03427	16,14981	2,8
153	6,8	-0,02183	0,06859	16,14981	2,05
154	6,8	-0,01151	0	15,24587	3,6
155	6,8	-0,01151	0,03521	15,24587	1,8
156	6,8	0	-0,03427	14,24011	3,75
157	6,8	0	0	14,24011	2
158	6,8	0	0,03427	14,24011	1,45
159	6,8	0,01091	-0,03521	13,9238	2,35
160	6,8	0,01091	0	13,9238	1,4
161	6,8	0,02183	-0,06859	13,60986	2,3
162	6,8	0,02183	-0,03427	13,60986	1,9
163	6,8	0,02183	0	13,60986	1,35
164	6,8	-0,03274	0,0162	16,47322	2,85
165	6,8	-0,03274	0,05142	16,47322	1,9
166	6,8	-0,02242	-0,0162	15,56704	3,3

167	6,8	-0,02242	0,01807	15,56704	1,95
168	6,8	-0,02242	0,05236	15,56704	1,3
169	6,8	-0,01091	-0,01807	14,55879	2,4
170	6,8	-0,01091	0,01713	14,55879	1,35
171	6,8	0	-0,05142	13,60513	3,1
172	6,8	0	-0,01713	13,60513	1,7
173	6,8	0	0,01713	13,60513	1,3
174	6,8	0,01091	-0,05236	13,28882	2,1
175	6,8	0,01091	-0,01713	13,28882	1,55
176	6,8	-0,04366	0	16,79899	2,6
177	6,8	-0,04366	0,03427	16,79899	1,7
178	6,8	-0,04366	0,06859	16,79899	1,25
179	6,8	-0,03334	0	15,89057	2,1
180	6,8	-0,03334	0,03521	15,89057	1,45
181	6,8	-0,02183	-0,03427	14,87983	2,25
182	6,8	-0,02183	0	14,87983	1,5
183	6,8	-0,02183	0,03427	14,87983	1,2
184	6,8	-0,01091	-0,03521	13,9238	1,95
185	6,8	-0,01091	0	13,9238	1,25
186	6,8	0	-0,06859	12,97014	2,3
187	6,8	0	-0,03427	12,97014	1,4
188	6,8	0	0	12,97014	1
189	8	0	0,0162	15,51009	9,45
190	8	0	0,05142	15,51009	5,2
191	8	0,01032	-0,0162	15,21097	8,85
192	8	0,01032	0,01807	15,21097	5,5
193	8	0,01032	0,05236	15,21097	2,5
194	8	0,02183	-0,01807	14,87983	6,75
195	8	0,02183	0,01713	14,87983	4,15

196	8	0,03274	-0,05142	14,56825	4,5
197	8	0,03274	-0,01713	14,56825	4,65
198	8	0,03274	0,01713	14,56825	3,6
199	8	0,04366	-0,05236	14,25904	3,8
200	8	0,04366	-0,01713	14,25904	3
201	8	-0,01032	0	15,81132	7,05
202	8	-0,01032	0,03427	15,81132	3,65
203	8	-0,01032	0,06859	15,81132	2,9
204	8	0	0	14,90974	4,9
205	8	0	0,03521	14,90974	2,45
206	8	0,01151	-0,03427	14,57624	6,25
207	8	0,01151	0	14,57624	2,75
208	8	0,01151	0,03427	14,57624	2,15
209	8	0,02242	-0,03521	14,26242	3,25
210	8	0,02242	0	14,26242	2,9
211	8	0,03334	-0,06859	13,95097	3,9
212	8	0,03334	-0,03427	13,95097	2,45
213	8	0,03334	0	13,95097	2,25
214	8	-0,02183	0,0162	16,14981	4,3
215	8	-0,02183	0,05142	16,14981	2,3
216	8	-0,01151	-0,0162	15,24587	6,15
217	8	-0,01151	0,01807	15,24587	2,8
218	8	-0,01151	0,05236	15,24587	1,9
219	8	0	-0,01807	14,24011	3,05
220	8	0	0,01713	14,24011	2,2
221	8	0,01091	-0,05142	13,9238	3,6
222	8	0,01091	-0,01713	13,9238	2,3
223	8	0,01091	0,01713	13,9238	1,9
224	8	0,02183	-0,05236	13,60986	2,9

225	8	0,02183	-0,01713	13,60986	2,25
226	8	-0,03274	0	16,47322	4,2
227	8	-0,03274	0,03427	16,47322	2,45
228	8	-0,03274	0,06859	16,47322	1,8
229	8	-0,02242	0	15,56704	3
230	8	-0,02242	0,03521	15,56704	1,6
231	8	-0,01091	-0,03427	14,55879	3,95
232	8	-0,01091	0	14,55879	2,15
233	8	-0,01091	0,03427	14,55879	1,6
234	8	0	-0,03521	13,60513	3,25
235	8	0	0	13,60513	1,6
236	8	0,01091	-0,06859	13,28882	2
237	8	0,01091	-0,03427	13,28882	1,6
238	8	0,01091	0	13,28882	1,4
239	8	-0,04366	0,0162	16,79899	2,35
240	8	-0,04366	0,05142	16,79899	1,8
241	8	-0,03334	-0,0162	15,89057	3
242	8	-0,03334	0,01807	15,89057	1,5
243	8	-0,03334	0,05236	15,89057	1,35
244	8	-0,02183	-0,01807	14,87983	2,05
245	8	-0,02183	0,01713	14,87983	1,5
246	8	-0,01091	-0,05142	13,9238	2,8
247	8	-0,01091	-0,01713	13,9238	1,75
248	8	-0,01091	0,01713	13,9238	1,35
249	8	0	-0,05236	12,97014	2,15
250	8	0	-0,01713	12,97014	1,55
251	9	0	0	15,51009	33,7
252	9	0	0,03427	15,51009	8,95
253	9	0	0,06859	15,51009	4,35

254	9	0,01032	0	15,21097	13,42
255	9	0,01032	0,03521	15,21097	5
256	9	0,02183	-0,03427	14,87983	6,45
257	9	0,02183	0	14,87983	6,4
258	9	0,02183	0,03427	14,87983	2,75
259	9	0,03274	-0,03521	14,56825	5,4
260	9	0,03274	0	14,56825	5,05
261	9	0,04366	-0,06859	14,25904	3,95
262	9	0,04366	-0,03427	14,25904	6
263	9	0,04366	0	14,25904	4,3
264	9	-0,01032	0,0162	15,81132	8,25
265	9	-0,01032	0,05142	15,81132	4
266	9	0	-0,0162	14,90974	11,65
267	9	0	0,01807	14,90974	3,9
268	9	0	0,05236	14,90974	2
269	9	0,01151	-0,01807	14,57624	6,1
270	9	0,01151	0,01713	14,57624	3,75
271	9	0,02242	-0,05142	14,26242	4,9
272	9	0,02242	-0,01713	14,26242	3,75
273	9	0,02242	0,01713	14,26242	2,55
274	9	0,03334	-0,05236	13,95097	3,9
275	9	0,03334	-0,01713	13,95097	2,65
276	9	-0,02183	0	16,14981	6,1
277	9	-0,02183	0,03427	16,14981	2,95
278	9	-0,02183	0,06859	16,14981	1,9
279	9	-0,01151	0	15,24587	4,35
280	9	-0,01151	0,03521	15,24587	1,9
281	9	0	-0,03427	14,24011	4,4
282	9	0	0	14,24011	2,85

283	9	0	0,03427	14,24011	1,85
284	9	0,01091	-0,03521	13,9238	4,8
285	9	0,01091	0	13,9238	2,25
286	9	0,02183	-0,06859	13,60986	4
287	9	0,02183	-0,03427	13,60986	2,4
288	9	0,02183	0	13,60986	1,8
289	9	-0,03274	0,0162	16,47322	3,65
290	9	-0,03274	0,05142	16,47322	2,35
291	9	-0,02242	-0,0162	15,56704	4,9
292	9	-0,02242	0,01807	15,56704	2,45
293	9	-0,02242	0,05236	15,56704	2
294	9	-0,01091	-0,01807	14,55879	3,45
295	9	-0,01091	0,01713	14,55879	2,2
296	9	0	-0,05142	13,60513	4,95
297	9	0	-0,01713	13,60513	2,5
298	9	0	0,01713	13,60513	1,8
299	9	0,01091	-0,05236	13,28882	3,65
300	9	0,01091	-0,01713	13,28882	2,05
301	9	-0,04366	0	16,79899	3,65
302	9	-0,04366	0,03427	16,79899	2,15
303	9	-0,04366	0,06859	16,79899	1,85
304	9	-0,03334	0	15,89057	2,7
305	9	-0,03334	0,03521	15,89057	2
306	9	-0,02183	-0,03427	14,87983	4,1
307	9	-0,02183	0	14,87983	2,2
308	9	-0,02183	0,03427	14,87983	1,6
309	9	-0,01091	-0,03521	13,9238	2,45
310	9	-0,01091	0	13,9238	2,05
311	9	0	-0,06859	12,97014	4

312	9	0	-0,03427	12,97014	2
313	9	0	0	12,97014	1,6

Таблиця Г.2 – База експериментальних даних для контролю нейро-нечіткого СЗ МРБП

№ Виміру	Вхідні змінні та вихідна величина				
	$u_{\text{ПЕ}}$	α_1	α_2	R_B	F
1	4,2	0	0,0162	15,51009	4,1
2	4,2	0	0,05142	15,51009	1,6
3	4,2	0,01032	-0,0162	15,21097	4,1
4	4,2	0,01032	0,01807	15,21097	2,25
5	4,2	0,01032	0,05236	15,21097	1,4
6	4,2	0,02183	-0,01807	14,87983	2
7	4,2	0,02183	0,01713	14,87983	1,7
8	4,2	0,03274	-0,05142	14,56825	2,2
9	4,2	0,03274	-0,01713	14,56825	1,95
10	4,2	0,03274	0,01713	14,56825	1,5
11	4,2	0,04366	-0,05236	14,25904	1,35
12	4,2	0,04366	-0,01713	14,25904	1,3
13	4,2	-0,01032	0	15,81132	4
14	4,2	-0,01032	0,03427	15,81132	1,85
15	4,2	-0,01032	0,06859	15,81132	1,4
16	4,2	0	0	14,90974	2,9
17	4,2	0	0,03521	14,90974	1,65
18	4,2	0,01151	-0,03427	14,57624	1,65
19	4,2	0,01151	0	14,57624	1,35
20	4,2	0,01151	0,03427	14,57624	1,2
21	4,2	0,02242	-0,03521	14,26242	1,65
22	4,2	0,02242	0	14,26242	1,3

23	4,2	0,03334	-0,06859	13,95097	1,6
24	4,2	0,03334	-0,03427	13,95097	1,4
25	4,2	0,03334	0	13,95097	1,3
26	4,2	-0,02183	0,0162	16,14981	1,78
27	4,2	-0,02183	0,05142	16,14981	1,35
28	4,2	-0,01151	-0,0162	15,24587	1,5
29	4,2	-0,01151	0,01807	15,24587	1,1
30	4,2	-0,01151	0,05236	15,24587	1
31	4,2	0	-0,01807	14,24011	1,58
32	4,2	0	0,01713	14,24011	1,4
33	4,2	0,01091	-0,05142	13,9238	1,7
34	4,2	0,01091	-0,01713	13,9238	1,25
35	4,2	0,01091	0,01713	13,9238	1,1
36	4,2	0,02183	-0,05236	13,60986	1,2
37	4,2	0,02183	-0,01713	13,60986	1,1
38	4,2	-0,03274	0	16,47322	1,95
39	4,2	-0,03274	0,03427	16,47322	1,2
40	4,2	-0,03274	0,06859	16,47322	1
41	4,2	-0,02242	0	15,56704	1,35
42	4,2	-0,02242	0,03521	15,56704	1,15
43	4,2	-0,01091	-0,03427	14,55879	1,75
44	4,2	-0,01091	0	14,55879	1,15
45	4,2	-0,01091	0,03427	14,55879	1,05
46	4,2	0	-0,03521	13,60513	1,38
47	4,2	0	0	13,60513	1,2
48	4,2	0,01091	-0,06859	13,28882	1,5
49	4,2	0,01091	-0,03427	13,28882	1,3
50	4,2	0,01091	0	13,28882	1,15
51	4,2	-0,04366	0,0162	16,79899	1,38

52	4,2	-0,04366	0,05142	16,79899	1
53	4,2	-0,03334	-0,0162	15,89057	1,6
54	4,2	-0,03334	0,01807	15,89057	1,28
55	4,2	-0,03334	0,05236	15,89057	1
56	4,2	-0,02183	-0,01807	14,87983	1,1
57	4,2	-0,02183	0,01713	14,87983	1
58	4,2	-0,01091	-0,05142	13,9238	1,4
59	4,2	-0,01091	-0,01713	13,9238	1
60	4,2	-0,01091	0,01713	13,9238	1
61	4,2	0	-0,05236	12,97014	1,25
62	4,2	0	-0,01713	12,97014	1
63	5,6	0	0	15,51009	14,3
64	5,6	0	0,03427	15,51009	3
65	5,6	0	0,06859	15,51009	2,2
66	5,6	0,01032	0	15,21097	5
67	5,6	0,01032	0,03521	15,21097	2,3
68	5,6	0,02183	-0,03427	14,87983	2,75
69	5,6	0,02183	0	14,87983	2,05
70	5,6	0,02183	0,03427	14,87983	1,4
71	5,6	0,03274	-0,03521	14,56825	2
72	5,6	0,03274	0	14,56825	2,58
73	5,6	0,04366	-0,06859	14,25904	1,95
74	5,6	0,04366	-0,03427	14,25904	2,25
75	5,6	0,04366	0	14,25904	1,65
76	5,6	-0,01032	0,0162	15,81132	3,9
77	5,6	-0,01032	0,05142	15,81132	1,45
78	5,6	0	-0,0162	14,90974	5,18
79	5,6	0	0,01807	14,90974	2,05
80	5,6	0	0,05236	14,90974	1,5

81	5,6	0,01151	-0,01807	14,57624	2,15
82	5,6	0,01151	0,01713	14,57624	1,6
83	5,6	0,02242	-0,05142	14,26242	3,1
84	5,6	0,02242	-0,01713	14,26242	2,35
85	5,6	0,02242	0,01713	14,26242	1,5
86	5,6	0,03334	-0,05236	13,95097	2,1
87	5,6	0,03334	-0,01713	13,95097	1,8
88	5,6	-0,02183	0	16,14981	3,65
89	5,6	-0,02183	0,03427	16,14981	1,65
90	5,6	-0,02183	0,06859	16,14981	1,35
91	5,6	-0,01151	0	15,24587	1,85
92	5,6	-0,01151	0,03521	15,24587	1,5
93	5,6	0	-0,03427	14,24011	3,2
94	5,6	0	0	14,24011	1,5
95	5,6	0	0,03427	14,24011	1,35
96	5,6	0,01091	-0,03521	13,9238	1,6
97	5,6	0,01091	0	13,9238	1,4
98	5,6	0,02183	-0,06859	13,60986	2
99	5,6	0,02183	-0,03427	13,60986	1,7
100	5,6	0,02183	0	13,60986	1,38
101	5,6	-0,03274	0,0162	16,47322	2,15
102	5,6	-0,03274	0,05142	16,47322	1,6
103	5,6	-0,02242	-0,0162	15,56704	2,15
104	5,6	-0,02242	0,01807	15,56704	1,5
105	5,6	-0,02242	0,05236	15,56704	1,3
106	5,6	-0,01091	-0,01807	14,55879	2
107	5,6	-0,01091	0,01713	14,55879	1,38
108	5,6	0	-0,05142	13,60513	2,45
109	5,6	0	-0,01713	13,60513	1,45

110	5,6	0	0,01713	13,60513	1,2
111	5,6	0,01091	-0,05236	13,28882	1,65
112	5,6	0,01091	-0,01713	13,28882	1,3
113	5,6	-0,04366	0	16,79899	2,2
114	5,6	-0,04366	0,03427	16,79899	1,7
115	5,6	-0,04366	0,06859	16,79899	1,48
116	5,6	-0,03334	0	15,89057	1,85
117	5,6	-0,03334	0,03521	15,89057	1,45
118	5,6	-0,02183	-0,03427	14,87983	2,05
119	5,6	-0,02183	0	14,87983	1,4
120	5,6	-0,02183	0,03427	14,87983	1,2
121	5,6	-0,01091	-0,03521	13,9238	1,6
122	5,6	-0,01091	0	13,9238	1,3
123	5,6	0	-0,06859	12,97014	2,15
124	5,6	0	-0,03427	12,97014	1,45
125	5,6	0	0	12,97014	1,2
126	6,8	0	0,0162	15,51009	8,6
127	6,8	0	0,05142	15,51009	4,25
128	6,8	0,01032	-0,0162	15,21097	8,4
129	6,8	0,01032	0,01807	15,21097	4,35
130	6,8	0,01032	0,05236	15,21097	2,5
131	6,8	0,02183	-0,01807	14,87983	5
132	6,8	0,02183	0,01713	14,87983	3,7
133	6,8	0,03274	-0,05142	14,56825	5,05
134	6,8	0,03274	-0,01713	14,56825	3,15
135	6,8	0,03274	0,01713	14,56825	3
136	6,8	0,04366	-0,05236	14,25904	3,75
137	6,8	0,04366	-0,01713	14,25904	1,85
138	6,8	-0,01032	0	15,81132	7,5

139	6,8	-0,01032	0,03427	15,81132	3,75
140	6,8	-0,01032	0,06859	15,81132	2,45
141	6,8	0	0	14,90974	5,8
142	6,8	0	0,03521	14,90974	2,2
143	6,8	0,01151	-0,03427	14,57624	4
144	6,8	0,01151	0	14,57624	1,7
145	6,8	0,01151	0,03427	14,57624	1,7
146	6,8	0,02242	-0,03521	14,26242	2,65
147	6,8	0,02242	0	14,26242	2,65
148	6,8	0,03334	-0,06859	13,95097	3,35
149	6,8	0,03334	-0,03427	13,95097	2,8
150	6,8	0,03334	0	13,95097	1,85
151	6,8	-0,02183	0,0162	16,14981	3,6
152	6,8	-0,02183	0,05142	16,14981	2,25
153	6,8	-0,01151	-0,0162	15,24587	4,45
154	6,8	-0,01151	0,01807	15,24587	2,5
155	6,8	-0,01151	0,05236	15,24587	1,5
156	6,8	0	-0,01807	14,24011	2,19
157	6,8	0	0,01713	14,24011	1,65
158	6,8	0,01091	-0,05142	13,9238	3,25
159	6,8	0,01091	-0,01713	13,9238	2
160	6,8	0,01091	0,01713	13,9238	1,2
161	6,8	0,02183	-0,05236	13,60986	2,15
162	6,8	0,02183	-0,01713	13,60986	1,45
163	6,8	-0,03274	0	16,47322	3,2
164	6,8	-0,03274	0,03427	16,47322	2
165	6,8	-0,03274	0,06859	16,47322	1,45
166	6,8	-0,02242	0	15,56704	2,15
167	6,8	-0,02242	0,03521	15,56704	1,6

168	6,8	-0,01091	-0,03427	14,55879	3,3
169	6,8	-0,01091	0	14,55879	1,8
170	6,8	-0,01091	0,03427	14,55879	1,4
171	6,8	0	-0,03521	13,60513	2,1
172	6,8	0	0	13,60513	1,35
173	6,8	0,01091	-0,06859	13,28882	2,15
174	6,8	0,01091	-0,03427	13,28882	1,8
175	6,8	0,01091	0	13,28882	1,5
176	6,8	-0,04366	0,0162	16,79899	2,35
177	6,8	-0,04366	0,05142	16,79899	1,6
178	6,8	-0,03334	-0,0162	15,89057	2,4
179	6,8	-0,03334	0,01807	15,89057	1,6
180	6,8	-0,03334	0,05236	15,89057	1,3
181	6,8	-0,02183	-0,01807	14,87983	2,05
182	6,8	-0,02183	0,01713	14,87983	1,25
183	6,8	-0,01091	-0,05142	13,9238	2,2
184	6,8	-0,01091	-0,01713	13,9238	1,35
185	6,8	-0,01091	0,01713	13,9238	1
186	6,8	0	-0,05236	12,97014	1,8
187	6,8	0	-0,01713	12,97014	1,28
188	8	0	0	15,51009	22,35
189	8	0	0,03427	15,51009	5,5
190	8	0	0,06859	15,51009	3,4
191	8	0,01032	0	15,21097	9,1
192	8	0,01032	0,03521	15,21097	4,8
193	8	0,02183	-0,03427	14,87983	6,15
194	8	0,02183	0	14,87983	4,5
195	8	0,02183	0,03427	14,87983	3,5
196	8	0,03274	-0,03521	14,56825	4,3

197	8	0,03274	0	14,56825	3,95
198	8	0,04366	-0,06859	14,25904	5,29
199	8	0,04366	-0,03427	14,25904	2,85
200	8	0,04366	0	14,25904	2,5
201	8	-0,01032	0,0162	15,81132	6,15
202	8	-0,01032	0,05142	15,81132	3
203	8	0	-0,0162	14,90974	8,35
204	8	0	0,01807	14,90974	2,5
205	8	0	0,05236	14,90974	2,3
206	8	0,01151	-0,01807	14,57624	4,3
207	8	0,01151	0,01713	14,57624	2,58
208	8	0,02242	-0,05142	14,26242	5,25
209	8	0,02242	-0,01713	14,26242	3,15
210	8	0,02242	0,01713	14,26242	1,85
211	8	0,03334	-0,05236	13,95097	3
212	8	0,03334	-0,01713	13,95097	2,3
213	8	-0,02183	0	16,14981	6,9
214	8	-0,02183	0,03427	16,14981	3,25
215	8	-0,02183	0,06859	16,14981	1,85
216	8	-0,01151	0	15,24587	3,5
217	8	-0,01151	0,03521	15,24587	2,15
218	8	0	-0,03427	14,24011	5
219	8	0	0	14,24011	2,65
220	8	0	0,03427	14,24011	1,7
221	8	0,01091	-0,03521	13,9238	2,95
222	8	0,01091	0	13,9238	2
223	8	0,02183	-0,06859	13,60986	3,15
224	8	0,02183	-0,03427	13,60986	2,9
225	8	0,02183	0	13,60986	2

226	8	-0,03274	0,0162	16,47322	3,9
227	8	-0,03274	0,05142	16,47322	1,85
228	8	-0,02242	-0,0162	15,56704	4,15
229	8	-0,02242	0,01807	15,56704	2,3
230	8	-0,02242	0,05236	15,56704	1,35
231	8	-0,01091	-0,01807	14,55879	2,8
232	8	-0,01091	0,01713	14,55879	1,7
233	8	0	-0,05142	13,60513	3,55
234	8	0	-0,01713	13,60513	2,15
235	8	0	0,01713	13,60513	1,8
236	8	0,01091	-0,05236	13,28882	1,9
237	8	0,01091	-0,01713	13,28882	1,5
238	8	-0,04366	0	16,79899	3,1
239	8	-0,04366	0,03427	16,79899	1,9
240	8	-0,04366	0,06859	16,79899	1,5
241	8	-0,03334	0	15,89057	2,48
242	8	-0,03334	0,03521	15,89057	1,4
243	8	-0,02183	-0,03427	14,87983	2,95
244	8	-0,02183	0	14,87983	1,6
245	8	-0,02183	0,03427	14,87983	1,3
246	8	-0,01091	-0,03521	13,9238	2,05
247	8	-0,01091	0	13,9238	1,45
248	8	0	-0,06859	12,97014	2,8
249	8	0	-0,03427	12,97014	1,85
250	8	0	0	12,97014	1,4
251	9	0	0,0162	15,51009	13,4
252	9	0	0,05142	15,51009	6,03
253	9	0,01032	-0,0162	15,21097	14,8
254	9	0,01032	0,01807	15,21097	7,09

255	9	0,01032	0,05236	15,21097	3,6
256	9	0,02183	-0,01807	14,87983	6,3
257	9	0,02183	0,01713	14,87983	4,35
258	9	0,03274	-0,05142	14,56825	5,45
259	9	0,03274	-0,01713	14,56825	5,35
260	9	0,03274	0,01713	14,56825	2,95
261	9	0,04366	-0,05236	14,25904	3,6
262	9	0,04366	-0,01713	14,25904	3,3
263	9	-0,01032	0	15,81132	12,25
264	9	-0,01032	0,03427	15,81132	4,5
265	9	-0,01032	0,06859	15,81132	3,35
266	9	0	0	14,90974	6,25
267	9	0	0,03521	14,90974	2,25
268	9	0,01151	-0,03427	14,57624	6,6
269	9	0,01151	0	14,57624	4,45
270	9	0,01151	0,03427	14,57624	2,35
271	9	0,02242	-0,03521	14,26242	4,65
272	9	0,02242	0	14,26242	2,85
273	9	0,03334	-0,06859	13,95097	4,15
274	9	0,03334	-0,03427	13,95097	3,15
275	9	0,03334	0	13,95097	2,5
276	9	-0,02183	0,0162	16,14981	4,9
277	9	-0,02183	0,05142	16,14981	2,5
278	9	-0,01151	-0,0162	15,24587	4,45
279	9	-0,01151	0,01807	15,24587	2,6
280	9	-0,01151	0,05236	15,24587	1,6
281	9	0	-0,01807	14,24011	3,75
282	9	0	0,01713	14,24011	2,58
283	9	0,01091	-0,05142	13,9238	4,45

284	9	0,01091	-0,01713	13,9238	3,05
285	9	0,01091	0,01713	13,9238	2,2
286	9	0,02183	-0,05236	13,60986	3,55
287	9	0,02183	-0,01713	13,60986	2
288	9	-0,03274	0	16,47322	5,65
289	9	-0,03274	0,03427	16,47322	3,05
290	9	-0,03274	0,06859	16,47322	2,05
291	9	-0,02242	0	15,56704	3,2
292	9	-0,02242	0,03521	15,56704	2,3
293	9	-0,01091	-0,03427	14,55879	4,65
294	9	-0,01091	0	14,55879	2,75
295	9	-0,01091	0,03427	14,55879	1,7
296	9	0	-0,03521	13,60513	3,45
297	9	0	0	13,60513	2,15
298	9	0,01091	-0,06859	13,28882	3,85
299	9	0,01091	-0,03427	13,28882	2,3
300	9	0,01091	0	13,28882	1,85
301	9	-0,04366	0,0162	16,79899	2,75
302	9	-0,04366	0,05142	16,79899	1,9
303	9	-0,03334	-0,0162	15,89057	3,45
304	9	-0,03334	0,01807	15,89057	2,35
305	9	-0,03334	0,05236	15,89057	1,6
306	9	-0,02183	-0,01807	14,87983	2,8
307	9	-0,02183	0,01713	14,87983	1,78
308	9	-0,01091	-0,05142	13,9238	3,9
309	9	-0,01091	-0,01713	13,9238	2,15
310	9	-0,01091	0,01713	13,9238	1,68
311	9	0	-0,05236	12,97014	2,1
312	9	0	-0,01713	12,97014	1,7

Додаток Д

База правил нейро-нечіткого спостерігача притискного зусилля МРБП

Таблиця Д.1 – База правил нейро-нечіткого СЗ із функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних Гаусівського типу 2-го роду

№ Правила	Вхідні змінні та коефіцієнти правил								
	$u_{\text{ПЕ}}$	α_1	α_2	R_B	$b_{1,r}$	$b_{2,r}$	$b_{3,r}$	$b_{4,r}$	$b_{0,r}$
1	Z	S	S	Z	-1,666	-0,002	-11,189	3,195	-0,397
2	Z	S	S	S	146,252	2,971	-6,936	-46,635	34,822
3	Z	S	S	M	58,329	-155,138	-19,202	-17,581	13,888
4	Z	S	S	B	4,984	101,969	-13,138	-1,083	1,187
5	Z	S	S	VB	28,176	4,087	2,921	-7,081	6,709
6	Z	S	M	Z	-0,845	0	1,679	-0,199	-0,201
7	Z	S	M	S	28,249	1,349	7,712	-9,021	6,726
8	Z	S	M	M	12,195	-34,818	14,294	-3,699	2,904
9	Z	S	M	B	-4,349	43,387	3,417	1,316	-1,036
10	Z	S	M	VB	-0,445	0,036	38,413	0,097	-0,106
11	Z	S	B	Z	3,411	-0,001	-0,027	1,020	0,812
12	Z	S	B	S	-1,704	-0,887	-0,177	0,503	-0,406
13	Z	S	B	M	1,186	-13,679	0,696	-0,378	0,282
14	Z	S	B	B	-1,775	20,056	-7,812	0,562	-0,423
15	Z	S	B	VB	-0,166	0,011	-1,605	0,050	-0,039
16	Z	M	S	Z	-21,055	-0,005	-25,242	6,806	-5,013
17	Z	M	S	S	-24,394	-26,384	10,976	7,891	-5,808
18	Z	M	S	M	-43,633	9,126	-51,183	13,105	-10,389
19	Z	M	S	B	372,686	63,389	46,271	-103,038	88,735
20	Z	M	S	VB	3,222	-0,023	-0,004	12,579	0,767
21	Z	M	M	Z	-6,137	0,004	-31,147	2,146	-1,461
22	Z	M	M	S	-5,024	-16,374	24,742	1,628	-1,196

23	Z	M	M	M	-17,227	4,037	-37,646	5,297	-4,102
24	Z	M	M	B	41,042	8,342	-184,274	-11,317	9,772
25	Z	M	M	VB	0,996	-0,006	-0,079	3,853	0,237
26	Z	M	B	Z	24,480	-0,008	0,489	-8,403	5,829
27	Z	M	B	S	-1,233	-5,101	23,501	0,340	-0,294
28	Z	M	B	M	-1,419	8,640	-4,928	0,477	-0,338
29	Z	M	B	B	-1,192	0,772	-9,305	0,444	-0,284
30	Z	M	B	VB	0,393	-0,002	0,086	1,512	0,094
31	Z	B	S	Z	0,001	0,003	29,316	0,950	0
32	Z	B	S	S	1,232	-6,840	-18,848	-0,422	0,293
33	Z	B	S	M	10,943	10,866	-1,731	-3,268	2,605
34	Z	B	S	B	-17,333	-0,870	6,199	-38,476	-4,127
35	Z	B	S	VB	0,006	0	0	0,022	0,001
36	Z	B	M	Z	-0,215	-0,001	-22,428	-0,453	-0,051
37	Z	B	M	S	6,411	13,804	-8,846	-2,012	1,526
38	Z	B	M	M	12,809	4,969	19,245	-3,826	3,050
39	Z	B	M	B	-2,145	-0,114	-19,274	-4,553	-0,511
40	Z	B	M	VB	0,002	0	0	0,006	0
41	Z	B	B	Z	1,081	0,005	0,366	2,461	0,257
42	Z	B	B	S	-33,595	45,452	-4,578	10,420	-7,999
43	Z	B	B	M	-16,708	2,528	23,807	4,931	-3,978
44	Z	B	B	B	-0,823	-0,011	34,485	-2,681	-0,196
45	Z	B	B	VB	0,001	0	0	0,002	0
46	S	S	S	Z	-6,134	-0,001	-3,225	13,996	-1,095
47	S	S	S	S	166,848	9,265	-13,094	-69,209	29,796
48	S	S	S	M	53,673	-147,803	42,198	-20,762	9,585
49	S	S	S	B	-22,806	199,432	43,381	8,853	-4,072
50	S	S	S	VB	22,083	2,736	-0,374	-7,508	3,944
51	S	S	M	Z	1,973	-0,001	9,068	-2,043	0,352

52	S	S	M	S	10,923	-2,943	-17,090	-4,463	1,951
53	S	S	M	M	4,113	-3,979	36,200	-1,613	0,735
54	S	S	M	B	-2,651	77,960	-31,854	1,162	-0,473
55	S	S	M	VB	0,658	0,179	-8,582	-0,153	0,118
56	S	S	B	Z	-9,587	0,001	2,749	10,721	-1,712
57	S	S	B	S	11,326	8,631	26,674	-4,757	2,023
58	S	S	B	M	-0,883	-2,127	2,006	0,338	-0,158
59	S	S	B	B	-0,632	2,281	-9,942	0,288	-0,113
60	S	S	B	VB	0,566	0,065	-7,328	-0,135	0,101
61	S	M	S	Z	-89,444	-0,068	-31,542	38,462	-15,972
62	S	M	S	S	-46,337	-88,580	11,224	19,469	-8,275
63	S	M	S	M	-74,986	15,402	19,567	29,856	-13,391
64	S	M	S	B	260,101	39,591	94,584	-90,433	46,451
65	S	M	S	VB	6,143	-0,028	-0,005	17,831	1,097
66	S	M	M	Z	21,105	0,013	-32,017	-9,297	3,769
67	S	M	M	S	7,239	34,279	77,836	-3,012	1,293
68	S	M	M	M	-1,205	5,155	-22,459	0,470	-0,215
69	S	M	M	B	-20,097	-1,756	-103,990	7,674	-3,588
70	S	M	M	VB	1,930	-0,007	-0,109	5,560	0,345
71	S	M	B	Z	-104,734	-0,057	26,101	46,284	-18,702
72	S	M	B	S	-28,597	-71,999	-12,988	11,667	-5,107
73	S	M	B	M	0,605	-4,588	-28,460	-0,103	0,108
74	S	M	B	B	10,362	1,330	-15,910	-3,685	1,850
75	S	M	B	VB	0,097	-0,001	0,091	0,283	0,017
76	S	B	S	Z	-0,648	0,018	15,587	2,062	-0,116
77	S	B	S	S	10,497	26,290	-11,948	-4,383	1,875
78	S	B	S	M	31,332	13,450	-145,744	-12,890	5,595
79	S	B	S	B	-28,309	-0,572	14,117	-61,540	-5,055
80	S	B	S	VB	0,010	0	0	0,029	0,002

81	S	B	M	Z	0,495	-0,002	-28,686	0,360	0,088
82	S	B	M	S	-8,478	-32,767	-37,693	3,597	-1,514
83	S	B	M	M	6,537	-3,120	-41,688	-2,322	1,167
84	S	B	M	B	2,921	0,028	-35,386	7,276	0,522
85	S	B	M	VB	0,003	0	0	0,008	0,001
86	S	B	B	Z	-2,503	0,009	0,811	-1,955	-0,447
87	S	B	B	S	27,629	-2,095	25,969	-11,299	4,933
88	S	B	B	M	-23,369	-2,791	9,957	9,037	-4,173
89	S	B	B	B	-0,678	-0,018	-3,550	-1,343	-0,121
90	S	B	B	VB	0	0	0	0	0
91	M	S	S	Z	-0,636	-0,001	-46,156	6,720	-0,095
92	M	S	S	S	154,938	5,970	57,353	-76,962	22,823
93	M	S	S	M	53,336	-145,826	-6,989	-24,996	7,856
94	M	S	S	B	-8,157	311,397	24,794	4,476	-1,205
95	M	S	S	VB	11,337	1,747	-6,482	-5,213	1,672
96	M	S	M	Z	-3,486	0	12,974	3,094	-0,512
97	M	S	M	S	29,442	-0,091	19,636	-14,724	4,332
98	M	S	M	M	10,100	-3,373	-14,526	-4,693	1,486
99	M	S	M	B	-8,012	159,187	-1,991	3,851	-1,179
100	M	S	M	VB	3,102	0,527	-104,440	-1,057	0,456
101	M	S	B	Z	15,527	-0,001	-0,172	3,724	2,281
102	M	S	B	S	-45,200	2,440	-73,013	22,508	-6,645
103	M	S	B	M	-6,980	-45,864	-14,164	3,238	-1,027
104	M	S	B	B	-3,781	51,606	-17,896	1,833	-0,556
105	M	S	B	VB	1,678	0,236	-17,265	-0,607	0,247
106	M	M	S	Z	-28,241	-0,030	-26,366	14,277	-4,173
107	M	M	S	S	-29,287	-75,461	17,631	14,916	-4,317
108	M	M	S	M	-35,636	-2,245	-237,946	16,357	-5,258
109	M	M	S	B	609,612	69,284	56,084	-266,583	89,708

110	M	M	S	VB	11,979	-0,046	-0,007	28,684	1,763
111	M	M	M	Z	-34,943	-0,008	2,166	18,654	-5,134
112	M	M	M	S	-8,991	23,315	34,722	4,438	-1,321
113	M	M	M	M	-33,206	-7,375	-168,818	15,936	-4,884
114	M	M	M	B	26,114	3,227	-287,317	-10,781	3,836
115	M	M	M	VB	5,048	-0,017	-0,159	12,007	0,743
116	M	M	B	Z	92,884	-0,057	0,218	-51,690	13,636
117	M	M	B	S	15,262	-95,333	-37,495	-7,363	2,238
118	M	M	B	M	6,886	19,589	-15,118	-3,075	1,013
119	M	M	B	B	-3,449	2,717	-54,168	1,908	-0,505
120	M	M	B	VB	1,639	-0,005	0,029	3,897	0,241
121	M	B	S	Z	0,668	0,010	98,814	2,402	0,098
122	M	B	S	S	-1,888	79,100	-13,528	0,862	-0,275
123	M	B	S	M	-37,787	17,666	-32,463	18,186	-5,550
124	M	B	S	B	-36,617	-0,963	8,774	-55,396	-5,391
125	M	B	S	VB	0,019	0	0	0,046	0,003
126	M	B	M	Z	-1,219	0	-69,592	-1,285	-0,179
127	M	B	M	S	6,642	-77,455	52,128	-2,952	0,975
128	M	B	M	M	11,583	-5,037	11,229	-5,411	1,705
129	M	B	M	B	-7,115	-0,056	-23,219	-14,564	-1,046
130	M	B	M	VB	0,008	0	0	0,018	0,001
131	M	B	B	Z	7,833	0,034	1,153	13,129	1,151
132	M	B	B	S	-95,740	260,212	-112,196	46,191	-14,073
133	M	B	B	M	-43,032	24,282	-376,367	21,007	-6,334
134	M	B	B	B	1,234	-0,031	-9,392	3,783	0,181
135	M	B	B	VB	0,002	0	0	0,006	0
136	B	S	S	Z	-0,301	-0,001	-27,872	15,010	-0,038
137	B	S	S	S	219,174	8,143	-32,211	-127,713	27,420
138	B	S	S	M	60,688	-177,381	60,922	-32,846	7,594

139	B	S	S	B	-20,691	446,805	81,422	11,909	-2,588
140	B	S	S	VB	-31,693	-1,571	1,918	15,852	-3,960
141	B	S	M	Z	0,566	0	-25,971	0,794	0,070
142	B	S	M	S	-7,480	0,037	7,744	4,399	-0,930
143	B	S	M	M	-0,150	-4,239	73,012	0,027	-0,017
144	B	S	M	B	-7,432	244,823	-30,650	4,334	-0,930
145	B	S	M	VB	15,299	1,611	16,320	-7,341	1,913
146	B	S	B	Z	-4,634	0	2,995	-0,340	-0,577
147	B	S	B	S	6,760	-3,194	28,979	-4,058	0,838
148	B	S	B	M	1,075	33,784	6,166	-0,546	0,133
149	B	S	B	B	-2,936	57,745	-20,468	1,704	-0,368
150	B	S	B	VB	1,596	0,209	-11,207	-0,694	0,200
151	B	M	S	Z	-60,191	-0,070	-38,941	35,924	-7,528
152	B	M	S	S	-41,652	-91,646	92,262	24,921	-5,211
153	B	M	S	M	-70,997	-33,479	-179,236	39,379	-8,880
154	B	M	S	B	1018,328	101,593	109,349	-525,970	127,385
155	B	M	S	VB	20,436	-0,067	-0,009	41,601	2,556
156	B	M	M	Z	0,501	-0,006	-27,448	-0,395	0,057
157	B	M	M	S	0,345	-0,458	24,807	-0,294	0,042
158	B	M	M	M	-2,791	0,530	-135,432	1,720	-0,354
159	B	M	M	B	-19,529	-0,872	-554,013	11,053	-2,437
160	B	M	M	VB	8,857	-0,024	-0,210	17,888	1,108
161	B	M	B	Z	-27,868	0,017	22,706	18,002	-3,468
162	B	M	B	S	-6,765	68,360	-227,284	4,489	-0,843
163	B	M	B	M	-5,565	-12,725	-60,547	3,316	-0,695
164	B	M	B	B	2,453	-1,913	-63,891	-0,828	0,306
165	B	M	B	VB	2,079	-0,006	-0,260	4,199	0,260
166	B	B	S	Z	0,982	0,021	69,939	3,850	0,123
167	B	B	S	S	3,191	70,347	-59,795	-2,094	0,399

168	B	B	S	M	31,279	30,886	-288,212	-18,305	3,904
169	B	B	S	B	-90,271	-1,455	23,889	-132,543	-11,289
170	B	B	S	VB	0,033	0	0	0,067	0,004
171	B	B	M	Z	0,238	0,002	-37,555	0,430	0,030
172	B	B	M	S	-0,237	1,012	49,489	0,367	-0,029
173	B	B	M	M	-15,207	-0,034	-266,572	8,811	-1,899
174	B	B	M	B	8,495	0,022	-60,637	15,844	1,061
175	B	B	M	VB	0,013	0	0	0,027	0,002
176	B	B	B	Z	-1,786	-0,008	0,890	-2,330	-0,222
177	B	B	B	S	-18,708	-138,629	-46,826	10,445	-2,354
178	B	B	B	M	9,569	-14,010	-252,446	-4,386	1,189
179	B	B	B	B	1,063	0,024	-79,108	1,314	0,133
180	B	B	B	VB	0,003	0	0	0,006	0
181	VB	S	S	Z	3,847	-0,004	-226,682	-4,245	0,427
182	VB	S	S	S	537,032	7,437	-65,103	-351,587	59,692
183	VB	S	S	M	152,295	-409,011	-112,458	-93,866	16,928
184	VB	S	S	B	28,508	168,150	-10,527	-15,649	3,166
185	VB	S	S	VB	71,948	6,022	4,094	-38,154	7,991
186	VB	S	M	Z	2,476	0	-42,960	-4,182	0,275
187	VB	S	M	S	-28,559	-0,245	86,597	18,815	-3,174
188	VB	S	M	M	-8,998	-4,740	-16,390	5,605	-1,000
189	VB	S	M	B	-12,229	205,771	9,343	7,509	-1,360
190	VB	S	M	VB	1,572	0,427	55,002	-0,827	0,176
191	VB	S	B	Z	-4,090	0,002	-1,265	4,177	-0,455
192	VB	S	B	S	-19,733	11,736	2,278	12,486	-2,192
193	VB	S	B	M	-1,710	-56,294	6,739	0,987	-0,190
194	VB	S	B	B	-0,339	39,461	-10,263	0,355	-0,038
195	VB	S	B	VB	3,200	0,313	-13,602	-1,639	0,356
196	VB	M	S	Z	41,065	0,042	-80,659	-29,054	4,557

197	VB	M	S	S	-59,758	-133,900	-73,495	39,279	-6,644
198	VB	M	S	M	-104,474	89,066	-101,475	65,116	-11,615
199	VB	M	S	B	900,585	101,862	265,153	-515,927	100,167
200	VB	M	S	VB	10,908	-0,036	-0,006	19,897	1,214
201	VB	M	M	Z	31,789	0,013	-24,123	-21,896	3,532
202	VB	M	M	S	3,409	-12,213	-85,897	-2,101	0,379
203	VB	M	M	M	1,406	1,925	-149,819	-0,542	0,156
204	VB	M	M	B	-33,998	-2,073	-482,570	20,693	-3,779
205	VB	M	M	VB	8,330	-0,020	-0,119	14,955	0,926
206	VB	M	B	Z	-41,782	-0,022	-18,731	28,894	-4,645
207	VB	M	B	S	1,677	-173,347	-142,287	-0,658	0,186
208	VB	M	B	M	5,669	12,910	-43,816	-3,240	0,629
209	VB	M	B	B	1,926	4,001	-134,207	-0,346	0,214
210	VB	M	B	VB	1,695	-0,004	0,054	3,052	0,189
211	VB	B	S	Z	3,354	-0,001	201,439	3,614	0,373
212	VB	B	S	S	19,013	216,880	-23,750	-12,837	2,113
213	VB	B	S	M	62,263	40,680	-37,130	-38,811	6,921
214	VB	B	S	B	-104,887	-1,445	33,673	-138,190	-11,663
215	VB	B	S	VB	0,019	0	0	0,035	0,002
216	VB	B	M	Z	0,948	-0,002	187,818	0,475	0,105
217	VB	B	M	S	-14,000	49,507	-171,518	8,849	-1,556
218	VB	B	M	M	-7,970	5,477	-12,199	5,325	-0,887
219	VB	B	M	B	13,187	0,042	-84,424	21,525	1,466
220	VB	B	M	VB	0,012	0	0	0,022	0,001
221	VB	B	B	Z	-1,251	0,004	-3,637	-0,596	-0,139
222	VB	B	B	S	54,101	250,081	-249,953	-33,600	6,009
223	VB	B	B	M	-25,822	25,760	4,018	15,835	-2,868
224	VB	B	B	B	2,083	-0,046	-48,487	5,044	0,232
225	VB	B	B	VB	0,003	0	0	0,005	0

Додаток Е

Система контролю і керування притискним зусиллям з магніто-індуктивним спостерігачем на основі теорії поля

На рисунку Е.1 представлена схема магнітно-керованого колеса-рушія мобільного робота, зокрема одна з двох його частин, які симетричні вертикальній осі. Принцип роботи такого рушія викладений в розд. 2.1.2, тому тут доцільно приділити увагу основним компонентам системи контролю і керування ПЗ МРБП, зокрема багатоканальному блоку керування (ББК), який безпосередньо здійснює перемикання обмоток ПЕ та тягового приводу розсувних спиць, та СЗ ПЕ, який ідентифікує поточне ПЗ.

Обмотки ПЕ підключені до відповідних виходів $\{...I_m, I_n, I_r, ...\}$ першої групи ББК (кількість виходів першої групи ББК відповідає загальній кількості розміщених на колесі-рушії ПЕ). Обмотки тягового електроприводу розсувних спиць підключені до відповідних виходів $\{...II_m, II_n, II_r, ...\}$ другої групи ББК (кількість виходів другої групи ББК відповідає загальній кількості розміщених на колесі-рушії рухомих елементів розсувних спиць). Кожний ПЕ оснащений пружною ізоляційною накладкою (ІН), закріпленою на притискній поверхні ПЕ, та сенсорною системою з, принаймні, п'яти датчиків магнітного поля (ДМП) (рисунок Е.2). Один з датчиків магнітного поля закріплений в геометричному центрі, а інші датчики – в периферійній зоні притискної поверхні, причому ДМП кожного відповідного ПЕ розташовані між його притискною поверхнею та пружною ізоляційною накладкою [17, 18].

На рисунку Е.3 представлена схема багатоканального блоку керування. Виходи датчиків магнітного поля кожного ПЕ підключені до відповідного багатовходового обчислювального блоку БОБ1, БОБ2, БОБ3, ..., або БОБ $_k$, що служить для розрахунку поточного значення ПЗ кожного ПЕ (спостерігач зусилля). Сигнали $U_{s1}, U_{s2}, ..., U_{sk}$ з виходу кожного БОБу поступають на інвертовані входи відповідних суматорів. На прямі входи суматорів подаються

сигнали, рівні значенню опорної напруги U_b з джерела опорної напруги ДОН, яке відповідає заданому значенню ПЗ. Включення в роботу того чи іншого суматора визначається замиканням керованих ключів КК1, КК2, КК3, ..., або КК k за керуючими сигналами U_{a1} , U_{a2} , ..., U_{ak} з першої групи виходів блоку керування. Таким чином, на виході відповідних керованих ключів формуються сигнали U_{g1} , U_{g2} , ..., U_{gk} .

На рисунку Е.4 представлені часові діаграми формування сигналів $U_{gi}(t)$ ($i = 1, 2, \dots, k$, де k – загальна кількість ПЕ, для прикладу взято 12 ПЕ), які відповідають заданому значенню ПЗ для кожного ПЕ, при здійсненні багатоетапного процесу переміщення (на прикладі 37-ми моментів часу t_i , $i = 1, 2, \dots, 37$) колеса-рушія МРБП. Після суматорів сигнали розузгодження U_{d1} , U_{d2} , ..., U_{dk} опрацьовуються відповідними регуляторами сили РС1, РС2, РС3, ..., або РС k з видачею на вихід регуляторів керуючих напруг U_{c1} , U_{c2} , ..., U_{ck} , які свідчать про необхідність зміни значення ПЗ.

В процесі руху МРБП ББК за допомогою першої групи виходів забезпечує безперервну одночасну подачу відповідних струмів регульованої величини на базі сигналів $U_{ci}(t)$ з РС, принаймні, в дві обмотки суміжних ПЕ, а за допомогою другої групи виходів – безперервну почергову подачу струму, принаймні, в одну з обмоток відповідного тягового приводу і одночасне регулювання в залежності від режиму руху величини та зміни напрямку струмів, принаймні, в трьох обмотках суміжних тягових електроприводів [18].

При технологічній зупинці мобільного робота ББК одночасно формує на виходах Π_m і Π_r (рисунок Е.1) сигнали, згідно з якими значення струмів у відповідних обмотках тягових електроприводів першої і третьої розсувних спиць встановлюються на однаковому рівні, забезпечуючи утримання колеса-рушія в нерухомому стані за рахунок зчеплення усіх трьох робочих ПЕ з ФП.

Головні принципи функціонування багатовходових обчислювальних блоків (БОБ1, ..., БОБ k на рисунку Е.3) викладені в розділі 3.4 стосовно СЗ. Розглянемо результати чисельного рішення рівнянь моделі СЗ та експериментальних досліджень ПЕ.

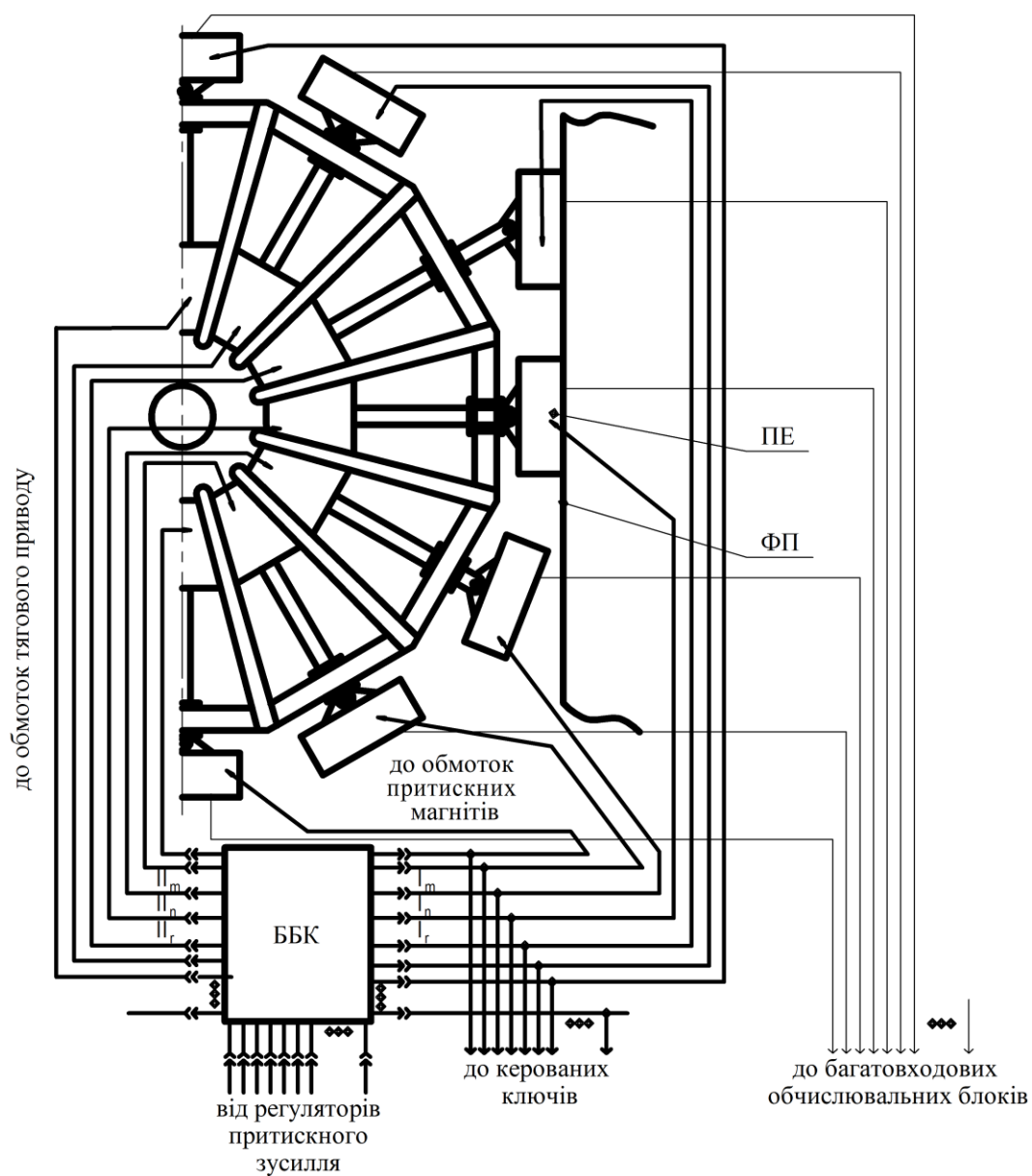


Рисунок Е.1 – Фрагмент магнітокерованого колеса-рушія

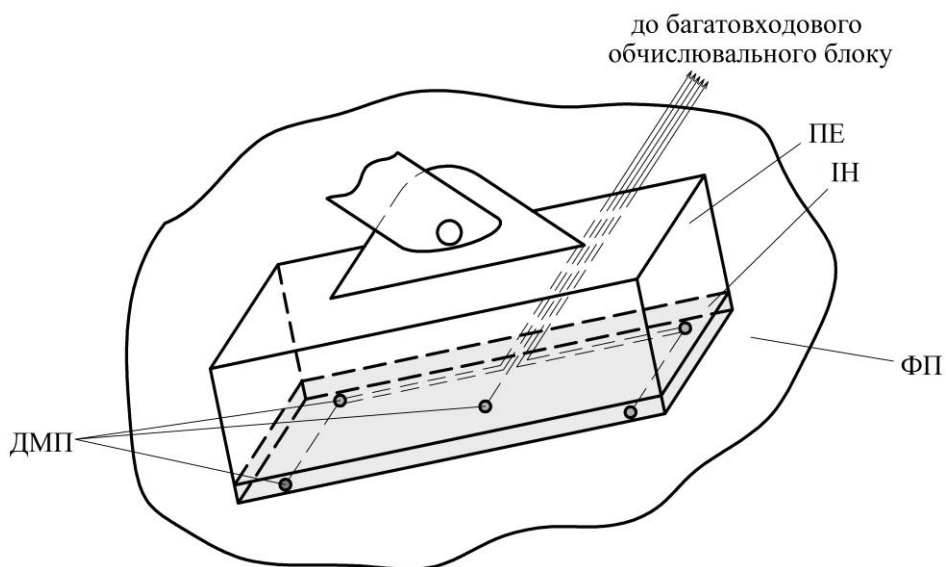


Рисунок Е.2 – Схема розміщення датчиків Хола на притискній грані магніту

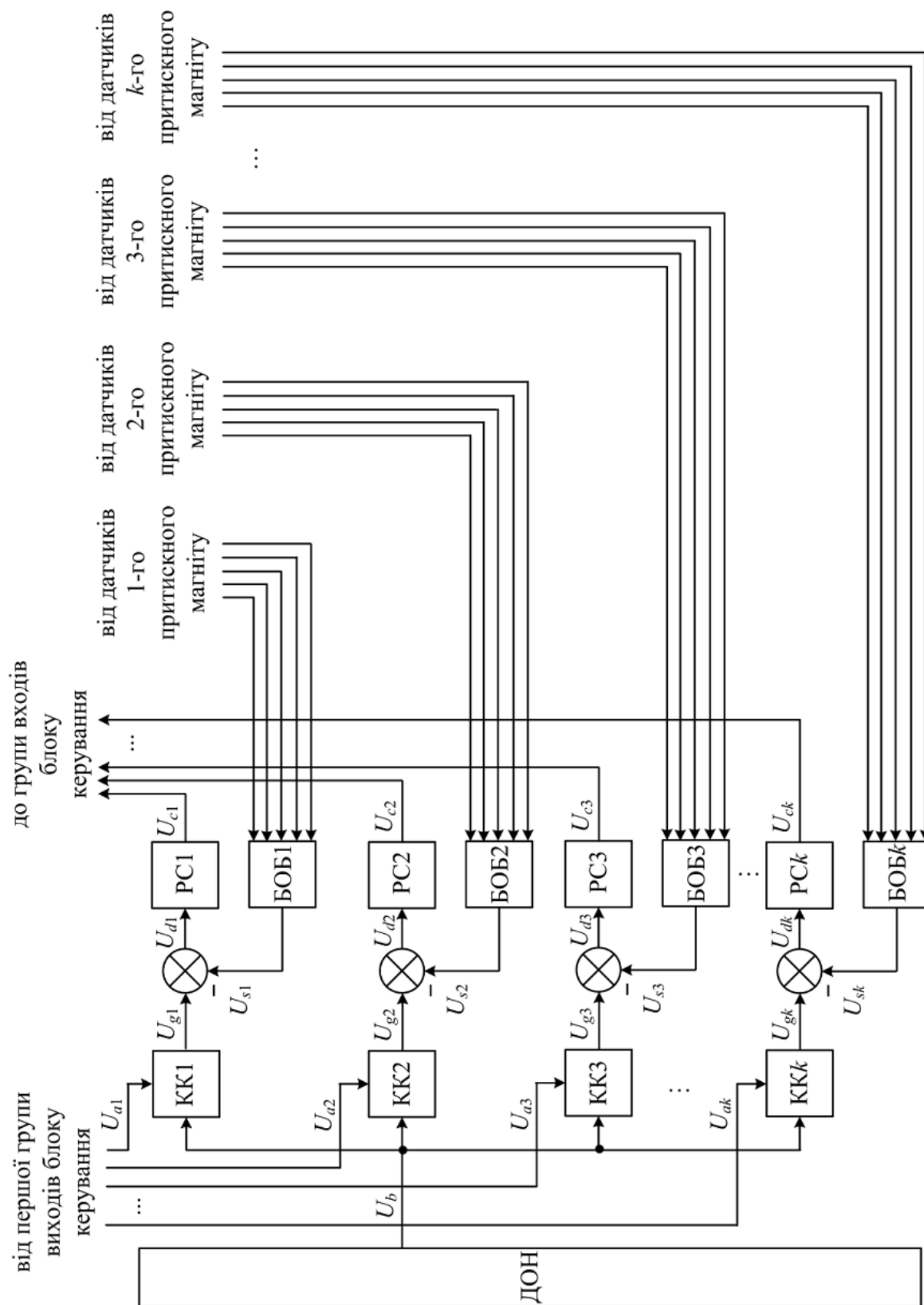


Рисунок Е.3 – Схема формування керуючих напруг відповідних ПЕ

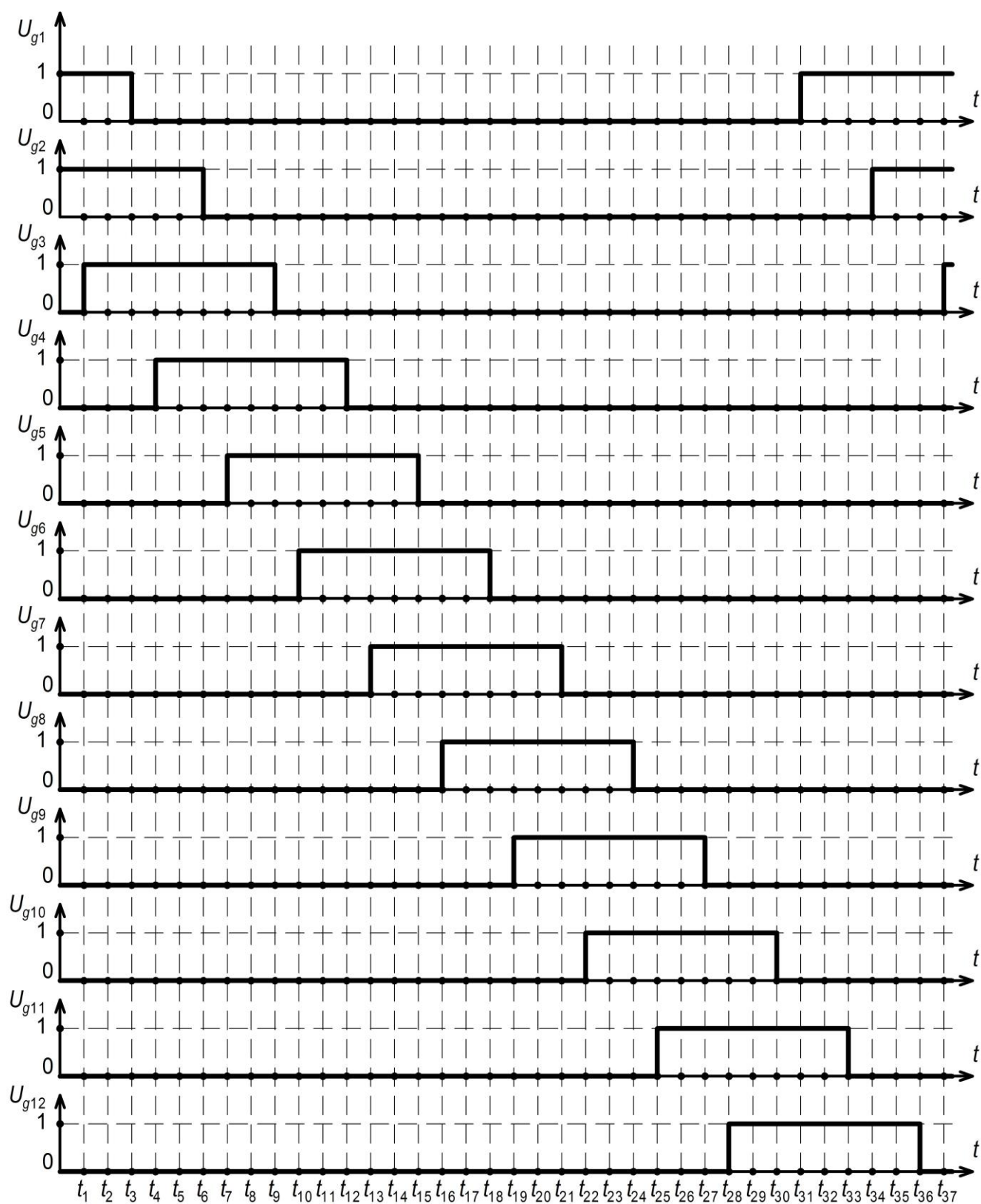


Рисунок Е.4 – Часові діаграми формування сигналів перемикання обмоток ПЕ

Відомо, що чисельні методи дозволяють отримати практично точне рішення задачі, оскільки засновані на дискретних розрахункових схемах [9, 180, 181]. В результаті оцифрування континуальна система з незліченними ступенями свободи перетворюється на систему зі скінченим числом ступенів свободи. Найбільший розвиток отримали методи скінченних елементів, скінченних різностей, скінченних об'ємів та ін [180].

Метод скінченних елементів особливо ефективний при розрахунку електромагнітних процесів машин і механізмів [182]. Ідея методу скінченних елементів полягає в тому, що функціональна мінімізація варіаційної задачі виконується на сукупності функцій, кожна з яких визначається в її підрайоні [26]. Область, в якій проводиться пошук рішення диференціальних рівнянь, ділиться на скінчене число підобластей (елементів). Форма апроксимуючої функції випадковим чином вибирається в кожному елементі (у найпростішому випадку це поліном першого ступеня). В центрі елемента апроксимуюча функція дорівнює нулю. Значення функцій на кордонах елементів (вузлів) є рішенням задачі і заздалегідь невідомі. Коефіцієнти апроксимуючих функцій найчастіше шукаються з умов рівності значень сусідніх функцій на кордонах між елементами. Після цього ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів, і формується система лінійних рівнянь. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, в яких виконується пошук вихідної системи. Вона також прямо пропорційна кількості елементів і обмежується лише можливостями обчислювальної техніки [9, 26, 28, 180].

Оскільки кожен з елементів пов'язаний з обмеженим числом сусідніх, система лінійних рівнянь має розріджений вигляд, що значно спрощує її рішення. Використання систем аналізу скінченних елементів дозволяє досліджувати об'єкти без створення їх матеріальних прототипів шляхом формування та розв'язання адекватних математичних моделей [181].

Для чисельного моделювання отриманих в розділі 3.4 рівнянь СЗ ПЕ МРБП застосована потужна система Ansoft Maxwell 13.0, яка є передовим програмним забезпеченням для розрахунку та моделювання електромагнітних

полів. Це програмне забезпечення використовується для розробки і дослідження дво- і тривимірних моделей датчиків, двигунів, трансформаторів та інших електричних і електромеханічних пристроїв для широкого спектру застосування [26]. Алгоритмічна основа Ansoft Maxwell – метод скінченних елементів, який з високою точністю розраховує статичні, гармонічні електромагнітні та електричні поля. Використання такого програмного забезпечення істотно скорочує час проектування, дає можливість оптимізувати конструкцію ПЕ відповідно до основних критеріїв [182].

Звичайно, імітація реальних умов експлуатації МРБП вимагає широкого розгляду. Робот може рухатися уздовж складної ФП з невизначеними нерівностями: неферромагнітним зазором δ між ПЕ і ФП, а також товщиною ФП $s_{\text{П}}$ (згідно рисунку 3.23), які змінюються в реальних умовах. Таким чином, необхідно визначити вплив цих параметрів (δ і $s_{\text{П}}$) на результуюче значення ПЗ, що генерується ПЕ. Товщина корпусів суден зазвичай коливається від 4 до 25 мм, а товщина росту обростання змінюється від 5 до 40 мм [9].

Розроблена імітаційна модель, що відповідає реальному ПЕ [9, 26] з наступними розмірами: $a_{\text{М}} = 50,2$ мм; $b_{\text{М}} = 31,0$ мм; $c_{\text{М}} = 10,0$ мм ($a_{\text{М}}$ – ширина, $b_{\text{М}}$ – довжина, $c_{\text{М}}$ – висота магніту). Просторове положення ПЕ може бути задано в програмі відповідно до характеру робочої поверхні (рисунок Е.5). Зокрема, перешкоди, розміщені на поверхні, викликають різні значення відстані від вершин магніту до ФП $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ (на рисунку Е.5 не показані). Відповідно, кути нахилу поверхні ПЕ до робочої ФП також можуть мати різні значення. Параметри котушки ПЕ встановлюються у вигляді кількості витків – 1080, а магніторушійної сили – 300 А; в якості матеріалу магнітопроводу вибрано вуглецеву сталь. Крім того, електромагнітні процеси моделюються при 0,5 % помилці в умовах вакууму, який схожий на повітря за своїми магнітними властивостями, а також на органічні речовини, що викликають поверхневу невизначеність (неферромагнітної природи). Результати розрахунку розподілу магнітної індукції для заданих параметрів наведені на рисунку Е.6.

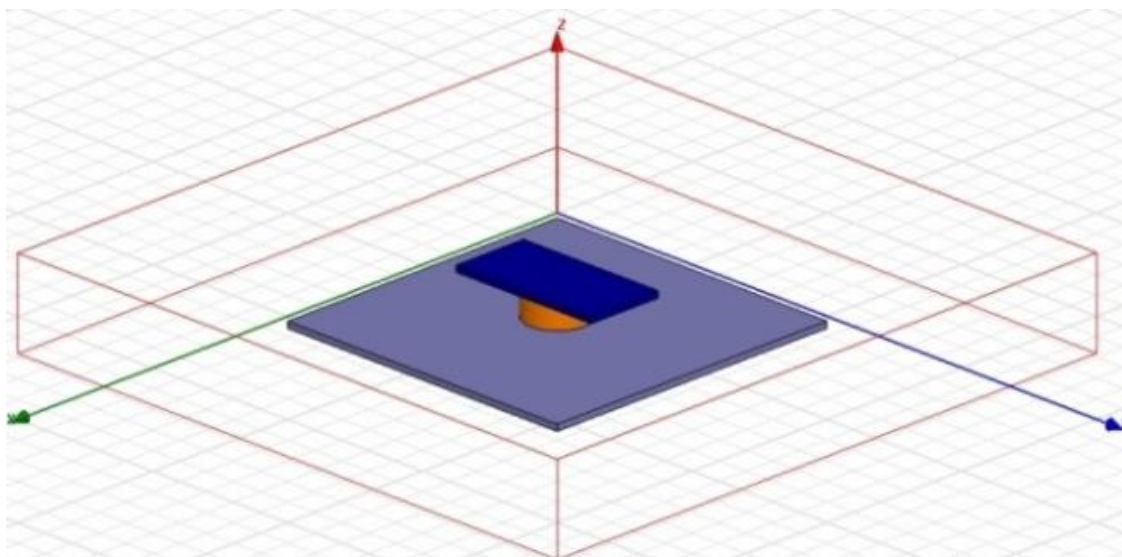
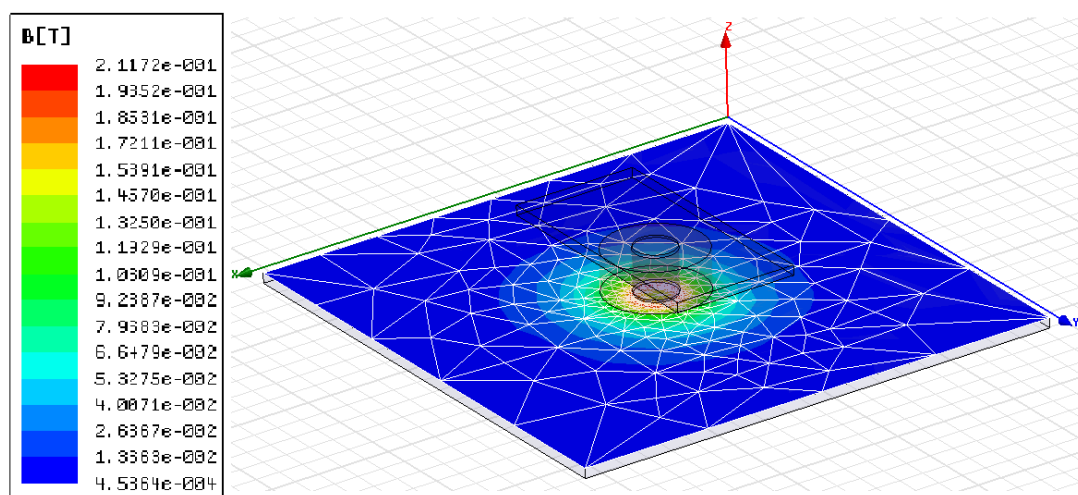
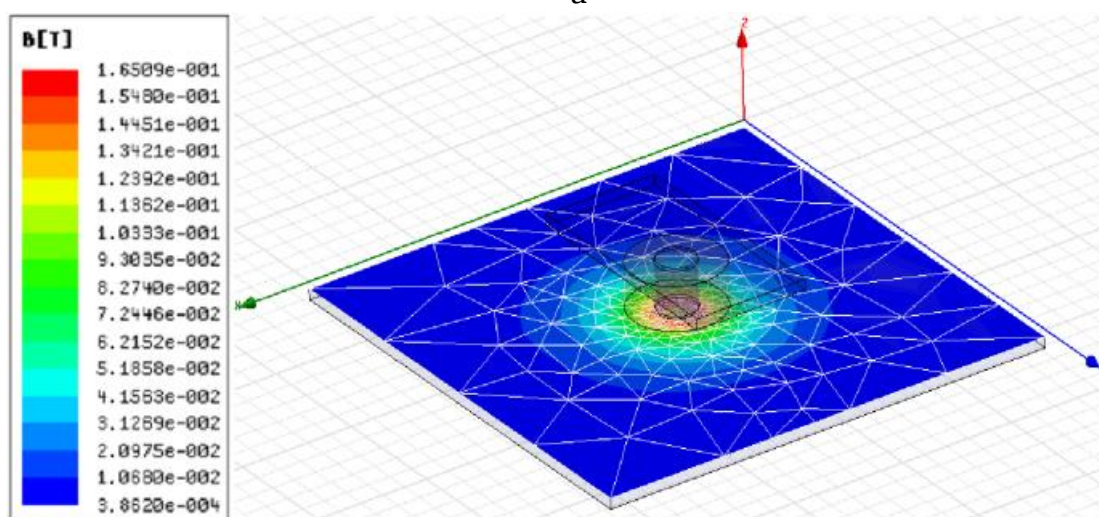


Рисунок Е.5 – Комп'ютерна модель ПЕ



а



б

Рисунок Е.6 – Приклади розрахунку магнітної індукції на ФП товщиною 4 мм при різних значеннях робочого зазору: а – 1,2 мм; б – 1,7 мм

Розрахунок розподілу магнітної індукції на феромагнітній робочій поверхні, повернутій до ПЕ робота, проведено для товщини феромагнітної пластини 4 мм, а також зазорів 1,2 і 1,7 мм (рисунок Е.6) з використанням розробленої комп'ютерної моделі. Значення магнітної індукції знаходяться в діапазоні від 0,026 до 0,212 Тл в периферії і в центрі пластини, відповідно при 1,2 мм зазору (рисунок Е.6, а) і в діапазоні від 0,021 до 0,165 Тл на периферії і в центрі пластини при 1,7 мм зазору (рисунок Е.6, б). У першому випадку ($\delta = 1,2$ мм) розрахункове значення ПЗ визначається рівнянням Максвелла [73] і складає 2,16 Н, а у другому випадку ($\delta = 1,7$ мм) – 1,51 Н, тобто менше значення у порівнянні з першим випадком.

За допомогою отриманої моделі можна визначити розподіл магнітного поля в робочому зазорі (на робочій ФП) або в будь-якому іншому поперечному перерізі магнітної системи «ПЕ-ФП». Крім того, можна розрахувати значення формованого ПЗ для статичного положення ПЕ, а, відповідно, і тягові характеристики при різних значеннях магніторушійної сили і зазору [101, 183], що спричинений невизначеністю робочої ФП неферомагнітної природи і формується за рахунок наявності забруднень, обростань і т.д. [9].

При переміщенні МРБП по складній робочій поверхні ПЕ може потрапити на частину ФП з меншою товщиною завдяки особливостям поверхні або її пошкодженням. При цьому утворюється невизначеність робочої поверхні феромагнітної природи. У цьому випадку спостерігається явище ослаблення магнітного поля і, відповідно, ПЗ. Приклад розрахунку розподілу магнітного поля зі зворотного боку феромагнітної пластини шляхом зміни її товщини при постійному значенні зазору наведено на рисунку Е.7 (з вбудованою сіткою скінченних елементів) [9].

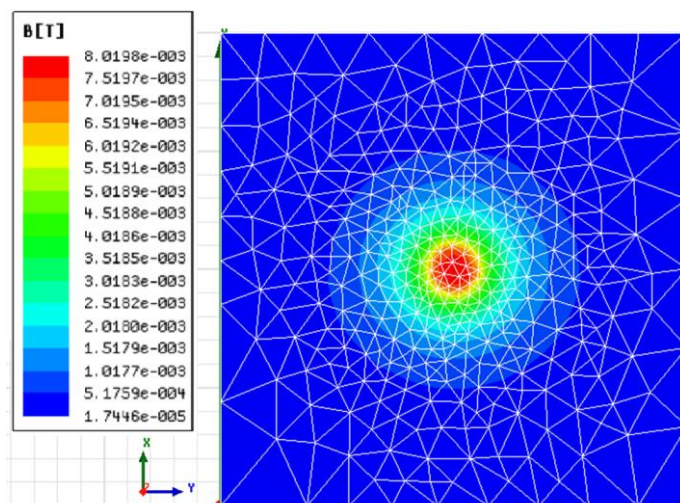
Слід зазначити, що існує два аспекти проблеми розбиття на скінченні елементи. Перший спостерігається при малому (недостатньому) розбитті, коли точність розрахунку низька, тому таке рішення має низьку цінність. А другий аспект виникає при виборі великого (надлишкового) розбиття. На перший погляд багато точок розрахунку призводять до підвищення точності і

достовірності, але не завжди можна отримати стійке рішення в такому випадку. Отже, міру розбиття (межу розділу) зони розрахунку слід раціонально знаходити за допомогою чисельних експериментів. Для ситуації з ПЕ робота міру розділення було визначено на основі конфігурації меж (розмірів ПЕ, зазору і товщини пластини). Тому, з урахуванням цього зауваження різні інтервали між вузлами були обрані на рисунку Е.7 для випадків а та б.

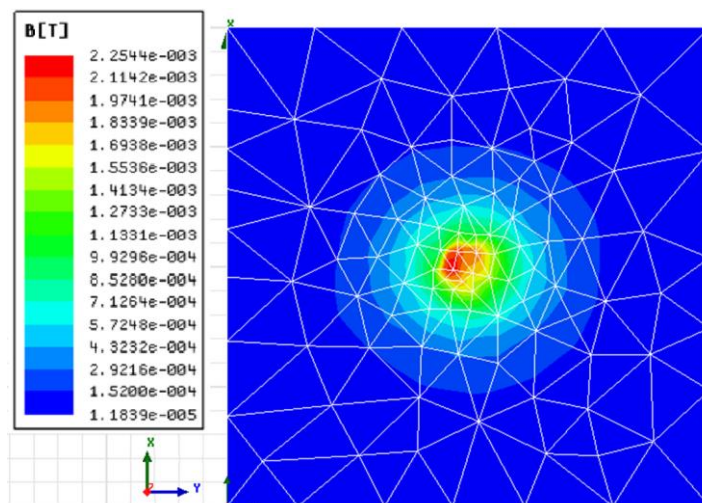
Отримані на рисунку Е.7 результати свідчать про послаблення взаємодії ПЕ та ФП за рахунок проникнення магнітного поля поза пластину. Отже, функціонування ПЕ в цілому погіршується при формуванні ПЗ, коли мобільний робот рухається на таких поверхнях. Для більшої товщини пластини (4 мм на рисунку Е.7, б) на пластині формується менше зовнішнє поле (найбільша величина магнітної індукції – 2,25 мТ на рисунку Е.7, б) і, відповідно, більший магнітний потік замикається через пластину, і формується більш високе значення ПЗ (0,96 Н і 1,51 Н на рисунку Е.7, а і на рисунку Е.7, б, відповідно) [9, 184]. При зменшенні товщини пластини магнітне поле, яке проникає за межі пластини (найбільше значення магнітної індукції 8 мТ на рисунку Е.7, а), збільшується, а, відповідно, менший магнітний потік замикається через пластину, і тому формується менша величина ПЗ [9].

Таким чином, отримані результати свідчать про необхідність врахування не тільки товщини зазору (через невизначеність неферромагнітної природи), але й товщини ФП (включаючи невизначеність її магнітних властивостей) для визначення притискних сил.

Серія експериментальних вимірювань магнітної індукції для різних значень товщини ФП проводилася за допомогою методу еквівалентного соленоїда [180, 185] для модельованого ПЕ з рисунку Е.5. На рисунку Е.8 представлені схеми побудови магнітних систем взаємодії ПЕ мобільних роботів для вимірювання значень магнітної індукції зі зворотного боку ФП, що імітує взаємодію ПЕ і ФП в реальних умовах ($\delta_{\text{ФП}}$ – товщина ФП, $\delta_{\text{НФП}}$ – товщина зазору).



а



б

Рисунок Е.7 – Картини проникнення електромагнітного поля за ФП із зазором 1,7 мм і різними значеннями її товщини: а – 0,7 мм; б – 4 мм

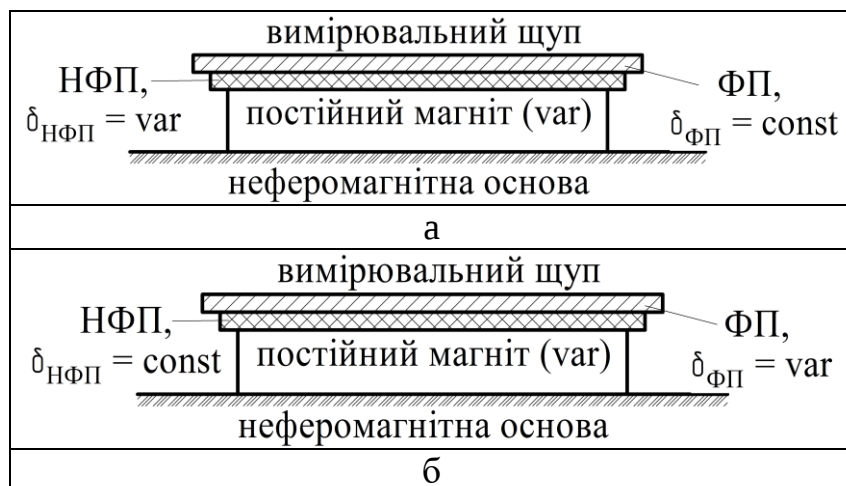


Рисунок Е.8 – Схеми вимірювання магнітної індукції для різних магнітів:

а – при постійній товщині $\delta_{\text{ФП}}$; б – зі змінною товщиною $\delta_{\text{НФП}}$

Рисунок Е.8, а ілюструє випадок змінного зазору між ПЕ і робочою ФП при її постійній товщині (випадок Б на рисунку 3.23). На рисунку Е.8, б показаний випадок зміни товщини ФП з незмінним зазором (через структурні або інші особливості поверхні – випадки Г і Д на рисунку 3.23).

Далі проведено серію експериментів з різними постійними та електромагнітами для різних товщин ФП та зазорів. У випадку постійних магнітів у об'ємі кожного магніту спостерігалася різна намагніченість, яка, у свою чергу, виражається в різних значеннях магнітної індукції на зовнішній (притискній) поверхні магніту. Таку ситуацію можна спостерігати навіть для магнітів з однієї партії. Так, у таблиці Е.1 наведено результати експериментів для двох ідентичних неодимових магнітів з однієї партії з однаковою номінальною заявленою притисковою силою 90 Н за нульового зазору ($\delta_{\text{ФП}} = 0$). Видно, що в деяких випадках розбіжності можуть досягати більше 60 %. Тому для надійного впровадження постійних магнітів у структурах МРБП, здатних рухатися вздовж ФП, доцільно обладнати їх системою контролю і керування, компоненти якої представлені на рисунках Е.1 – Е.3.

Таблиця Е.1 – Результати вимірювань магнітної індукції ззовні ФП для двох постійних притискних магнітів з однієї партії

Товщина ФП ($\delta_{\text{ФП}}$), мм	Магнітна індукція В, мТ	
	Магніт 1	Магніт 2
0	250	230
0,5	130	142
0,7	125	136
0,8	125	135
1,1	84	80
1,2	42	47
1,4	32	56
1,5	24	27
1,6	12	15
2,1	2	3
2,4	1	1
2,9	0	0

Отримані результати моделювання для ПЕ підтверджені для експериментального зразка. Значення магнітної індукції, виміряні на зовнішній стороні магнітом'якої ФП змінюваної товщини (від 0,7 до 4 мм) з постійним значенням зазору (1,7 мм). Проникнення магнітного поля поза феромагнітною пластиною становить приблизно від 3,2 до 12 мТ, що має такий же порядок, що і результати моделювання (від 2,25 до 8 мТ). Деякі розбіжності в розрахунку і експерименті пояснюються похибками вимірювань розмірів магніту і пластини, а також величинами магнітної індукції, які обумовлені класом точності вимірювальних приладів. Для формованого ПЗ необхідно відзначити наступне: при зменшенні товщини ФП від 4 до 0,7 мм ПЗ ослаблюється з 1,51 до 0,96 Н за розрахунками і від 3,1 до 2,2 Н – за експериментом [9].

Тому експеримент і моделювання в цілому підтверджують явище проникнення магнітного поля поза товщину робочої поверхні при зменшенні значення її товщини через пошкодження або конструктивні особливості, які разом утворюють поверхневі невизначеності феромагнітної природи виникнення. У практичних ситуаціях при русі МРБП на конструктивно різних поверхнях поточне значення товщини ФП може бути менше прогнозованого значення, що, зазвичай, враховується при проектуванні ПЕ для МРБП. Тобто існує ризик проникнення магнітного поля за іншу сторону пластини з одночасним зменшенням магнітного потоку в зазорі в цьому випадку, що приводить до зменшення ПЗ. Фактично така ситуація вважається несприятливою або навіть надзвичайною, оскільки зниження зусилля може призвести до небажаної втрати зчеплення ПЕ або всього МРБП з ФП [9].

Отже, результати моделювання показують, що розподіл магнітного поля і результуюче ПЗ залежать від таких основних параметрів, як: площа полюсу ПЕ і його магніторушійна сила, магнітна проникність магнітопроводу ПЕ і матеріалу ФП, значення неферромагнітного зазору і товщини ФП. Крім того, отримані результати можуть бути використані для розрахунку і відновлення магнітного поля на розподіленій поверхні, які пов'язані з проблемою ідентифікації об'єктів [186].

Додаток Ж

Технічні характеристики апаратних засобів для дистанційного керування експериментальним МРБП

Таблиця Ж.1 – Технічні характеристики плати розробки NodeMCU на базі WiFi-модуля ESP8266

Тип модуля	ESP8266 NodeMCU WiFi Devkit
Процесор	Tensilica L106 32-bit
Тактова частота процесора	80~160MHz
Пам'ять, RAM	32K + 80K
Кількість мультиплексованих входів-виходів (GPIO)	17
Кількість аналогових входів АЦП	1
Стандарти	Wi-Fi Direct (P2P), soft-AP, 802.11 support: b/g/n
Максимальний обсяг під'єднуваної Flash-пам'яті	до 16 MB
Протокол	Інтегрований стек TCP/IP
Максимальна кількість одночасних TCP-підключень	5
Напруга живлення	+ 3.3 В
Енергоспоживання	10uA~170mA

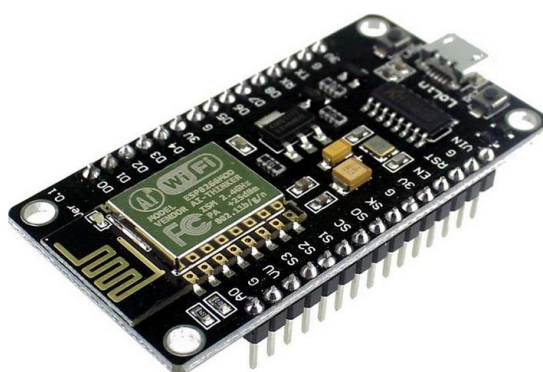


Рисунок Ж.1 – Зовнішній вигляд плати NodeMCU

Таблиця Ж.2 – Технічні характеристики плати ESP-12E Motor Shield

Напруга живлення двигунів	+ 4.5 .. 36 В
Напруга живлення логічних елементів	+ 4.5 .. 9 В
Робочий струм для живлення двигунів	до 1.2 А
Робочий струм для живлення логічних елементів	до 60 mA
Максимальна потужність розсіювання	4 Вт
Робоча температура	-25°C-+125°C
Вага	0,02 кг

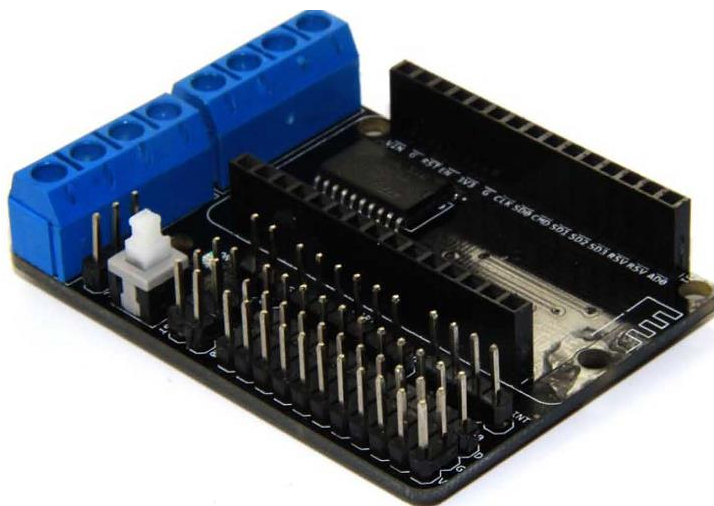


Рисунок Ж.2 – Зовнішній вигляд плати ESP-12E Motor Shield

Таблиця Ж.3 – Технічні характеристики мотор-редуктора GM25 370 24140 75 145D10

Напруга живлення двигунів	9 В
Коефіцієнт редуктора	1/75
Максимальний струм	до 4.5 А
Струм холостого ходу	до 180 mA
Номінальний струм	1.2 А
Номінальна швидкість обертання	150 об/хв
Робоча вологість	30-95 %
Шум	56 дБ



Рисунок Ж.3 – Зовнішній вигляд мотор-редуктора GM25 370 24140 75 145D10