

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/1970.68(2).2024.318216

УДК 62-523.8, 510.5

ВІДМОВОСТІЙКЕ АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ КРОКУЮЧИМ ГЕКСАПОДОМ ЗА НЕСПРАВНОСТІ ОДНІЄЇ КІНЦІВКИ

Бурау Н. І., Короленко Я. Р., Павловська Ю. О., Павловський О. М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: a_pav@ukr.net

Статтю присвячено вдосконаленню системи керування крокуючим мобільним роботом, який має шість кінцівок (гексаподом), з метою забезпечення його стійкого руху у випадку несправності чи відмови однієї кінцівки. Як базовий алгоритм руху розглядається трипедальна хода. У якості несправності кінцівки розглядається відмова одного із суглобів. Для забезпечення руху у випадку відмови однієї кінцівки розроблено алгоритм трипедальної ходи, який забезпечує для кожної з бездефектних кінцівок перебування у стадії стійкої опори протягом двох фаз руху поспіль. Оцінку можливості відмовостійкої ходи гексаподу за розробленим алгоритмом виконано на основі опорних трикутників та чотирикутника між кінцівками, що знаходяться у фазі опори.

Виконано структурно-функціональний синтез системи відмовостійкого адаптивного керування гексаподом, яка складається з таких модулів і підсистем: модуль динамічної моделі робота; модуль базового алгоритму ходи; підсистема виконавчих елементів; підсистема діагностування та прийняття рішення; підсистема альтернативних алгоритмів ходи. Розроблено та обґрунтовано структурно-функціональну схему каналу керування для реалізації алгоритму діагностування суглобу однієї кінцівки, прийняття рішення про його стан та перемикавання на продовження виконання базового алгоритму ходи, якщо стан суглобу оцінюється як бездефектний. Розроблено та обґрунтовано схему каналу керування перемиканням на виконання альтернативного алгоритму ходи, якщо стан суглобу оцінюється як дефектний. Запропоновані структурно-функціональні рішення узагальнено для випадку відмови інших суглобів розглянутої кінцівки та інших кінцівок гексаподу.

Показано, що на основі виявлення та локалізації відмов суглобів кінцівок гексапода відбувається переконфігурація алгоритму ходи та системи керування, і, таким чином, реалізується відмовостійке адаптивне керування рухом гексапода. Реалізація запропонованих альтернативних трипедальних алгоритмів ходи та каналів керування у системі відмовостійкого адаптивного керування забезпечить стабільний рух гексапода при відмові однієї з кінцівок.

Ключові слова: мобільний робот, гексапод, алгоритм ходи, відмова, система керування, діагностування, відмовостійке адаптивне керування, функціональна схема, канал керування.

Вступ

Крокуючі мобільні роботи (МР), як, наприклад, гексаподи, які мають шість кінцівок, знаходять своє застосування у різних сферах людської діяльності (виробництво, транспортування, моніторинг, космічні програми тощо) та робочих середовищах (відкритого та закритого типу, структурованих та неструктурованих, статичних та динамічних, недоступних або небезпечних, тощо) [1, 2].

Автономний рух МР забезпечується комплексом механічних, електронних, обчислювальних, комунікативних модулів, алгоритмічного та програмного забезпечення для сприйняття, локалізації, картографування та розуміння робочого середовища, планування шляху, обчислення параметрів руху та безвідмовного виконання послідовностей фаз руху [3]. Ці модулі складають основу таких систем МР для забезпечення виконання різних функцій [3, 4]: інформаційно-виміральної сис-

теми (комплексу сенсорів для отримання даних про робоче середовище); системи керування (для аналізу інформації від сенсорів, формування керуючих сигналів та передачі їх на виконавчу систему МР); системи зв'язку (для обміну даними та прийняття керуючих команд із зовнішніх джерел); виконавчої системи (для реалізації рухів та зміни конфігурації МР).

Важливою складовою розробки крокуючих МР є планування ходи та синтез відповідних алгоритмів руху, які залежать від типу, рівня структурованості та характеру робочого середовища. Для крокуючих МР експериментально встановлено [5], що в структурованих середовищах з високою прохідністю та відсутніми нерівностями поверхні руху МР мають періодичну ритмічну ходу. Найшвидшою з класичних схем ходи гексапода є тринога (трипедальна) хода, коли три з шести кінцівок знаходяться на поверхні руху, забезпечуючи стійку

опору, а інші три кінцівки знаходяться у фазі переносу, тобто переміщуються в повітрі з початкового положення в кінцеве. Для руху гексапода пересіченою місцевістю зі складним рельєфом та перешкодами рекомендовано використовувати вільну ходу, коли запуск руху кожної кінцівки відбувається на основі локального планування відповідно до взаємодії між стопою кінцівки та навколишнім середовищем. Така хода дозволяє регулювати швидкість руху, виконувати повороти, уникати перешкод чи оминати їх. Для синтезу системи керування гексаподом спочатку розглядається його будова (геометрична форма та розміри тіла, форма та розміри кожної кінцівки), форма руху суглобів, тип ходи, наприклад, трипедальна. Параметри руху кожної кінцівки передаються та обробляються в системі керування, з якої керуючі сигнали відповідно до алгоритму трипедальної ходи надходять до елементів виконавчої системи кожної з кінцівок для реалізації відповідних рухів кінцівок, щоб забезпечити рух всього гексаподу [5].

Складні умови функціонування крокуючих МР несуть певні ризики відмов їх функціональних елементів чи отримання ними пошкоджень під час руху, що може спричинити невиконання поставлених перед МР завдань. У працях [4, 6] до найбільш типових несправностей та пошкоджень крокуючих МР віднесено такі, як: несправність/пошкодження або втрата крокуючих механізмів чи кінцівок; несправність/пошкодження сенсорів, відсутність зв'язку із супутниковими системами; несправність/пошкодження електроніки, обчислювальних та комунікаційних модулів; механічні пошкодження корпусу та обшивки; пошкодження програмного забезпечення. Відмова (несправність чи пошкодження) кінцівки крокуючого МР є одним з найбільш розповсюджених дефектів, наявність якого порушує обраний тип ходи та безпосередньо впливає на статичну стійкість МР. Відмова кінцівки може бути наслідком несправності одного з суглобів [4, 6], коли суглоб не може рухатись, але кінцівка може бути використана для опори, або коли суглоб рухається вільно і кінцівка не може використовуватись для опори. Тому для забезпечення руху гексапода у разі відмови однієї чи більше кінцівок система керування повинна забезпечити виявлення та локалізацію несправності, виконати переконфігурацію алгоритму ходи, відповідно до якого сформувати та подати керуючі сигнали на елементи виконавчої системи.

Метою роботи є синтез структури системи відмовостійкого адаптивного керування гексаподом у разі відмови однієї кінцівки на основі виявлення несправності та переконфігурації алгоритму ходи.

Огляд стану та перспективи розвитку систем керування

Відмова однієї з кінцівок виникає внаслідок кінематичного пошкодження чи руйнування, що

призводить до значних обмежень чи неможливості руху у відповідних суглобах (з'єднаннях елементів кінцівки). В роботі [7] для такого випадку пропонується відмовостійке планування ходи, за допомогою якої крокуючі МР можуть продовжувати рух у разі відмови однієї кінцівки, зберігаючи статичну стійкість. Зокрема, запропоновано двофазну переривчасту ходу для крокуючих МР з чотирма кінцівками при блокуванні одного із суглобів.

Пошкодження суглобу кінцівки та відмову датчика кутової швидкості у підсистемі керування положенням розглянуто у якості відмов у статті [8]. В системі керування рухом є блок діагностування, з якого надходить інформація про виникнення несправності. Для забезпечення відмовостійкої ходи автор пропонує керування на основі гібридного контролера, який використовує інформацію про положення, кут і швидкість зворотного зв'язку від бортового GPS, а також датчики для визначення курсу та швидкості для керування бічним і поздовжнім рухом робота. Застосовується керування позицією кінцівки на етапі замаху та керування силою притискання кінцівки у фазі приземлення, яка завершується, як тільки сила притискання перевищує встановлене мінімальне значення, що означає розміщення кінцівки на поверхні руху.

Дослідження в [9] присвячено підвищенню надійності та стійкості руху гексаподів у разі відмови однієї кінцівки на основі запропонованого нового механізму відмовостійкої трипедальної ходи. Зокрема, запропоновано ходу з різними значеннями робочих коефіцієнтів для різних кінцівок, а для забезпечення та покращення стійкості руху запропоновано метод регулювання, заснований на попередньому налаштуванні тазового суглоба. В роботі розроблено імітаційну модель гексапода та проведено комп'ютерне моделювання, а також проведено експериментальні дослідження з прототипом робота, які показали, що запропонована відмовостійка хода ефективно вирішує проблему руху гексапода з відмовою однієї кінцівки на рівній поверхні руху.

У роботі [10] автори досліджують відмовостійке планування руху гексапода з відмовою однієї кінцівки за допомогою методу керування силою притискання стопи. На першому етапі було розроблено стійку до збоїв трипедальну ходу та визначено її параметри. На основі запасу статичної стійкості було оптимізовано початковий кут повороту суглобу кінцівки та розраховано траєкторію руху на основі прогнозного керування. Для цього генератором траєкторії використовується інформація про точку нульового моменту, щоб згладити бажану траєкторію для центру мас тіла, покращити відстеження траєкторії та стабільність руху робота. Результати моделювання в середовищах CoppeliaSim та MATLAB показали задовільний ефект керування кутом повороту гексаподу з від-

мовою однієї кінцівки.

Питанням створення адаптивного керування гексаподом у неструктурованих середовищах присвячено дослідження [11]. Автори пропонують навігацію гексапода на неструктурованих поверхнях руху, які моделюються випадковим розміщенням на землі перешкод у вигляді блоків чи плит. Запропоновано структуру системи керування гексаподом з метою регулювання траєкторії кінцівок таким чином, щоб гексапод обходив перешкоди і рухався по землі, забезпечуючи квазістатично стабільним положення свого тіла. Для уникнення коливань тіла, викликаних варіацією розподілу зусилля на стопі, кожен наконечник стопи має контролер імпедансу для зменшення впливу контактної сили. Порівняльний аналіз результатів моделювання в CoppeliaSim запропонованого адаптивного методу керування та неадаптивного методу керування підтвердили можливість застосування та ефективність запропонованого рішення. Автори відзначають важливість подальших досліджень ефективності руху гексаподів з можливостями налаштування параметрів контролю імпедансу, щоб уникнути коливань тіла та ковзання кінцівок на різних типах поверхонь руху.

Таким чином, як показав аналіз наукових публікацій, забезпечення стабільного руху гексаподів в умовах неструктурованого середовища чи при відмові кінцівок, є важливим науково-практичним напрямком у галузі автоматизації та робототехніки. Підвищення надійності та стійкості руху гексаподів можна досягти шляхом розробки системи відмовостійкого керування.

Структурно-функціональний синтез системи відмовостійкого адаптивного керування

Розробка системи керування рухом крокуючого МР розпочинається з планування ходи та обґрунтування її алгоритму. У попередній роботі авторів [12] розглянуто математичний опис гексаподу, обґрунтовано використання трипедальної ходи, проведено моделювання прямолінійного руху бездефектного гексаподу та при відмові однієї кінцівки.

Відповідно до викладеного в [4, 12], досліджується модель гексаподу, тіло якого має форму правильного шестикутника. На вершинах шестикутника розташовані кінцівки, що складаються з трьох суглобів, які з'єднані трьома ланками (рис. 1).

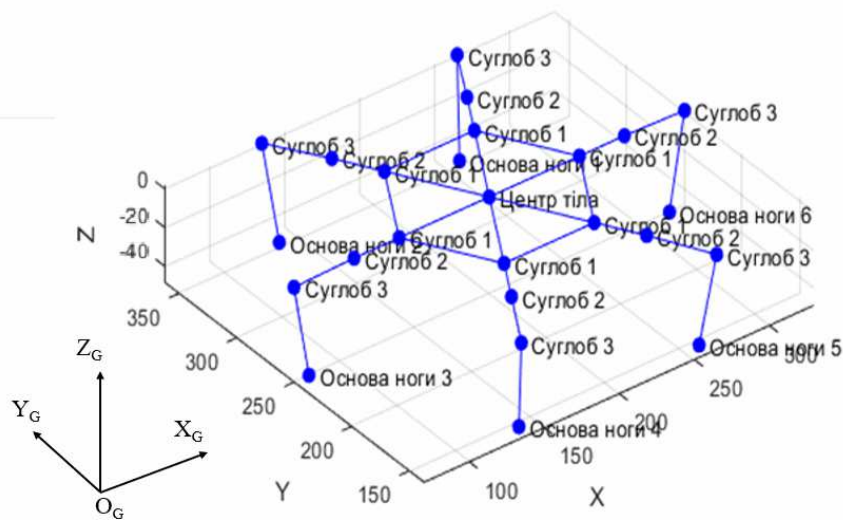


Рис. 1. Модель гексапода [4, 12]

Суглоб 1 кожної кінцівки обертається в площині тіла гексапода і забезпечує поворот кінцівки навколо вертикальної осі на кут α . Суглоби 2 та 3 обертаються в площині, перпендикулярній площині тіла і забезпечують поворот відповідних ланок кінцівок навколо горизонтальних осей (в площині, перпендикулярній тілу гексаподу) відповідно на кути β та γ .

Як показано в [4, 9, 12, 13], цикл руху кінцівки складається з підйому і фіксації в певному стійкому положенні і має такі дві фази: фазу переносу (переміщення кінцівки в повітрі з початкового в кінцеве положення) та фазу опори (основа кінцівки контактує з поверхнею руху). Трипедальна хода означає, що в кожний момент часу три кінцівки робота знахо-

дяться у фазі переносу, а інші три кінцівки – у фазі опори. Такий алгоритм ходи забезпечує статичну стійкість гексапода, тобто знаходження вертикальної проекції центру мас (ЦМ) гексапода в межах опорного трикутника, який утворюється між кінцівками, що знаходяться у фазі опори [4, 9, 12]. Послідовність чергування фаз переносу та опори для кожної кінцівки показано на рис. 2, а, де темним кольором позначено фазу опори, а світлим – фазу переносу [4, 12]. Відмова під час руху гексапода однієї кінцівки (несправність, пошкодження чи втрата) вимагає реформатування алгоритму трипедальної ходи та забезпечення статичної стійкості робота таким чином, щоб, наприклад, в кожний момент часу три кінцівки

знаходились у фазі опори і утримували його тіло, а дві кінцівки знаходились у фазі переносу. У разі відмови кінцівки 1 розроблено алгоритм ходи, наведений на рис. 2, б, за відмови кожної з інших кінцівок, алгоритм ходи буде змінюватись (наприклад, шляхом переміщення послідовностей фаз переносу та опори на один рядок вниз).

Як і для бездефектного робота, так і у разі відмови однієї з кінцівок, можливість відмовостійкої ходи гексаподу оцінюється за допомогою опорного трикутника між кінцівками, що знаходяться у фазі опори [4, 9, 12]. В роботі [9] наведено алгоритм ходи, коли процес виконання одного кроку розділено на три етапи, а п'ять справних кінцівок розділено на три

групи. На кожному етапі у фазі переносу знаходиться одна група кінцівок, а інші дві групи знаходяться у фазі опори. Алгоритм сформовано таким чином, що при відмові однієї кінцівки інша кінцівка повинна поспіль дві фази перебувати у фазі переносу (на етапі підйому). Для такого алгоритму опорні трикутники у двох фазах проходять через ЦМ гексапода, що є граничним станом для статичної стабільності, однак в такому стані можна забезпечити динамічну стійку гексаподу під час його руху.

Для трьох фаз наведеного на рис. 2, б переформатованого алгоритму трипедальної ходи опорні трикутники наведено на рис. 3 (червоним кольором).

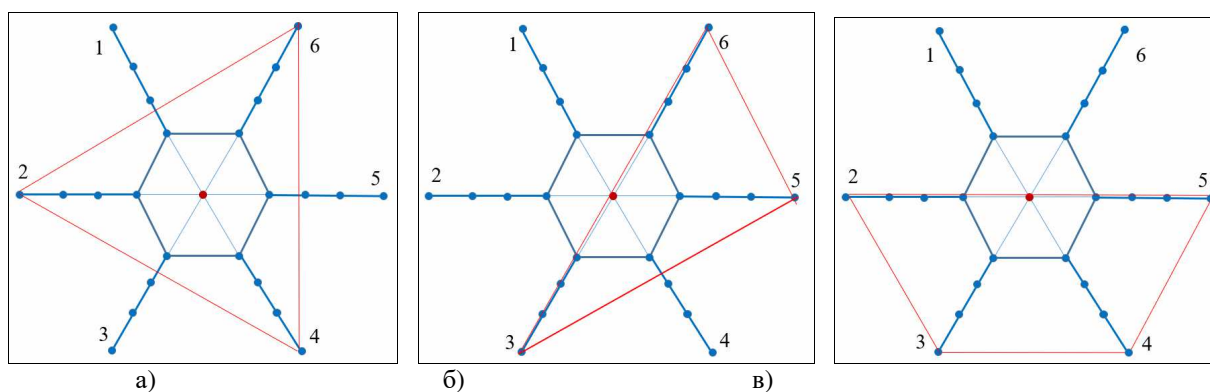
	Крок 1			Крок 2		
	Фази руху					
	1	2	3	1	2	3
Кінцівка 1		■		■		■
Кінцівка 2	■		■		■	
Кінцівка 3		■		■		■
Кінцівка 4	■		■		■	
Кінцівка 5		■		■		■
Кінцівка 6	■		■		■	

	Крок 1			Крок 2		
	Фази руху					
	1	2	3	1	2	3
Кінцівка 1						
Кінцівка 2	■		■	■		■
Кінцівка 3		■	■		■	■
Кінцівка 4	■		■	■		■
Кінцівка 5		■	■		■	■
Кінцівка 6	■	■		■	■	

а)

б)

Рис. 2. Послідовність фаз переносу і опори при трипедальній ході: а) всі кінцівки бездефектні; б) при пошкодженні кінцівки 1



а)

б)

в)

Рис. 3. Опорні трикутники для фаз руху переформатованого алгоритму трипедальної ходи: а) фаза 1; б) фаза 2; в) фаза 3

Як видно з рис. 3, а, фаза руху 1 при відмові кінцівки 1 не змінюється, положення ЦМ (позначено червоною точкою) в центрі опорного трикутника свідчить про найкраще забезпечення статичної стійкості гексапода. У фазі руху 2 та фазі руху 3 опорні трикутник (рис. 3, б) та чотирикутник (рис. 3, в) проходять через ЦМ гексапода, що є граничним станом для статичної стабільності. Розроблений алгоритм, на відміну від [9], забезпечує для кожної з

працездатних кінцівок перебування у стадії стійкої опори протягом двох фаз руху поспіль. Але при несправності/пошкодженні однієї кінцівки кількість замахів при виконанні одного переміщення буде меншою, ніж для базового алгоритму трипедальної ходи, що призведе до зменшення швидкості руху гексапода.

Таким чином, у разі відсутності будь-яких несправностей чи пошкоджень кінцівок рух гексапода

планується і реалізується відповідно до класичного (або ж базового) алгоритму трипедальної ходи, а при відмові однієї з кінцівок система керування рухом гексаподу повинна забезпечити реалізацію одного з шести можливих алгоритмів. Для виконання руху за кожним з цих алгоритмів гексапод використовує ті п'ять кінцівок, які знаходяться у безвідмовному стані. Такий підхід потребує на кожному русі визначати стан кожної кінцівки, тому до складу системи керування необхідно включити підсистему діагностики.

В загальному випадку структура системи відмовостійкого керування гексаподом складається з таких модулів (рис. 4): модуль динамічної моделі робота; модуль базового алгоритму ходи; підсистема виконавчих елементів; підсистема діагностування та прийняття рішення та підсистема альтернативних алгоритмів ходи.

прийняття рішення; підсистема альтернативних (перформатованих) алгоритмів ходи.

Перші три структурні модулі системи керування є базовими і відповідають за розрахунки та реалізацію алгоритму руху бездефектного гексапода. До складу модуля динамічної моделі робота входять блок задання початкових умов (геометричних розмірів, початкового положення ЦМ тіла, бажаного переміщення ЦМ за один цикл руху), блок розрахунку бажаного положення кінцівок (на основі необхідного значення переміщення центра мас тіла обраховується можливе положення кінцівок гексаподу для здійснення цього переміщення за один цикл) та блок обчислення кутів повороту суглобів α_i , β_i та γ_i кожної кінцівки ($i=1,6$) на основі зворотних рівнянь кінематики кінцівок [12].

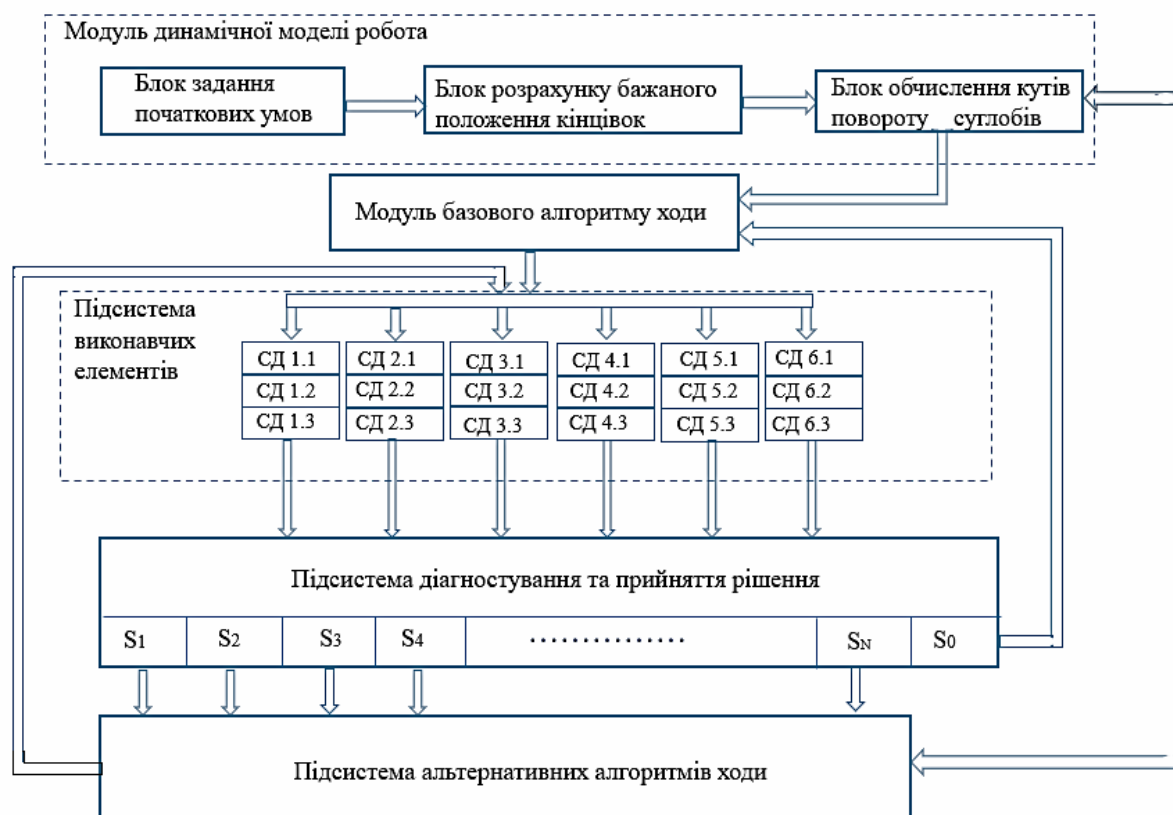


Рис. 4. Функціональна схема системи відмовостійкого адаптивного керування гексаподом

Для виконання руху у тривимірному просторі шістьма кінцівками гексаподу, кожна з яких складається з трьох суглобів, з'єднаних трьома ланками, використовується 18 виконавчих механізмів (актюаторів). Найчастіше у якості актюаторів для малогабаритних крокуючих МР використовуються серводвигуни (СД) MG995/MG996R з пусковим моментом 1,078Н·м [14]. Для кріплення на суглобах та на корпусі використовується фланець із отворами під різьбове з'єднання, корпус серводвигуна фіксується на корпусі робота (для суглоба 1) або на основній частині суглоба (для суглобів 2 та

3), а рухома частина кінцівки кріпиться безпосередньо на вихідний вал серводвигуна. Для встановлення вихідного валу у необхідне положення використовується потенціометр або енкодер, який з'єднаний із шестернею вихідного валу серводвигуна і працює у режимі зворотного зв'язку із керуючою мікросхемою всередині серводвигуна.

Підсистема діагностування та прийняття рішення призначена для виявлення відмови (пошкодження/несправності) кінцівки та прийняття рішення про продовження виконання базового алгоритму ходи, якщо встановлено наявність бездефе-

ктного стану S_0 , чи переформатування ходи за одним з альтернативних алгоритмів, якщо встановлено наявність дефектного стану гексапода (S_i , $i=1, \dots, N$). Функціональні можливості та складність цієї підсистеми залежать від поставленої мети, кількості, типу та характеру потенційних відмов, кількості рівнів діагностування. Якщо у якості відмови розглядається така несправність кінцівки, яка унеможливує виконання нею фази переносу, то причиною може бути пошкодження чи несправність суглобу 1 кінцівки. Завдання виявлення несправності суглобу 1 кожної кінцівки формує один рівень діагностування. Якщо несправність кінцівки унеможливує виконання фази опори, причиною може бути пошкодження/несправність суглобу 2 та суглобу 3, пошкодження сенсора тиску на підшві кінцівки, або втрата частини кінцівки, тоді завдання виявлення цих несправностей кожної кінцівки формують наступні три рівні діагностування. В загальному випадку в системі діагностування необхідно реалізувати всі названі рівні, щоб виявити відмову кожної кінцівки, зумовлену несправністю будь-якого з трьох суглобів та сенсора тиску. При розробці підсистеми діагностування для кожного потенцій-

но можливого результату – виявлення та локалізації несправності/пошкодження, необхідно розробити алгоритм ходи та відповідний алгоритм перемикавання керування гексаподом для продовження його руху у зміненому функціональному стані. Кількість таких алгоритмів залежить від числа дефектних станів гексапода (S_i , $i=1, \dots, N$), для яких можливе продовження його руху.

Розглянемо приклад реалізації алгоритму діагностування відмови кінцівки 1, обумовленої несправністю суглобу 1, який повертає кінцівку навколо вертикальної осі на кут α_1 . На рис. 5 наведено структурно-функціональну схему каналу керування для реалізації алгоритму діагностування суглобу 1, прийняття рішення про його стан та перемикавання на продовження виконання базового алгоритму ходи, якщо стан суглобу 1 оцінюється як бездефектний (S_0).

З модуля задання та реалізації базового алгоритму ходи на серводвигуни надходять сигнали про задані кути повороту суглобів кінцівки $\alpha_{1з}$, $\beta_{1з}$ та $\gamma_{1з}$. Серводвигуни виконують повороти рухомих ланок кінцівки так, що дійсні кути повороту ланок відповідно складають $\alpha_{1д}$, $\beta_{1д}$ та $\gamma_{1д}$.

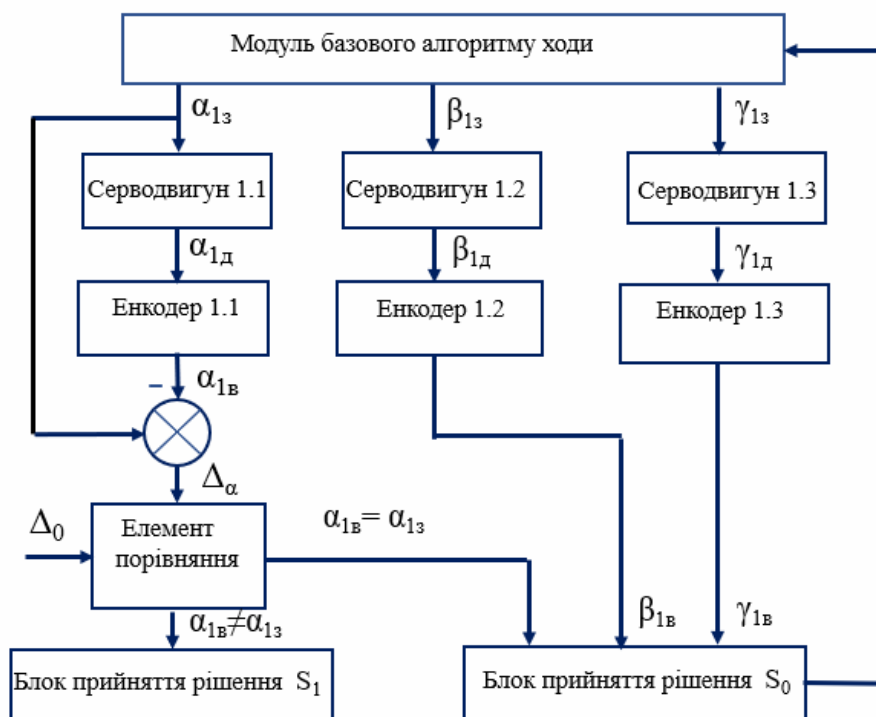


Рис. 5. Структурно-функціональна схема каналу керування для реалізації алгоритму діагностування суглобу 1 кінцівки 1

Оскільки серводвигуни не мають інтерфейсів для передачі даних про виміряні кути повороту назовні, то пропонується на вихідному валу кожного серводвигуна закріпити вал обертового прецизійного потенціометра (або енкодера), який буде підключений до АЦП керуючого мікроконтролера.

Таким чином, вихідними сигналами енкодерів будуть виміряні значення кутів повороту відповідних ланок кінцівки ($\alpha_{1в}$, $\beta_{1в}$ та $\gamma_{1в}$). Для діагностування суглобу 1 спочатку обчислюється відхилення виміряного значення кута повороту $\Delta\alpha = \alpha_{1з} - \alpha_{1в}$, яке порівнюється із заданим допус-

тимим значенням похибки серводвигуна $\Delta 0$ (для обраного типу не перевищує 10). Якщо відхилення $\Delta\alpha \leq \Delta 0$, то приймаємо $\alpha_{1в} = \alpha_{1з}$, тоді стан суглобу 1 підсистемою діагностування та прийняття рішення оцінюється як бездефектний S_0 , в результаті прийняття такого рішення системою керування продовжується виконання базового алгоритму ходи.

Якщо відхилення $\Delta\alpha > \Delta 0$, це означає, що $\alpha_{1в} \neq \alpha_{1з}$, і тоді стан суглобу 1 підсистемою діагностування та прийняття рішення відноситься до множини дефектних станів (наприклад, S_1), що є підставою для перемикання системи на виконання відповідного альтернативного алгоритму ходи.

Функціональну схему каналу прийняття рішення та перемикання на виконання альтернативного алгоритму ходи при відмові суглобу 1 кінцівки 1 наведено на рис. 6.

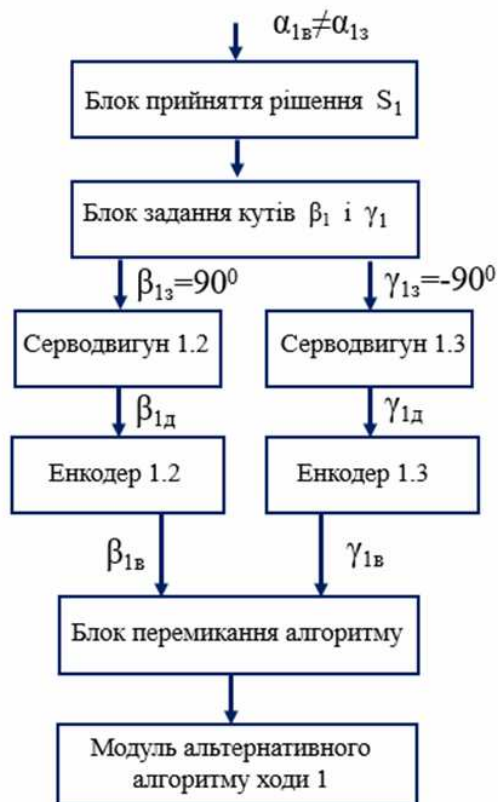


Рис. 6. Функціональна схема каналу керування перемиканням на виконання альтернативного алгоритму ходи при відмові суглобу 1 кінцівки 1

Для перемикання системи на виконання відповідного альтернативного алгоритму ходи спочатку необхідно забезпечити якомога менший вплив несправної кінцівки 1 на подальший рух гексапода. Тому з блоку прийняття рішення S_1 керуючий сигнал надходить до блоку задання кутів β_1 та γ_1 , які повинні прийняти максимальні значення, щоб підігнути та підняти кінцівку 1, в такому стані ця кінцівка залишається у складі гексапода як вантаж і не заважає його подальшому руху. Після виконання руху підгинання та підняття кінцівки 1 від-

бувається перемикання на виконання альтернативного алгоритму ходи на основі використання п'яти кінцівок, які знаходяться у безвідмовному стані (рис. 2, б).

Розроблену структурно-функціональну схему каналу керування для реалізації алгоритму діагностування суглобу 1 кінцівки 1 на рис. 5 можна узагальнити і на випадок відмови інших суглобів цієї кінцівки. Якщо непрацездатний стан кінцівки 1 настає в результаті відмови суглобу 2 чи суглобу 3, то діагностування відбувається за схемою обчислення відхилення $\Delta\beta$ та $\Delta\gamma$ вимірних значень кутів повороту цих суглобів та порівняння отриманих відхилень з допустимим значенням похибки серводвигуна $\Delta 0$ так, як це показано на рис. 5 при діагностуванні суглобу 1. Крім того, з урахуванням симетричної будови гексапода та вимоги ідентичності його кінцівок у бездефектному стані, канали керування рухом гексапода при відмові суглобів інших кінцівок будуть мати таку ж структуру, як і розроблені для прикладу відмови кінцівки 1.

Таким чином, на основі виявлення та локалізації відмов суглобів кінцівок гексапода, відбувається переконфігурація алгоритму ходи та системи керування рухом, що відповідає концепції відмовостійкого адаптивного керування.

Висновки

Аналіз стану та перспектив розвитку крокуючих МР показав, що однією з важливих складових їх розробки є планування ходи та синтез відповідних алгоритмів руху. Результати більшості з проведених досліджень показали, що для гексаподів найбільш ефективною, з точки зору швидкості та стійкості руху, є трипедальна хода, коли три з шести кінцівок знаходяться на поверхні руху, забезпечуючи стійку опору, а інші три кінцівки знаходяться у фазі переносу з початкового положення в кінцеве. Планування та реалізація алгоритму ходи забезпечуються системою керування рухом гексапода, однак така система потребує вдосконалення, щоб забезпечити стійкий рух гексапода у разі відмови однієї чи більше кінцівок.

В роботі запропоновано та обґрунтовано алгоритм трипедальної ходи гексапода у разі відмови однієї кінцівки (на прикладі кінцівки 1). При виконанні розробленого алгоритму кожна з працездатних кінцівок перебуває у стадії стійкої опори протягом двох фаз руху поспіль для забезпечення стійкого руху. Встановлено, що у разі відмови будь-якої з кінцівок гексапода, для виконання такого алгоритму ходи системою керування необхідно визначати стан кожної кінцівки на кожному русі та виконувати переконфігурацію алгоритму ходи та каналів керування кінцівками залежно від визначеного стану кінцівок.

Виконано структурно-функціональний синтез системи відмовостійкого адаптивного керування гексаподом, до складу якої входять модуль дина-

мічної моделі робота, модуль базового алгоритму ходи, підсистема виконавчих елементів, підсистема діагностування та прийняття рішення, підсистема альтернативних алгоритмів ходи. Для прикладу потенційної відмови суглобу 1 кінцівки 1 розроблено та обгрунтовано структурно-функціональну схему каналу керування для реалізації алгоритму діагностування суглобу, прийняття рішення про його стан та перемикання на продовження виконання базового алгоритму ходи, якщо стан суглобу 1 оцінюється як бездефектний. Розроблено та обгрунтовано схему каналу керування перемиканням на виконання альтернативного алгоритму ходи, якщо стан суглобу 1 оцінюється як дефектний. Запропоновані структурно-функціональні рішення узагальнено для діагностування інших суглобів кінцівки 1 та інших кінцівок гексаподу.

Реалізація запропонованих альтернативних трипедальних алгоритмів ходи та каналів керування у системі відмовостійкого адаптивного керування забезпечить стабільний рух гексапода при відмові однієї з кінцівок.

Література

- [1] F. Rubio, F. Valero, and C. Llopis-Albert, "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 1-22, 2019. DOI: 10.1177/1729881419839596
- [2] V. Lyashenko, M. Ahmad, N. Belova, and S. Sotnik, "Modern Walking Robots: A Brief Overview", *International Journal of Recent Technology and Applied Science*, vol. 3, no. 2, pp. 32-39, 2021. DOI: 10.36079/lamintang.ijortas-0302.252
- [3] L. Wijayathunga, A. Rassau, and D. Chai, "Challenges and Solutions for Autonomous Ground Robot Scene Understanding and Navigation in Unstructured Outdoor Environments: A Review", *Applied Sciences*, vol. 13, no. 17, 9877, 33 p., 2023. DOI: 10.3390/app13179877
- [4] Я. Р. Короленко, "Робастна система керування рухом крокуючого мобільного робота", Магістерська дис., КПІ ім. Ігоря Сикорського, Київ, 2024.
- [5] J. Yuan, L. Yan, Y. Zhang, H. Li, and C. Zuo, "Review of Bionic Hexapod Robot", *Journal of Artificial Intelligence Practice*, vol. 5, pp. 7-10, 2022. DOI: 10.23977/jaip.2022.050102.
- [6] Z. J. Chen, Q. X. Xi, F. Gao and Y. Zhao, "Fault-tolerant gait design for quadruped robots with one locked leg using the g(f) set theory", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 178, 2022. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105069
- [7] J.-M. Yang, "Two-phase discontinuous gaits for quadruped walking machines with a failed leg", *Robotic and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 9, pp. 728-737, 2008. DOI: 10.1016/j.robot.2008.01.002
- [8] U. Asif, "Improving the navigability of a hexapod robot using a fault-tolerant adaptive gait", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 9, no. 33, pp. 1-12, 2012. DOI: 10.5772/50604
- [9] Y. Liu, X. Fan, L. Ding, J. Wang, T. Liu, and H. Gao, "Fault-Tolerant Tripod Gait Planning and Verification of a Hexapod Robot", *Applied Sciences*, vol. 10, no. 8, 2959, 2020. DOI: 10.3390/app10082959
- [10] B. You, Y. Fan, and D. Liu, "Fault-tolerant motion planning for a hexapod robot with single-leg failure using a foot force control method", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 19, no. 5, pp.1-12, 2022. DOI: 10.1177/17298806221121070
- [11] J. Coelho, B. Dias, G. Lopes, F. Ribeiro, and P. Flores, "Reactive Locomotion of a Hexapod for Navigation Across Irregular Ground", *Advances in Robot Kinematics 2022 (ARK 2022)*, Springer Proceedings in Advanced Robotics, vol. 24, pp. 478-485, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-08140-8_52
- [12] Я. Р. Короленко, Ю. О. Павловська, "Моделювання руху крокуючого робота з несправною кінцівкою у середовищі MATLAB", *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Том 35 (74), №5, с. 161 – 169. 2024. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.5.1/25
- [13] C. Gurel, Hexapod Modelling, Path Planning, and Control. [Електронний ресурс], ResearchGate, 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/320386792_Hexapod_Modelling_Path_Planning_and_Contr ol#pf34.
- [14] Сервопривод Tower Pro MG995 Arduino.ua [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arduino.ua/ru/prod2551-servoprivid-tower-pro-mg995-180>.

UDK 62-523.8, 510.5

N. Bouraou, Ya. Korolenko, Yu. Pavlovskia, O. Pavlovskii

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
FAULT-TOLERANT ADAPTIVE CONTROL OF A WALKING HEXAPOD WITH FAILURE OF ONE LEG

The article is devoted to the improvement of the control system of a walking mobile robot with six legs (hexapod) in

order to ensure its stable movement in case of damage or failure of one limb. A tripod gait is considered as the basic movement algorithm. The failure of one of the joints is considered as a failure of the limb. To ensure movement in the event of failure of one limb, a tripod walking algorithm has been developed, which ensures that each of the defect-free limbs remains in the stage of stable support during two phases of movement in a row. The evaluation of the possibility of fault-tolerant gait of the hexapod according to the developed algorithm was performed on the basis of support triangles and a quadrangle between the limbs that are in the support phase. The structural and functional synthesis of the system of fault-tolerant adaptive control of the hexapod, which consists of the following modules and subsystems, was performed: module of the dynamic model of the robot; basic gait algorithm module; subsystem of executive elements; diagnosis and decision-making subsystem; a subsystem of alternative gait algorithms. The structural and functional scheme of the control channel was developed and substantiated for the implementation of the algorithm for diagnosing the joint of one limb, making a decision about its condition and switching to the continuation of the basic gait algorithm, if the condition of the joint is assessed as defect-free. The scheme of the control channel for switching to the execution of an alternative gait algorithm, if the condition of the joint is assessed as defective, has been developed and substantiated. The proposed structural and functional solutions are generalized for the case of failure of other joints of the considered limb and other limbs of the hexapod. It is shown that based on the detection and localization of joint failures of the hexapod limbs, the reconfiguration of the gait algorithm and the control system takes place, and in this way a fault-tolerant adaptive control of the movement of the hexapod is realized. The implementation of the proposed alternative tripod gait algorithms and control channels in the fault-tolerant adaptive control system will ensure stable movement of the hexapod in case of failure of one of the limbs.

Keywords: mobile robot, hexapod, gait algorithm, failure, control system, diagnostics, fault-tolerant adaptive control, functional diagram, control channel.

*Надійшла до редакції
06 вересня 2024 року*

*Рецензовано
19 жовтня 2024 року*



© 2024 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).