

А.Г. Ткачук, к.т.н., доц.  
А.В. Коваль, к.т.н., доц.  
А.А. Гуменюк, к.т.н., доц.  
М.В. Богдановський, ст. викладач  
М.С. Гриневич, магістр

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Інтелектуальна мехатронна система «робот-гексапод»

*У статті розглянуто особливості конструкції мобільних роботів-гексаподів. Встановлено, що така мобільна платформа є біонічною системою, яка використовує для пересування шість ніг та імітує своїм зовнішнім виглядом і способом пересування навука. Робот-гексапод має шість рухомих ланок, а для забезпечення його руху достатньо всього лише трьох робочих. Перевагами робота є його висока прохідність на нерівних поверхнях порівняно з колісними платформами. Розроблено лабораторний макет автоматизованої мехатронної системи «робота-гексапода». Було обрано класичну конструктивну реалізацію робота, що передбачає шість кінцівок із трьома ступенями рухомості, які розміщені симетрично по три рухомі ланки з двох сторін робота і приводяться в рух завдяки вісімнадцяти серводвигунам. Розроблено систему керування роботом, яка полягає у плануванні переміщення робота з врахуванням інформації, що надходить з датчиків, які в свою чергу забезпечують загальний зворотний зв'язок, надаючи інформацію про різні параметри зовнішнього середовища. Для здійснення рухів гексапода реалізовано відповідний алгоритм, яким передбачено розподіл на дві групи кінцівок робота та систему дистанційного керування ним. Проведено моделювання переміщення робота за допомогою ROS + Gazebo.*

**Ключові слова:** робототехніка; гексапод; мехатроніка; біоніка.

**Актуальність теми.** Сьогодні у світі спостерігаються швидкі темпи розвитку робототехніки – як мобільної, так і промислової. Все більше пристроїв стають автоматизованими і керованими. Досягається це завдяки мікропроцесорним технологіям, а також механічній частині, яка керується за допомогою програмованих пристроїв. Мобільні роботи сьогодні набувають все більшої популярності та розширюють сфери свого застосування завдяки своїм габаритам і різноманітності завдань, які вони можуть виконувати. Сюди належать безпілотні літальні апарати, різноманітні роботи, що будуються на основі колісної або гусеничної платформ, а також крокуючі та плаваючі роботи. Всі вони мають певні особливості будови й застосовуються у специфічних умовах. Головне своє застосування мобільні роботи знаходять під час виконання різних завдань в умовах, де присутність людини неможлива або є загроза її життю, а також у різних важкодоступних для людини місцях. Вони використовуються для дослідження кар'єрів, інспекції вентиляційних шахт, огляду трубопроводів тощо. Саме через особливості застосування таких роботів постало питання вдосконалення їх будови та механічної структури. Для покращення прохідності роботів на нерівній, кам'янистій поверхні, або за наявності інших невеликих перешкод на шляху, варто звернути увагу на крокуючі роботи, які для переміщення використовують ноги. Така ідея з'явилася завдяки від спостереження за живими істотами, що існують у природі.

Біоніка – це окремий напрям робототехніки, що використовує механізми пересування живих істот в робототехніці. Така ідея виникла через необхідність «приспосовування» роботів до постійно змінюваних умов довкілля. З'явилася потреба у розробці для них органів сприйняття зовнішніх чуттів, аналогічних до людських або інших живих істот, таких як слух, зір, дотик. Сьогодні є декілька провідних фірм, що займаються розробкою біонічних роботів і гнучких схватів, що імітують кінцівки живих істот та дозволяють захопити об'єкт будь-якої форми. Цей напрям є досить перспективним, а тому існує потреба в розробці й дослідженні крокуючих мобільних платформ та інших біонічних систем.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Існує досить багато конструктивних та програмних рішень для різного типу крокуючих роботів. Напрямок біонічної робототехніки є досить популярним, і такі компанії, як Festo Robotics та Boston Dynamics, є всесвітньо відомими розробниками біонічної робототехніки. Також активний розвиток у цій сфері можливий завдяки працям вчених з різних куточків світу: Крайовського університету (Румунія), Вустерського політехнічного інституту (США), Університету Кассіно та Південного Лаціо (Італія), Національного університету океану Тайваню, а також Корей, Індонезії та інших країн.

В [1] розглянуто робота-гексапода із шістьма кінцівками, представлено конструкцію робота та процес переміщення його ніг. Розглянуто кінематичні моделі ноги робота, проведено відповідне моделювання в Matlab та SimMechanics. Також представлено моделювання траєкторії кінчика ноги та вимірювання похибок його руху. У [2] представлено масштабованого робота-гексапода, призначеного

для обслуговування, ремонту та експлуатації у віддаленому, важкодоступному, нерегулярному та небезпечному середовищі. Приведено аналіз стабільності та робочої області SHeRo. Виведено аналітичне рішення бічного стабільного робочого простору SHeRo разом із метрикою для порівняння стабільного робочого простору між різними конфігураціями роботів.

У [3] виконано огляд сучасного рівня роботи з шестиногими крокуючими роботами, посилаючись як на ранні дизайнерські рішення, так і на останні досягнення світової робототехніки. Ретельна увага приділяється основним питанням конструкції та обмеженням, які впливають на технічну доцільність й експлуатаційні характеристики робота. Зокрема, акцентовано увагу на механічній конструкції та конфігурації ніг робота, приводних та рушійних системах, корисному навантаженні, умовах руху.

У [4–6] запропоновано різні способи управління роботом-гексаподом, а також представлено аналіз алгоритму його ходьби. Наведено приклад використання нечіткої нейронної мережі та фільтра Калмана для управління роботом-гексаподом. Також представлено алгоритм стабілізації з використанням системи управління із замкнутим циклом з інерційним вимірювальним блоком як датчиком зворотного зв'язку. Система управління використовується для розрахунку кутів двигуна для досягнення стійкості на похилій поверхні. У [7] представлено опис того, як розробити симуляцію для моделювання управління роботом за допомогою ROS (операційна система для роботів) та Gazebo, а також оцінити похибки під час розрахунку траєкторії безпілотної літальної апаратури.

**Метою статті** є дослідження особливостей конструкції мехатронної системи «робота-гексапода» та реалізація його системи управління.

**Викладення основного матеріалу.** Робот-павук або гексапод – це мобільна платформа, що є біонічною системою, яка використовує для пересування шість ніг та імітує своїм зовнішнім виглядом і способом пересування павука (рис. 1). Його перевагами є висока прохідність на нерівних поверхнях порівняно з колісними платформами. Робот має шість рухомих ланок (РЛ) – «лапок». Достатньою умовою для забезпечення переміщення є наявність трьох РЛ, тому за пошкодження або відмови до трьох РЛ гексапод продовжуватиме функціонування. Детальніше ця інформація розглянута у статтях, присвячених крокуючим платформам [1–3].

Центральною частиною тіла робота-гексапода, як і живого павука, є грудна клітина, або основа, що складається з двох плоских частин, які поєднані між собою. До основи робота прикріплюються рухомі ланки (ноги) за допомогою спеціальних отворів у верхній та нижній частинах основи і спеціальним кріпленням на самих ланках. Кожна така рухома ланка складається з декількох частин, що забезпечує підвищені можливості маневрування робота. Рух ланок здійснюється завдяки сервоприводам. Загалом одна РЛ містить три серводвигуни, два з яких рухаються вертикально, забезпечуючи підйом ланки, та один – горизонтально, тим самим забезпечуючи робота можливістю переміщуватися вперед-назад.

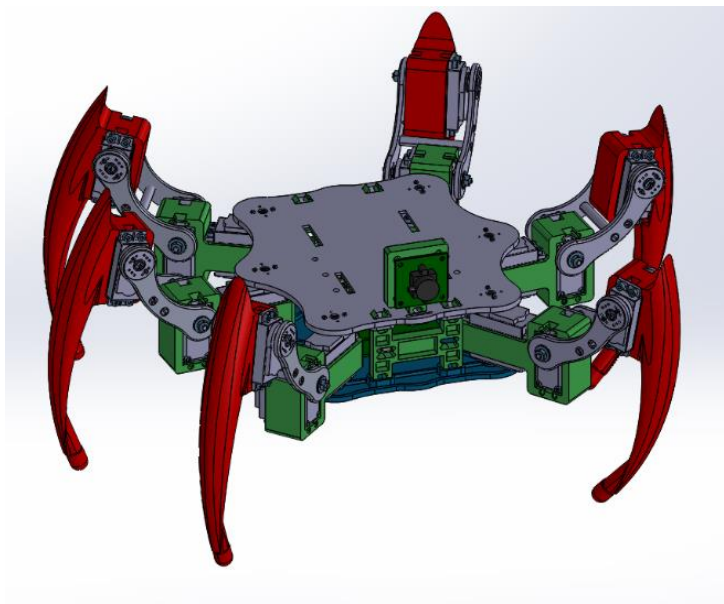


Рис. 1. Загальний вигляд спроектованого робота-гексапода

Задача керування переміщенням робота належить до групи транспортних задач. Її розв'язання полягає у плануванні переміщення робота із врахуванням інформації, що надходить з датчиків, які в свою чергу забезпечують загальний зворотний зв'язок, надаючи інформацію про різні параметри зовнішнього середовища. У такій реалізації робота використовується ультразвуковий датчик відстані для визначення перешкоди перед ним. Через особливості будови й спосіб переміщення робота встановлення

додаткових датчиків для визначення перешкод зліва та справа від нього виявилось недоцільним, або ж потребує додаткових надбудов чи зміни конструкції робота. Також використано камеру для отримання інформації про зовнішнє середовище, в якому знаходиться гексапод. Можливості аналізу зображення з камери, виділення контурів об'єктів суттєво поліпшить орієнтацію робота в просторі та дозволить вдосконалити його систему управління. В цілому всі використані для керування мобільної платформи компоненти зображені на структурній блок-схемі (рис. 2).

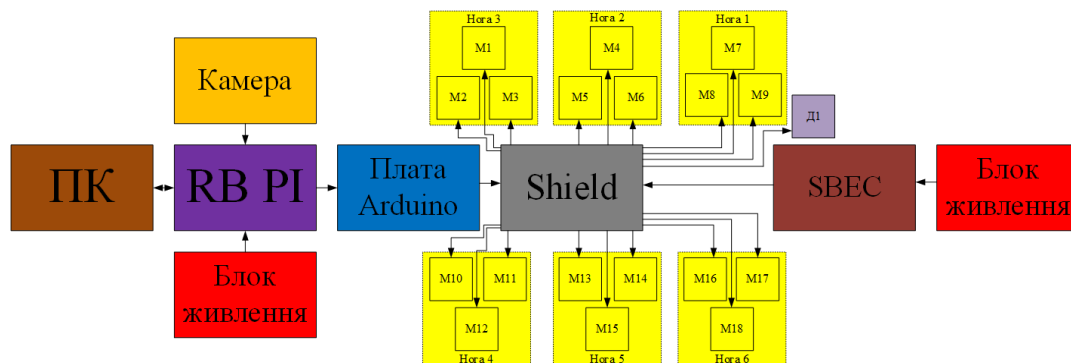


Рис. 2. Структурна блок-схема робота-гексапода

На рисунку 3 представлено розроблену функціональну схему системи керування мобільної автоматизованої системи «робота-гексапода». Загалом було обрано класичну конструктивну реалізацію робота, яка передбачає шість кінцівок із трьома ступенями рухомості. Вони розміщені симетрично, по три рухомі ланки з двох сторін робота і приводяться в рух завдяки вісімнадцяти серводвигунам, які на схемі позначені літерою М. Також до мікроконтролера Arduino під'єднано датчик газу QE, датчик температури TE та акселерометр GE для отримання відповідних даних та подальшого контролю, а також ультразвуковий датчик відстані EJE, за допомогою якого робот визначатиме перешкоди на своєму шляху.

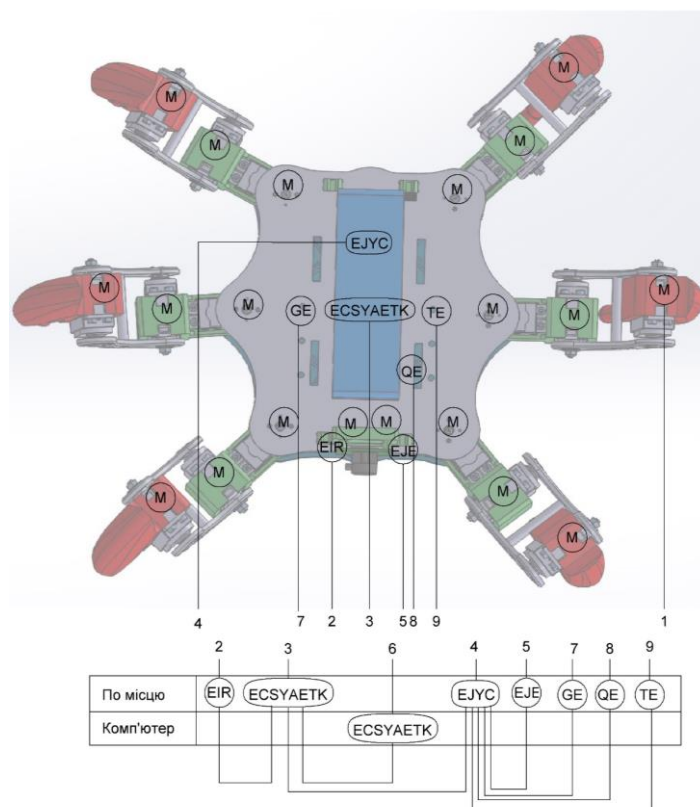


Рис. 3. Функціональна схема системи керування мобільної автоматизованої системи «робота-гексапода»: М – виконавчий механізм (серводвигун); EIR – камера; ECSYAETK – мінікомп'ютер Raspberry Pi; EJYC – мікроконтролер Arduino; EJE – ультразвуковий датчик відстані; GE – акселерометр; QE – датчик газу; TE – датчик температури

Інші два серводвигуни, що розміщені в передній частині робота, відповідають за стабілізацію камери EIR на основі показів з акселерометра GE по двом координатам. Камера EIR в свою чергу під'єднана до мінікомп'ютера Raspberry Pi ECSYAETK для здійснення трансляції відео й отримання таким чином даних про навколишнє середовище. З комп'ютера ECSYAETK надходить керуючий сигнал на мінікомп'ютер Raspberry Pi ECSYAETK, який у свою чергу керує мікроконтролером Arduino. Оператор за допомогою клавіатури або кнопок на html-сторінці вводить керуючі команди, що будуть передані на Raspberry Pi, а той передаватиме їх на мікроконтролер, і залежно від отриманого символу буде виконуватися відповідна дія. Зчитування даних з датчиків відбувається постійно і транслюється на моніторі оператора. Залежно від показів з акселерометра здійснюється стабілізація камери по двох осях.

Внутрішня структура робота є такою: персональний комп'ютер підключений до Raspberry PI 3b згідно з протоколом SSH, за допомогою якого здійснюється обмін даними для віддаленого управління; модуль камери під'єднано до Raspberry PI 3b за допомогою шлейфа до шини послідовного інтерфейсу CSI, по якому транслюється потокове відео; Arduino Mega 2560 та Raspberry PI 3b взаємодіють між собою через serial port (для передачі даних на Arduino). Головною функцією serial port є відправлення даних у послідовному ланцюгу біт за бітом. З Raspberry PI 3b надходять заздалегідь зазначені команди, що відповідають визначеним рухам робота, а контролер Arduino Mega 2560 приймає дані та відпрацьовує усі кутові положення ланок, які були задані програмно. Таким чином здійснюється переміщення робота.

Для здійснення рухів гексапода реалізовано алгоритм, що зображений на рисунку 4. Загальний алгоритм починається з ініціалізації даних. Наступний крок полягає у введенні команди користувачем. Користувач має ввести один із символів, якщо введений символ дорівнює символу керування, павук почне рух за певним алгоритмом.



Рис. 4. Загальний алгоритм руху робота-гексапода

Дистанційне керування здійснюється на відстані шляхом передачі даних через канали зв'язку для відпрацювання виконавчих механізмів. Для дистанційного керування гексапода було розроблено пульт, який представлено на рисунку 5.

```

Control Your HEXAPOD!

Moving forward: w
Moving back: s

a / d : rotate body left/right.

e: dance.
r: hello.
"q" to exit

Enter the command:

```

Рис. 5. Дистанційний пульт керування робота-гексапода

Під час введення символу «w, s» павук буде рухатися вперед до тих пір поки користувач через пульт управління не дасть іншу команду. Аналогічно для інших команд, окрім поворотів вліво та вправо. Також під час переміщення вперед та за наявності перешкоди, виявленої за допомогою ультразвукового датчика, рух гексапода буде зупинено. Під час введення одного із символів «a» або «d» павук поверне ліворуч або праворуч на 90 градусів, зупиниться та буде очікувати наступної команди.

Алгоритми рухів гексапода були розроблені на основі рухів мурахи. Справа в тому, що рухи мурахи влаштовані вкрай примітивно: всі її дії зводяться до елементарних операцій. Для зручного піднімання ніг гексапода було розроблено унікальні методи, завдяки яким можна одночасно здійснювати управління над двома, трьома ногами гексапода, що спрощує написання алгоритмів руху.

Кінцівки розділяються на дві групи – 034 та 125, які утворюють трикутник (рис. 6). Під час руху одна група ніг (034) підіймається, друга група ніг (125) залишається опорою на поверхні та відштовхує тіло павука вперед. Група 034 робить крок вперед в повітрі та опускає ніжки на землю, а група ніг 125 підіймається у повітря. Перша трійка ніг крокує вперед, і друга трійка опускає ніжки та ставить їх у початкове положення. Саме так здійснюється алгоритм ходьби.

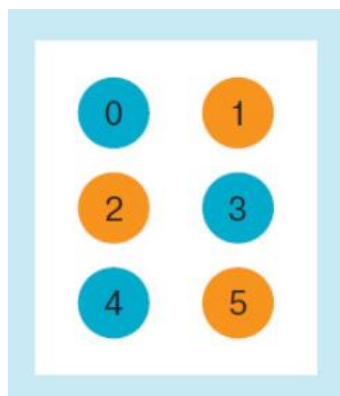


Рис. 6. Схематичне зображення алгоритму руху робота

На момент тестування розробленої установки, важливим етапом також є її попередній аналіз та моделювання. Програмне забезпечення для симуляції засноване на процесі моделювання реального явища за допомогою набору математичних формул. По суті, це програма, яка дозволяє користувачеві спостерігати за операцією за допомогою симулятора, не виконуючи цю операцію. Програмне забезпечення для симуляції широко використовується для проектування обладнання, а також на етапі розробки установок, щоб кінцевий продукт був якомога ближчим до проектних специфікацій без дорогих модифікацій процесу. Симуляційне програмне забезпечення з реагуванням у реальному часі часто використовується в іграх, але воно також має важливе значення у промисловості. Сам процес симуляції відбувається за рахунок того, що макет фактичної панелі управління підключається до моделювання фізичної реакції у режимі реального часу, забезпечуючи цінний досвід тренувань без страху катастрофічного результату.

Удосконалені комп'ютерні програми можуть імітувати поведінку електричних систем, погодних умов, електронних схем, хімічних реакцій, мехатроніки, теплових насосів, систем управління зворотним зв'язком, атомних реакцій і навіть складних біологічних процесів. Теоретично будь-яке явище, що зводиться до математичних даних та рівнянь, можна змоделювати на комп'ютері. Моделювання може бути важким, оскільки більшість природних явищ зазнає майже нескінченної кількості впливів. Одним із



прийомів розробки корисних моделей є визначення, які найважливіші фактори впливають на цілі моделювання. Окрім імітації процесів, щоб побачити, як вони поведуться в різних умовах, моделювання також використовується для перевірки нових теорій. Створивши теорію причинно-наслідкових зв'язків, теоретик може кодувати зв'язки у вигляді комп'ютерної програми. Якщо програма поводить себе так само, як і фактичний процес, існує велика ймовірність того, що запропоновані зв'язки є правильними.

Для роботи з роботизованими системами необхідно витратити значну кількість часу на розробку вбудованого програмного забезпечення для самого робота, а також для обладнання. Для цього потрібні навички машинобудування, електроніки та вбудованого програмування. Як правило, розроблені таким чином програми є більш схожі на вбудовані програми, на електроніку, ніж на робототехніку в прямому сенсі, адже здійснюється значне повторне використання програм, оскільки вони тісно пов'язані з базовим обладнанням. Основна ідея ОС з робототехніки – уникати повторного написання однакових програм і пропонувати використовувати стандартизовані функції, що виконують апаратне абстрагування.

ROS (Robot Operating System – операційна система для роботів) – це фреймворк для програмування роботів, що надає функціональність для розподіленої роботи. ROS забезпечує стандартні служби операційної системи, такі як: апаратну абстракцію, контроль пристроїв на низьких рівнях, реалізацію часто використовуваних функцій, передачу повідомлень між процесами, управління пакетами. ROS заснований на архітектурі графів, де обробка даних відбувається у вузлах, які можуть отримувати і передавати повідомлення між собою. Бібліотека орієнтована на Unix-подібні системи (Ubuntu Linux належить до переліку «підтримуваних», в той час як інші варіанти, такі як Fedora і Mac OS X, вважаються «експериментальними»). Завдяки широким можливостям ROS можна проводити моделювання управління роботом та його переміщення завдяки окремим інструментам. Gazebo є лідером у моделюванні роботів. Це інструмент, на який покладаються сотні тисяч користувачів та розробників у всьому світі. Так gazebo\_ros\_pkgs – це набір пакетів ROS, які надають необхідні інтерфейси для імітації робота в режимі жорсткого тіла Gazebo 3D для роботів. Він інтегрується з ROS, використовуючи ROS-повідомлення, послуги та динамічне переналаштування [7].

Відповідне моделювання проведено й із спроектованим роботом-гексаподом (рис. 7).

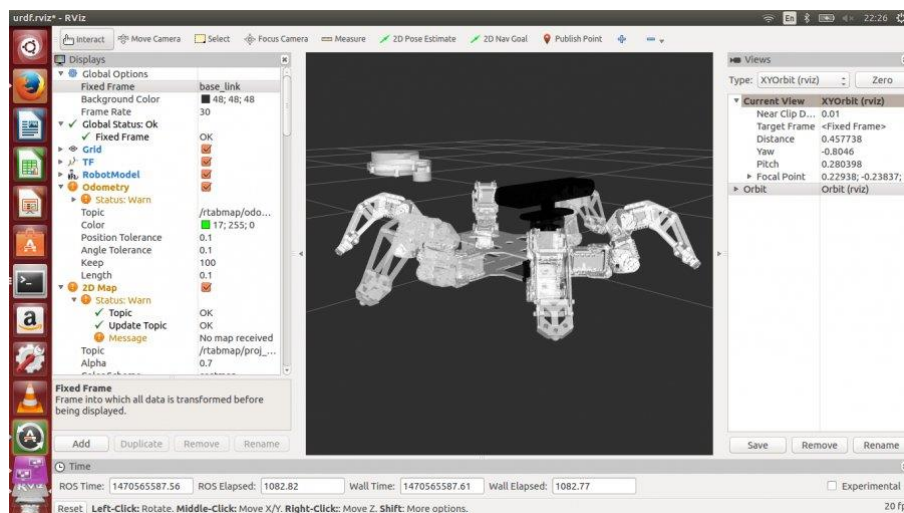


Рис. 7. Моделювання переміщення робота за допомогою ROS + Gazebo

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Розглянуто автоматизовану мехатронну систему «робот-гексапод». Встановлено особливості будови та застосування робота, досліджено спосіб та алгоритм переміщення мобільної платформи. У перспективі доцільно розглянути можливість аналізу зображення з камери для вдосконалення алгоритму роботи робота та його взаємодії з об'єктами навколишнього середовища.

#### Список використаної літератури:

1. Designing the legs of a hexapod robot : IEEE International Conference on System Theory Control and Computing / M.Nitulescu, M.Ivanescu, V.D.H. Nguyen, S.Manoiu-Olaru. – 2016. – P. 119–124.
2. Agheli M. SHeRo: Scalable hexapod robot for maintenance, repair, and operations / M.Agheli, L.Qu, S.S. Nestinger // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2014. – P. 478–488.
3. Tedeschi F. Design Issues for Hexapod Walking Robots / F.Tedeschi, G.Carbone // Robotics. – 2014. – Vol. 3, Issue 2. – P. 181–206 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.mdpi.com/2218-6581/3/2/181/htm>.
4. Chung H.Y. An Effective Hexapod Robot Control Design Based on a Fuzzy Neural Network and a Kalman Filter : IEEE Region Ten Symposium (Tensymp) / H.Y. Chung, Y.L. Chung, Y.J. Hung. – 2019. – P. 248–253.

5. Dynamic stability algorithm for a Hexapod Robot / *B. Veekshan Sree Sesha Sai, B. Akshay Kumar, B. Mani Rajesh Reddy, A.A. Nippun Kumar* // *Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*. – 2017. – P. 7–12.
6. Bionic learning algorithm and its application on hexapod robot's unknown environment exploration : 25th Chinese Control and Decision Conference / *Y.Jianjun, Z.Lu, D.Hongwei W.Guanwei*. – 2013. – P. 4410–4415.
7. *Sciortino C.* ROS/Gazebo-Based Simulation of Quadcopter Aircrafts : IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI) / *C.Sciortino and A.Fagiolini*. – 2018. – P. 1–6.

**References:**

- 1 *Nitulescu, M., Ivanescu, M., Nguyen, V.D.H. and Manoiu-Olaru, S.* (2016), «Designing the legs of a hexapod robot», *IEEE International Conference on System Theory Control and Computing*, pp. 119–124.
- 2 *Agheli, M., Qu, L. and Nestinger, S.S.* (2014), «SHeRo: Scalable hexapod robot for maintenance, repair, and operations», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 478–488.
- 3 *Tedeschi, F. And Carbone, G.* (2014), «Design Issues for Hexapod Walking Robots», *Robotics*, Vol. 3, Issue 2, pp. 181–206, [Online], available at: <https://www.mdpi.com/2218-6581/3/2/181/htm>
- 4 *Chung, H.Y., Chung, Y.L. and Hung, Y.J.* (2019), «An Effective Hexapod Robot Control Design Based on a Fuzzy Neural Network and a Kalman Filter» *IEEE Region Ten Symposium (Tensymp)*, pp. 248–253.
- 5 *Veekshan Sree Sesha Sai, B., Akshay Kumar, B., Mani Rajesh Reddy, B. and Nippun Kumar, A.A.* (2017), «Dynamic stability algorithm for a Hexapod Robot», *Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, pp. 7–12.
- 6 *Jianjun, Y., Lu, Z., Hongwei, D. and Guanwei, W.* (2013), «Bionic learning algorithm and its application on hexapod robot's unknown environment exploration», *25th Chinese Control and Decision Conference*, pp. 4410–4415.
- 7 *Sciortino, C. and Fagiolini, A.* (2018), «ROS/Gazebo-Based Simulation of Quadcopter Aircrafts», *IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*, pp. 1–6.

**Ткачук Андрій Геннадійович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2466-6299>.

Наукові інтереси:

- п'єзоелектричні чутливі елементи;
- сучасні інформаційно-вимірювальні системи;
- інтелектуальні мехатронні системи.

**Коваль Антон Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- проектування мобільних роботів;
- безпілотні літальні апарати;
- автоматизовані системи моніторингу забруднення повітря.

**Гуменюк Анна Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-5744-4599>.

Наукові інтереси:

- автоматизовані вимірювальні системи;
- гравіметрія;
- автоматизація проектування гнучких виробничих систем.

**Богдановський Мартін Віталійович** – старший викладач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2870-4248>.

Наукові інтереси:

- інтелектуальні мехатронні системи;
- автоматизація технологічної підготовки механоскладального машино- та приладобудівного автоматизованого виробництва;
- системи навігації рухомих об'єктів.

**Гриневич Марія Степанівна** – магістр Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- мобільна робототехніка;
- 3D-моделювання.

Стаття надійшла до редакції 08.04.2021.