

УДК 004.031.42: 004.383.8: 004.896  
DOI 10.31891/2307-5732-2020-285-3-4

Т. О. ГОВОРУЩЕНКО, М. В. КРАСОВСЬКИЙ,  
А. В. ГОРОШКО, А. А. ЯВНЮК  
Хмельницький національний університет

## МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ РУХУ КРОКУЮЧОЇ ПЛАТФОРМИ У БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІЙ КООПЕРАТИВНІЙ РОБОТОТЕХНІЧНІЙ СИСТЕМІ

*Проведений аналіз відомих методів та рішень в галузі кооперативної робототехніки свідчить про те, що при чималій кількості ефективних рішень наразі в галузі залишається ряд невирішених питань, зокрема, рух крокуючої платформи. В статті розроблено модель руху крокуючої платформи в пакеті MATLAB Simulink, спроектовано апаратну і програмну архітектуру майбутньої роботизованої системи, проведено розподіл обчислювальних ресурсів програм керування та побудовано блок-схему, що визначає загальний алгоритм дій крокуючої платформи. Описано основні елементи розробленої системи та побудовано структурну схему, що відображає основні зв'язки та взаємодії між компонентами системи.*

*Ключові слова: кооперативний робот, багатофункціональна кооперативна робототехнічна система, крокуюча платформа.*

T. NOVORUSHCHENKO, M. KRASOVSKYI, A. GOROSHKO, A. YAVNYUK  
Khmelnytskyi National University

## MODEL AND ALGORITHM OF THE WALKING (STEPPING) PLATFORM MOVING IN THE MULTI-FUNCTIONAL COOPERATIVE ROBOTIC SYSTEM

*The analysis of known methods and solutions in the field of cooperative robotics shows that with a large number of effective solutions, there are still a number of unresolved issues in the industry, in particular, the movement of the walking (stepping) platform, which is the purpose of this study. Cooperative robotics is a new branch of industrial robotics that enables joint production. Cooperative production largely depends on the availability of cooperative robot. The cooperative robot must meet the requirements of International Standards, the main of which is the standard ISO/TS 15066: 2016. The creation of cooperative robots that work in close contact with humans is a direction that is rapidly developing. Cooperative application, natural for such tasks, should provide absolute safety, high functional flexibility and autonomy of the robots used. This requires the development of new technologies in the field of management, the creation of new design solutions, the development of algorithms for planning and execution of movements that ensure the safety of physical interaction between man and robot. Given that the market for cooperative robots is projected to reach \$ 12,303 million by 2025 from \$ 710 million in 2018, i.e. will increase by 50.31% during 2018-2025, the urgent task now is to develop a multifunctional cooperative robotic system or technology. The paper develops a model of the walking (stepping) platform movement in the MATLAB Simulink, designed the hardware and software architecture of the future robotic system, allocated computing resources of control programs and built a block diagram that defines the general algorithm of the walking platform. The main elements of the developed system are described and a structural diagram is constructed, which reflects the main connections and interactions between the components of the system.*

*Keywords: cooperative robot, multifunctional cooperative robotic system, walking (stepping) platform.*

**Вступ.** Кооперативна робототехніка значною мірою залежить від наявності кооперативного (колективного, колаборативного) робота (кобота). Кооперативний робот – це варіант промислового робота, оснащеного системою сенсорів та комп'ютерного зору, що дозволяє з високим ступенем ймовірності попереджати зіткнення пристрою з людиною та перешкодами, включаючи ситуацію збою вбудованого програмного забезпечення [1]. Основна задача кооперативних роботів – допомогти розв'язати складні задачі, які неможливо автоматизувати. Кооперативний робот змінює поняття автоматизації від повністю автоматизованих операцій до напівавтономних операцій, де рішення працівника впливатимуть на дії кобота і навпаки [2].

Кооперативний робот повинен задовольняти вимогам Міжнародних стандартів, основним з яких є стандарт ISO/TS 15066:2016 [3], який є фактично технічною специфікацією, зокрема, вимог безпеки для коботів, для сумісної роботи промислових робототехнічних систем та робочого середовища.

Ринок кооперативних роботів прогнозовано досягне 12303 млн дол. США до 2025 р. з 710 млн дол. США у 2018 р., тобто зросте на 50,31 % протягом 2018–2025 років [4], відтак актуальною задачею наразі є розроблення багатофункціональної кооперативної робототехнічної системи або технології.

Аналіз літератури на предмет пошуку відомих методів та рішень для галузі кооперативної робототехніки був проведений авторами у [5]. Проведений аналіз відомих методів та рішень в галузі кооперативної робототехніки свідчить про те, що наразі все ж залишається велика кількість невирішених питань в цій галузі, зокрема, рух крокуючої платформи, що і є *метою даного дослідження*.

Створенням крокуючих машин і управлінням їх рухом займаються багато наукових колективів з усього світу [6]. Великий інтерес до цього напрямку дослідження пояснюється тим, що в порівнянні з традиційними методами переміщення (колісними, гусеничними), крокуючі системи володіють кращими характеристиками адаптації до опорної поверхні, а відповідно і більшою прохідністю. Адже, використання крокуючого методу пересування дає великий вибір налаштувань додаткових параметрів, таких як довжина кроку, висота корпусу відносно опорної поверхні та швидкість пересування. Оскільки система побудована за ієрархічним принципом, вона формує єдиний механізм за рахунок створення керуючих сигналів для певної кількості елементарних, незалежних функціонуючих виконуючих механізмів, кожен з яких виконує своє власне завдання і таким чином вносить свій внесок у формування руху [7]. Завдяки незалежним один

від одного опорним механізмам, корпус системи може переміщуватися у будь-якому напрямку, уникаючи небезпечних ділянок та постійно змінюючи свої точки опори [8]. В наш час існує безліч розробок та наукових досліджень з даної тематики, але внаслідок того, що цим займаються в більшості комерційні структури, інформація про всі результати та нові технології знаходиться в закритому доступі, що значно ускладнює розвиток та розроблення таких систем. В основі руху більшості крокуючих систем лежить метод, заснований на способі переміщення комах, завдяки високим показникам стійкості руху. В наш час постійно з'являються нові алгоритми руху крокуючих роботів, внаслідок модернізації і комбінування вже існуючих, але в основі будь-якого з них лежить імітування біологічного руху тварин.

**Модель руху крокуючої платформи.** Для забезпечення рівномірного і прямолінійного руху крокуючої платформи необхідно точно визначити кінцеве положення кожного рухомого сегменту опорного механізму маючи лише його початкові координати. Для цього в програмному пакеті MATLAB Simulink було створено модель руху, в основі якої лежить математичне рівняння вирішення прямої задачі кінематики. Блок-схему, зображену на рис. 1, умовно розділено на групи, кожна з яких відповідає за моделювання і вирішення певної частини задачі.

Група *a* містить усю початкову інформацію для нормальної роботи системи, де  $S_x$  та  $S_y$  – відстань, на яку потрібно здійснити переміщення опорного механізму відносно осей  $x$  та  $y$ ;  $a$  та  $b$  – початкові кути нахилу сервоприводів;  $l_1, l_2, l_3$  – довжини основних сегментів опорного механізму.

Група *b* містить функціональний блок, що відповідає за розрахунок початкової проекції опорного механізму та положення сегменту  $L1$ .

Група *c* містить функціональний блок, що відповідає за розрахунок проекції висоти опорного механізму і положення сегментів  $L2$  та  $L3$ .

Групи *d, e* містять функціональні блоки, які опираючись на попередні результати розрахунків, визначають кінцеві положення кутів сервоприводів  $a$  та  $b$ .

Група *f* містить функціональний блок, що відповідає за візуалізацію отриманих розрахунків у вигляді діаграми після завершення моделювання.

Отримана математична модель є спільною для усіх крокуючих систем типу *quaduped* (конструкція даного типу систем містить чотири точки опори і тому краще пристосована до пересування по нерівномірній поверхні; рух реалізується шляхом почергового переміщення одного з чотирьох опорних механізмів, в той час як три інші підтримують корпус в стабільному положенні [9]; центр ваги після кожного кроку змінюється, але стійкість системи залишається сталою) з двома ступенями свободи опорного механізму. Вона дозволяє встановити максимальну відстань, на яку може зміститися система, не переміщуючи опорного механізму та гранично допустимі кути повороту сервоприводів, а також експериментальним шляхом підібрати основні положення сегментів опорного механізму для його переміщення в задану точку.

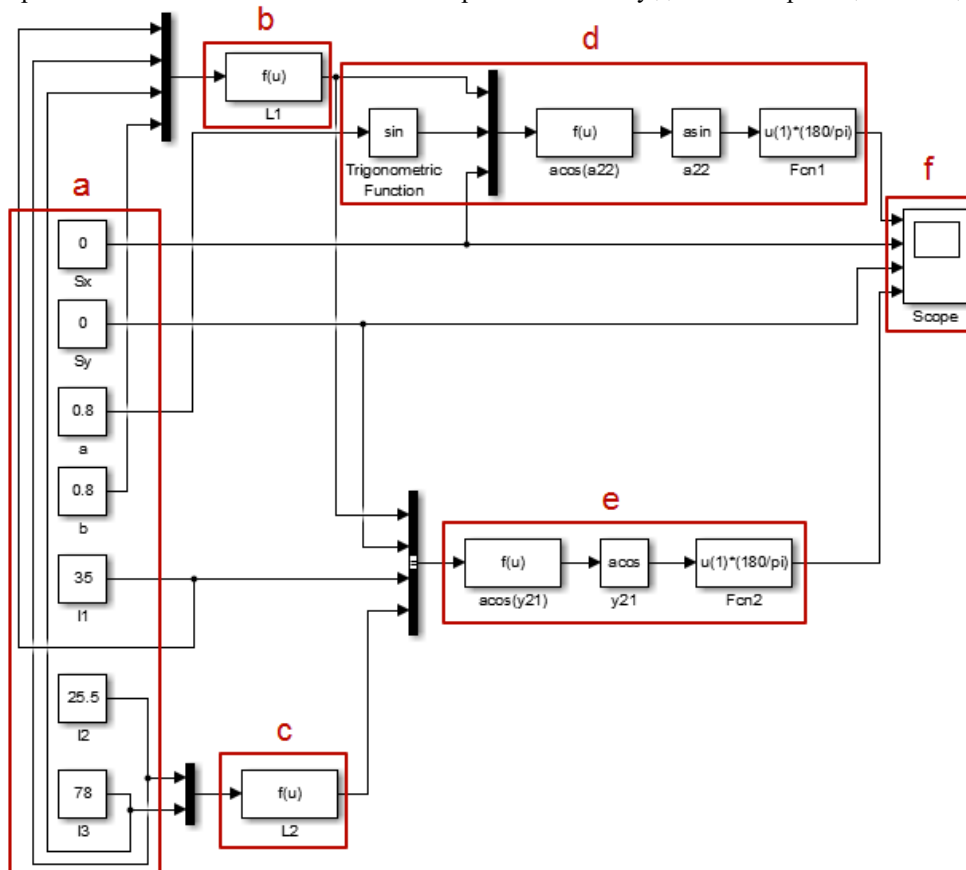


Рис. 1. Модель руху крокуючої платформи в Matlab Simulink

Для перевірки адекватності та достовірності отриманої моделі руху було проведено тестування (рис. 2) з наступними параметрами:

- довжина сегментів:  $L1 = 35$ ,  $L2 = 25.5$ ,  $L3 = 78$ .
- початкові кути положення:  $a = 80^\circ$ ,  $b = 80^\circ$ .
- точки переміщення:  $S_x = 8$ ,  $S_y = 4$ .

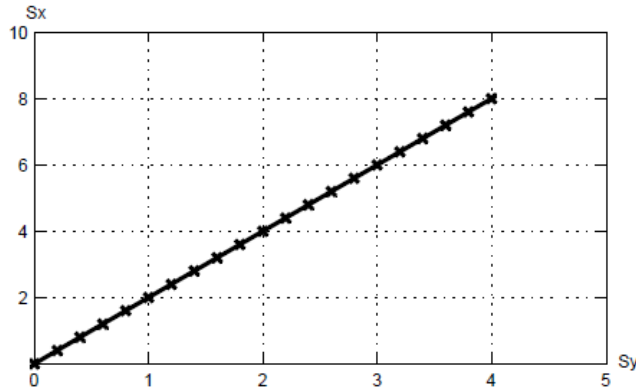


Рис. 2. Результат роботи моделі руху крокуючої платформи

**Алгоритм руху крокуючої платформи.** Структуру програмного алгоритму крокуючої системи можна умовно розділити на три керуючі рівні:

- перший рівень відповідає за керування сервоприводами та формує діапазон переміщення опорних механізмів.
- другий рівень відповідає за реалізацію руху та само стабілізацію положення корпусу системи в просторі.
- третій рівень визначає алгоритм руху та напрямок в залежності від отриманого керуючого сигналу.

Перший і другий рівні реалізуються автоматично, тоді як третій постійно очікує команди від керуючого пристрою. Послідовність виконання операцій та алгоритм роботи відображає блок-схема (рис. 3).



Рис. 3. Блок-схема алгоритму руху крокуючої платформи

Для відображення загальної концепції розробленої системи було побудовано структурну схему (рис. 4). Принцип дії системи наступний: Bluetooth модуль отримує команду від керуючого пристрою і передає її по інтерфейсу UART мікроконтролеру, який залежно від отриманого сигналу виконує певний сценарій дій. Сценарій представляє собою послідовність рухів (кутів повороту) сервоприводів.

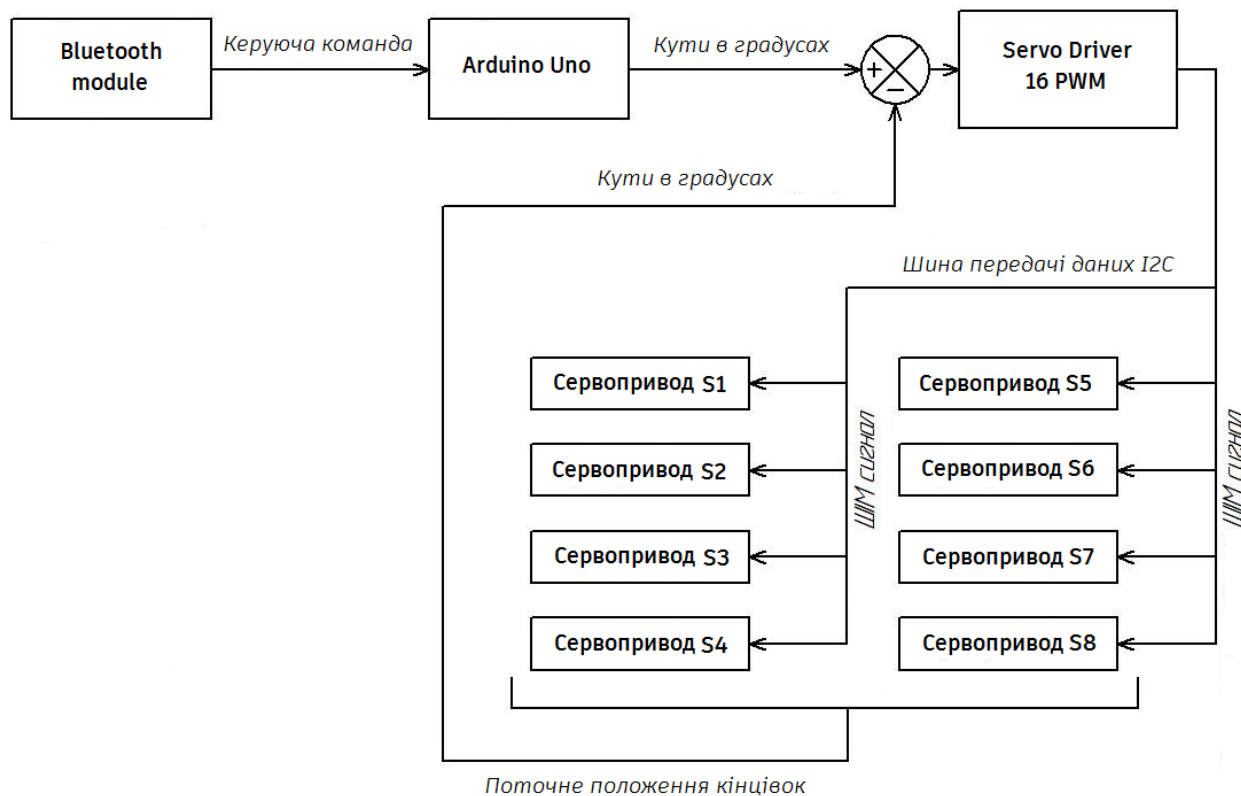


Рис. 4. Структурна схема робота типу quadruped

Головним критерієм якості розроблюваної системи є висновок про її працездатність. У зв'язку з тим, що система складається з великої кількості рухомих частин, дуже складно передбачити заздалегідь їх майбутню поведінку, тому було проведено моделювання трьох основних аспектів: досліджено рух системи вперед, назад, ліворуч, праворуч; досліджено точність переміщення; визначено коефіцієнти запасу міцності та деформації. Для початкового аналізу і тестування алгоритмів руху було використано 3D модель робота quadruped, що розроблена в середовищі програмування Virtual Python.

**Висновки.** Проведений аналіз відомих методів та рішень в галузі кооперативної робототехніки свідчить про те, що за чималої кількості ефективних рішень наразі в галузі залишається ряд невирішених питань, зокрема, рух крокуючої платформи. В статті розроблено модель руху крокуючої платформи в пакеті MATLAB Simulink, спроектовано апаратну і програмну архітектуру майбутньої роботизованої системи, проведено розподіл обчислювальних ресурсів програм керування та побудовано блок-схему, що визначає загальний алгоритм дій крокуючої платформи. Описано основні елементи розробленої системи та побудовано структурну схему, що відображає основні зв'язки та взаємодії між компонентами системи.

### Література

1. Innovation in robotics and safety. URL: <https://controlengrussia.com/innovatsii/innovatsii-v-robototekhnike-i-bezopasnost/>.
2. Sadik A. R. Towards a Complex Interaction Scenario in Worker-cobot Reconfigurable Collaborative Manufacturing via Reactive Agent Ontology / S. R. Sadik, B. Urban // The 9-th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management: Proceedings (Madeira, November 1–3, 2017). – Madeira (Portugal), 2017. – P. 27–38.
3. ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices – Collaborative robots. – [Introduced 01.06.2016]. – Geneva (Switzerland) : ISO, 2016. – 38 p. – (International standard).
4. Collaborative robot market projected to grow at a CAGR of 50.31% from 2018 to 2025. URL: <https://www.reportsnreports.com/reports/650005-collaborative-robots-market-by-payload-up-to-5-kg-up-to-10-kg-above-10-kg-application-industry-and-geography-global-forecast-to-2022.html>.
5. Говорушченко Т.О. Сучасні проблеми багатofункціональних кооперативних робототехнічних систем / Т. О. Говорушченко, М. В. Красовський, В. В. Шамрелюк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2019. – № 30 (106). – С. 134–146.
6. Бройль Т. В. Встраиваемые робототехнические системы: проектирование и применение мобильных роботов со встроенными системами управления / Т. В. Бройль. – Ижевск : ИКИ, 2012. – 520 с.
7. Мельник А. А. Мобильные роботы компании «К-Team» для решения специфических технических задач / А. А. Мельник, В. Ф. Борисенко, В. Н. Хоменко, П. С. Плис // Вісник Кременчутського державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 4 (63). – С. 36–39.

8. Chavez-Clemente D. Gait Optimization for Multi-legged Walking Robots, with Application to a Lunar Hexapod : Ph.D. Thesis / D. Chavez-Clement. – USA : Stanford University, 2011.

9. Карпенко А. П. Робототехника и системы автоматизированного проектирования : [учебное пособие] / А. П. Карпенко. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 71 с.

#### References

1. Innovation in robotics and safety. URL: <https://controlengrussia.com/innovatsii/innovatsii-v-robototekhnike-i-bezopasnost/>.
2. Sadik A. R. Towards a Complex Interaction Scenario in Worker-cobot Reconfigurable Collaborative Manufacturing via Reactive Agent Ontology / S. R. Sadik, B. Urban // The 9-th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management: Proceedings (Madeira, November 1–3, 2017). – Madeira (Portugal), 2017. – P. 27–38.
3. ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices – Collaborative robots. – [Introduced 01.06.2016]. – Geneva (Switzerland) : ISO, 2016. – 38 p. – (International standard).
4. Collaborative robot market projected to grow at a CAGR of 50.31% from 2018 to 2025. URL: <https://www.reportsnreports.com/reports/650005-collaborative-robots-market-by-payload-up-to-5-kg-up-to-10-kg-above-10-kg-application-industry-and-geography-global-forecast-to-2022.html>.
5. Hovorushchenko T.O. Suchasni problemy bahatofunktsionalnykh kooperatyvnykh robototekhnichnykh system / T.O. Hovorushchenko, M. V. Krasovskyi, V. V. Shamreliuk // Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. – 2019. – № 30 (106). – S. 134–146.
6. Broiln T. V. Vstraivayemye robotekhnicheskiye systemy: proektyrovanye y prymeneneye mobylnykh robotov so vstroennymy systemamy upravleniya / T. V. Broiln. – Yzhevsk : YKY, 2012. – 520 с.
7. Melnyk A. A. Mobylnye roboty kompanyy «K-Team» dlia resheniya spetsyficheskyykh tekhnicheskyykh zadach / A. A. Melnyk, V. F. Borysenko, V. N. Khomenko, P. S. Plys // Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – 2010. – № 4 (63). – S. 36–39.
8. Chavez-Clemente D. Gait Optimization for Multi-legged Walking Robots, with Application to a Lunar Hexapod : Ph.D. Thesis / D. Chavez-Clement. – USA : Stanford University, 2011.
9. Karpenko A. P. Robototekhnika y systemy avtomatyzirovannoho proektyrovanya : [uchebnoe posobyе] / A. P. Karpenko. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 71 с.

Надійшла / Paper received: 21.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 02.06.2020