

Т.О. ГОВОРУЩЕНКО, М.В. КРАСОВСЬКИЙ, А.А. ЯВНЮК

Хмельницький національний університет

## МОДЕЛЬ ТА МЕТОД СТАБІЛІЗАЦІЇ ОДНОВІСНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ КООПЕРАТИВНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

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, стабілізація одновісної платформи, що і є метою даного дослідження. В статті розроблено модель стабілізації одновісної платформи за допомогою PID-алгоритму в пакеті MATLAB Simulink. Розроблено також метод дослідження якості алгоритмів стабілізації одновісної платформи.

**Ключові слова:** кооперативний робот, багатофункціональна кооперативна робототехнічна система, одновісна платформа, алгоритм стабілізації.

T.O. HOVORUSHCHENKO, M.V. KRASOVSKYI, A.A. YAVNYUK

Khmelnytskyi National University

## MODEL AND METHOD OF STABILIZATION OF THE SINGLE-AXIS PLATFORM FOR A MULTI-FUNCTIONAL COOPERATIVE ROBOTIC SYSTEM

The conducted analysis of known methods and solutions in the field of cooperative robotics shows that there are still a large number of unresolved issues in this area, in particular, the stabilization of the single-axis 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 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 analysis of known methods and solutions in the field of cooperative robotics shows that there are still a large number of unresolved issues in this area, in particular, the stabilization of the single-axis platform. The paper develops a model for stabilizing a single-axis platform using the PID algorithm in the MATLAB Simulink, which allows fine-tuning additional parameters of a single-axis platform and optimizing transients, which emerge due to external factors that negatively affect the real prototype. A method for studying the quality of a single-axis platform stabilization algorithms has also been developed, as a result of which graphs are constructed for each of a single-axis platform stabilization algorithms, according to which the quality of the stabilization algorithm can be analytically determined - each graph is compared to others, the lower and narrower graph indicates more quality algorithm of stabilization of a single-axis platform.

**Keywords:** cooperative robot, multifunctional cooperative robotic system, single-axis platform, stabilization algorithm.

### Вступ

Кооперативна робототехніка – це нова галузь промислової робототехніки, яка дає можливість спільного виробництва. Кооперативне виробництво 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. Такі роботи призначені для використання в тісній кооперації з людьми, поруч з ними. Кооперативний робот повинен мати наступні якості: відсутність необхідності в інтеграції (вся система повинна бути роботоздатною одразу); відсутність необхідності в програмуванні або навчанні (робот повинен бути готовим до роботи за лічені хвилини); наявність широких функційних можливостей; наявність розвинутої логіки для роботи з врахуванням оточуючої обстановки, включаючи автоматичне відновлення після збоїв; забезпечення безпеки при експлуатації (навіть при зіткненні з оператором на повному ході) [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].

Створення кооперативних роботів, які працюють в тісному контакті з людиною, – напрям, який інтенсивно розвивається. Актуальність розроблення таких роботів обумовлена необхідністю надання допомоги людям при виконанні важких робіт на промислових підприємствах і повсякденних робіт по дому, догляді за похилими людьми та інвалідами, медичному обслуговуванні в лікарнях та післяопераційній реабілітації, забезпеченні дозвілля та навчання. Кооперативне застосування, природне для подібних задач, передбачає абсолютну безпеку, високу функційну гнучкість та автономність використовуваних роботів. Для цього необхідне розроблення нових технологій в галузі управління, створення нових конструктивних рішень, розроблення алгоритмів планування та виконання рухів, які забезпечують безпеку фізичної взаємодії людини та робота [3].

Кооперативний робот повинен задовольняти вимогам Міжнародних стандартів, основним з яких є стандарт ISO/TS 15066:2016 [4], який є фактично технічною специфікацією, зокрема, вимог безпеки для коботів, для сумісної роботи промислових робототехнічних систем та робочого середовища.

Враховуючи, що ринок кооперативних робіт 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 [5], актуальною задачею наразі є розроблення багатофункціональної кооперативної робототехнічної системи або технології.

Аналіз літератури на предмет пошуку відомих методів та рішень та розроблення кооперативної робототехніки був проведений авторами у [6]. 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, стабілізація одновісної платформи, що і є метою даного дослідження.

**Модель стабілізації одновісної платформи за допомогою PID-алгоритму**

Для підвищення якості стабілізації алгоритму, заснованого на використанні PID-регулятора, одновісна платформа потребує точного налаштування додаткових параметрів та оптимізації перехідних процесів, що виникають внаслідок наявності зовнішніх чинників і негативно впливають на реальний прототип. Для вирішення цієї проблеми було розроблено модель стабілізації одновісної платформи за допомогою PID-алгоритму в пакеті MATLAB Simulink (рис. 1).

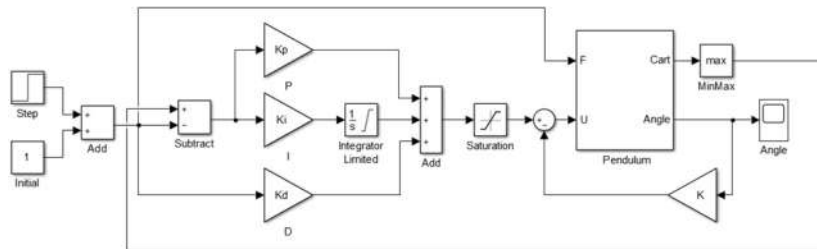


Рис. 1. Модель стабілізації одновісної платформи за допомогою PID-алгоритму в Matlab Simulink

Розроблену модель можна умовно розділити на три частини, де перша містить усю початкову інформацію для нормальної роботи системи, друга складається з функціональних блоків, що відповідають за відтворення пропорційного, інтегрального та диференційного регуляторів, а третя містить математичні блоки, що відповідають за розрахунок поточного положення інвертованого маятника, амплітуди його коливань та блоку візуалізації отриманих даних, який на основі попередніх результатів розрахунків формує діаграму стабільності системи (рис. 2).

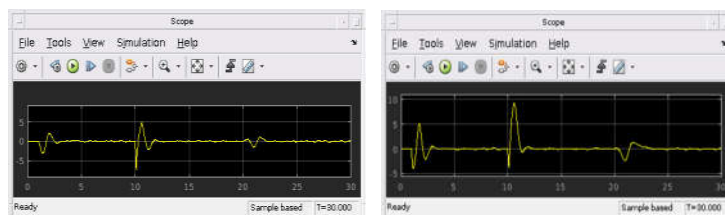


Рис. 2. Результат роботи розробленої моделі стабілізації одновісної платформи за допомогою PID-алгоритму

**Метод дослідження якості алгоритмів стабілізації одновісної платформи**

При розробці систем автоматичної стабілізації тіла в просторі, виникає необхідність підтримки параметра стабілізації в діапазоні заданих значень. Теорія автоматичного керування для цієї мети пропонує використовувати різні методи, серед яких математична модель на основі рівняння Ейлера-Лагранжа та PID-регулятор [7–12].

Функціонування методу передбачає наявність експериментальної зони, що обмежуватиме переміщення одновісної платформи, її розмір визначається в залежності від габаритів досліджуваної системи за наступними відношеннями:  $M=1.5:1$ ,  $L=8:1$  (рис. 3). Зону умовно розділено на вісім секторів  $a, b, c, d, e, f, g$ , ширина яких визначається залежно від ширини досліджуваної системи  $n=1:1$ .

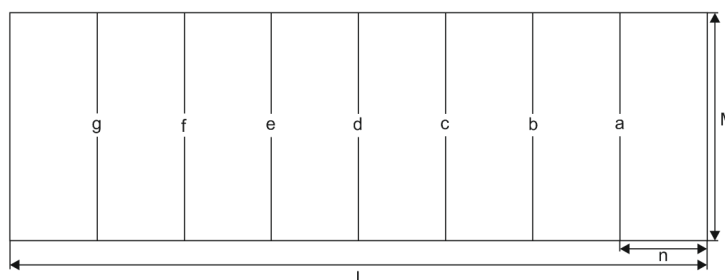


Рис. 3. Експериментальна зона переміщення одновісної платформи

Метод дослідження якості алгоритмів стабілізації одновісної платформи складається з наступних етапів:

- 1) Одновісну систему необхідно розмістити в центрі зони дослідження  $d$ .
- 2) Протягом часового інтервалу  $t$ , що визначається в залежності від швидкості руху системи, необхідно визначити кількість перетинів окремо ліній  $a$  та  $g$ .

- 3) Протягом наступного часового інтервалу  $t_1$  необхідно визначити кількість перетинів окремо ліній  $b$  та  $f$ .
- 4) Протягом наступного часового інтервалу  $t_2$  необхідно визначити кількість перетинів окремо ліній  $c$  та  $e$ .
- 5) Побудувати графік на основі отриманих результатів, де на осі  $x$  – відобразити назви секторів, а на осі  $y$  – кількість їх перетину одновісною платформою.
- 6) Етапи 1–5 повторити для всіх алгоритмів стабілізації одновісної платформи.

В результаті роботи описаного методу будуть побудовані графіки для кожного з алгоритмів стабілізації одновісної платформи. Якість алгоритму стабілізації визначається аналітичним шляхом – чим нижчим і «вужчим» є один графік в порівнянні з іншими, тим якіснішим є алгоритм стабілізації, який описує даний графік.

Для порівняння якості алгоритмів стабілізації одновісної платформи було побудовано зону дослідження (рис. 4), де рух інвертованого маятника 1 обмежувався зоною 2, по краях якої було розміщено фотодатчики 3 та 4, навпроти яких знаходилися світлодіоди 5 і 6. Коли досліджувана система під час своєї стабілізації перетинала умовні лінії 7 та 8, це фіксував мікроконтролер, головним завданням якого було підрахувати кількість перетинів окремо ліній 7 та 8. Протягом кожних двох хвилин здійснювалось переміщення датчиків на 8 сантиметрів все ближче до центру зони дослідження, після кожного зміщення датчиків мікроконтролер окремо визначав кількість перетинів кожного нового сегменту.

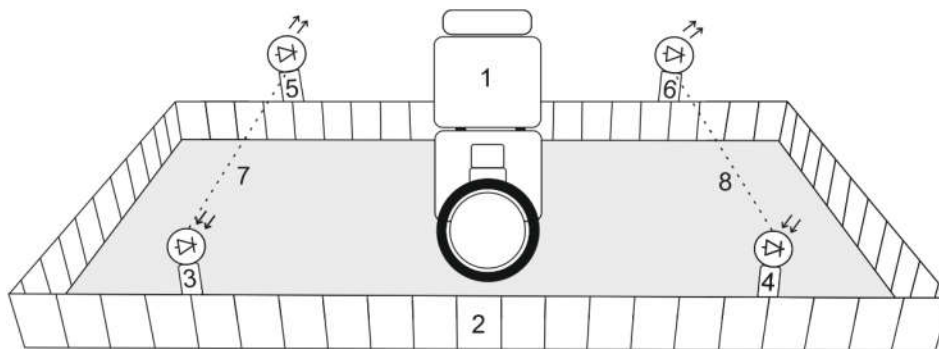


Рис. 4. Макет експериментальної зони переміщення одновісної платформи

На рис. 5 представлено результат порівняння двох алгоритмів стабілізації – математичної моделі на основі рівняння Ейлера-Лагранжа (частина 1 рис. 5) та пропорційно-інтегрально-диференціального (PID) регулятора (частина 2 рис. 2). Оскільки графік частини 2 рис. 5 є нижчим і «вужчим», то більш якісним є алгоритм пропорційно-інтегрально-диференціального (PID) регулятора.

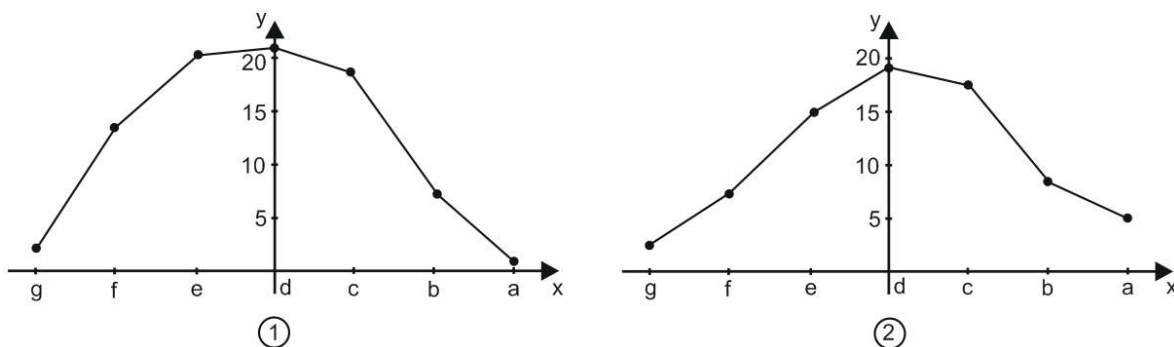


Рис. 5. Результат порівняння двох алгоритмів стабілізації – математичної моделі на основі рівняння Ейлера-Лагранжа (частина 1 р) та пропорційно-інтегрально-диференціального (PID) регулятора (частина 2)

В роботі [13] авторами проведено порівняння систем стабілізації тіла в просторі з використанням аналітичного дослідження, яке також дало можливість обрати PID-регулятор за основу для побудови системи стабілізації, отже, роботоздатність та коректність результатів функціонування розробленого методу підтверджуються іншими дослідженнями.

### 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, стабілізація одновісної платформи. В статті розроблено модель стабілізації одновісної платформи за допомогою PID-алгоритму в пакеті MATLAB Simulink, яка дозволяє виконати точне налаштування додаткових параметрів одновісної платформи та оптимізувати перехідні процеси, що виникають внаслідок наявності зовнішніх чинників і негативно впливають на реальний прототип. Розроблено також метод дослідження якості алгоритмів стабілізації одновісної платформи, в результаті якого будуються графіки для кожного з алгоритмів стабілізації одновісної платформи, згідно з якими аналітичним шляхом можна визначити якість алгоритму стабілізації – чим нижчим і «вужчим» є один графік в порівнянні з іншими, тим якіснішим є алгоритм стабілізації, що описується даним графіком.

## Література

1. Innovation in robotics and safety [Electronic resource]. – Access mode : <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. Spasskyi B. Soft robotics in cooperative tasks: the state and prospects of development / B. Spasskyi, V. Titov, I. Shardyko // Robotics and technical cybernetics. – 2018. – Vol. 1(18). – P. 14–25.
4. ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices – Collaborative robots. – [Introduced 01.06.2016]. – Geneva (Switzerland) : ISO, 2016. – 38 p. – (International standard).
5. Collaborative robot market projected to grow at a CAGR of 50.31% from 2018 to 2025 [Electronic resource]. – Access mode : <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>.
6. Говорущенко Т.О. Сучасні проблеми багатofункціональних кооперативних робототехнічних систем / Т. О. Говорущенко, М. В. Красовський, В. В. Шамрелюк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2019. – № 30 (106). – С. 134–146.
7. Формальский А. М. О стабилизации перевернутого маятника с неподвижной или подвижной точкой подвеса / А. М. Формальский // ДАН. – 2006. – Т. 406. – № 2. – С. 175–179.
8. Арановский С. В. Синтез наблюдателя в задаче стабилизации обратного маятника с учетом ошибки в датчиках положения / С. В. Арановский, А. Э. Бирюк, Е. В. Никульчев, И. В. Рядчиков, Д. В. Соколов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 2. – С. 145–153
9. Гусев А. Синтез и исследование модели глобального экспоненциально-устойчивого наблюдателя угловой скорости для обратного маятника с маховиком / А. Гусев, Е. Никульчев, И. Рядчиков, Д. Соколов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2018. – № 3. – С. 129–137.
10. Золотухин Ю. Управление перевернутым маятником с подвижной точкой подвеса / Ю. Золотухин, А. Нестеров // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – № 3. – С. 291–297.
11. Мартыненко Ю. Г. Маятник на подвижном основании / Ю. Г. Мартыненко, А. М. Формальский // Доклады Академии Наук. – 2011. – Том 439. – № 6. – С. 746–751.
12. PID-регуляторы [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://www.bookasutp.ru/Chapter5.aspx>
13. Говорущенко Т.О. Порівняння систем стабілізації тіла в просторі для побудови макету для демонстрації можливостей платформи Arduino / Т. О. Говорущенко, А. А. Явнюк, Є. Г. Гнатчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2019. – № 2. – С. 118–123.

## References

1. Innovation in robotics and safety [Electronic resource]. – Access mode : <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. Spasskyi B. Soft robotics in cooperative tasks: the state and prospects of development / B. Spasskyi, V. Titov, I. Shardyko // Robotics and technical cybernetics. – 2018. – Vol. 1(18). – P. 14–25.
4. ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices – Collaborative robots. – [Introduced 01.06.2016]. – Geneva (Switzerland) : ISO, 2016. – 38 p. – (International standard).
5. Collaborative robot market projected to grow at a CAGR of 50.31% from 2018 to 2025 [Electronic resource]. – Access mode : <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>.
6. Hovorushchenko T.O. Suchasni problemy bahatofunktsionalnykh kooperatyvnykh robototekhnichnykh system / T. O. Hovorushchenko, M. V. Krasovskiy, V. V. Shamreliuk // Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. – 2019. – № 30 (106). – S. 134–146.
7. Formalskiy A. M. O stabilizatsii perevernutogo mayatnika s nepodvizhnoy ili podvizhnoy tochkoj podvesa / A. M. Formalskiy // DAN. – 2006. – T. 406. – № 2. – S. 175–179.
8. Aranovskiy S. V. Sintez nablyudatelya v zadache stabilizatsii obratnogo mayatnika s uchetom oshibki v datchikah polozheniya / S. V. Aranovskiy, A. E. Biryuk, E. V. Nikulchev, I. V. Ryadchikov, D. V. Sokolov // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. – 2019. – № 2. – S. 145–153
9. Gusev A. Sintez i issledovanie modeli globalnogo eksponencialno-ustojchivogo nablyudatelya uglovoj skorosti dlya obratnogo mayatnika s mahovikom / A. Gusev, E. Nikulchev, I. Ryadchikov, D. Sokolov // Prikaspijskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii. – 2018. – № 3. – S. 129–137.
10. Zolotuhin Yu. Upravlenie perevernutym mayatnikom s podvizhnoy tochkoj podvesa / Yu. Zolotuhin, A. Nesterov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2018. – № 3. – S. 291–297.
11. Martynenko Yu. G. Mayatnik na podvizhnom osnovanii / Yu. G. Martynenko, A. M. Formalskiy // Doklady Akademii Nauk. – 2011. – Tom 439. – № 6. – S. 746–751.
12. PID-regulyatory [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa : <https://www.bookasutp.ru/Chapter5.aspx>
13. Hovorushchenko T.O. Porivniannia system stabilizatsii tila v prostori dlia pobudovy maketu dlia demonstratsii mozhlyvostei platformy Arduino / T. O. Hovorushchenko, A. A. Yavniuk, Ye. H. Hnatchuk // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2019. – № 2. – S. 118–123.