

Кваша Ю.В.

Національний університет «Одеська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ МАС ДВОКОЛІСНОГО САМОБАЛАНСУЮЧОГО РОБОТА НА ЯКІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ

Підійшовши до четвертої промислової революції, людство стало дедалі більше використовувати роботи в повсякденному житті. Роботи виконують хатні обов'язки, вирішують наукові завдання, стають складниками промислових систем керування й навіть військових підрозділів. Дослідження незнайомих землянам планет, океанічних глибин, переміщення вантажів, виконання завдань за умови наявності радіоактивного випромінювання або високих температур, відсутності або низької концентрації кисню в повітрі, залучення роботів до виконання типових завдань на заводах і фабриках – лише короткий список сфер, де сьогодні вже працюють перші прототипи.

Реалізація завдань управління роботами відкриває для сфери автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій широке поле досліджень. Сьогодні однією з найбільш розповсюджених в Україні моделей роботів є роботи-балансери. Це й складники системи з перевезення вантажів у портах, і помічники-розвідники рятувальних служб під час обвалів у шахтах чи визволенні людей з-під завалів житлових будинків, і добре знайомі кожному Сегвей. Головним завданням управління такими прототипами є стабілізація їхнього руху відповідно до заданого маршруту.

Після вирішення завдання керування руху двоколісних роботів можна приступати до надання прототипу додаткових функцій. Наприклад, завдання керування рухом робота за допомогою Bluetooth чи Wi-fi модулів, можливість оминати перешкоди на шляху, підйом і переміщення вантажу, приєднання до корпусу руки-маніпулятора, засобів фото- й відеофіксації тощо.

Об'єктом управління дослідженої в статті системи є двоколісний самобалансуючий робот. Розглянуто основні принципи побудови моделі перевернутого маятника, на якому базується математична модель об'єкта управління.

Приведено перелік необхідних деталей для побудови прототипу двоколісного робота, показано схему каскадної автоматизованої системи керування таким прототипом, описано принцип регулювання швидкості руху. Проведено експериментальне дослідження впливу зміщення центру мас прототипу на якість регулювання його швидкості руху. Показано графіки відповідних перехідних процесів і надано їх аналіз.

Ключові слова: двоколісний робот, самобалансуючий робот, регулювання швидкості руху, модель перевернутого маятника, каскадна система регулювання, зміщення центру мас.

Постановка проблеми. За свідченням експертів Boston Consulting Group, уже у 2030 році світовий ринок роботехніки може збільшитися в десять разів, досягнувши \$260 млрд США. Усього спеціалісти виділяють три шляхи розвитку цієї індустрії:

1. Зростання індивідуалізації. Цей шлях найбільш близький і зрозумілий відповідно до того, що відбувається в науково-технічній сфері сьогодні. Компанії почнуть створювати кастомізованих роботів. Їх основним завданням стане виконання завдань окремих споживачів. Наприклад, це може бути робот-збирач овочів, фруктів чи ягід або робот-медик, який буде здатний брати зразки крові для аналізу.

2. Поширення автоматизації. У такому випадку роботи можуть зайняти повноцінні робочі місця:

з'являться роботи-кур'єри, роботи, призначені для збірки окремих приладів чи роботи, здатні обслуговувати автомобілі на заправних станціях.

3. Розвиток штучного інтелекту. Такі роботи будуть здатні виконувати складні й динамічні завдання в аеропортах, на вокзалах чи в готелях.

Розробка самобалансуючих двоколісних роботів є перспективний напрямом розвитку інженерії сьогодні. Роботи-балансери можуть замінити людську працю у виконанні типових завдань переміщення, а також стати базою для розробки більш складних прототипів.

Отже, необхідно мати чітке розуміння щодо балансування двоколісних роботів, щоб у майбутньому перейти до ускладнення їхнього функціоналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Двоколісний самобалансуючий робот є рухомою

електромеханічною системою, як об'єкт управління є нестійким і має нелінійну природу. Кожне колесо робота керується незалежним кроковим двигуном або двигуном постійного струму.

Завдання керування полягає в підтримці прототипу у вертикальному положенні рівноваги в нерухомому стані, а також у розрахунку оптимального кута нахилу прототипу під час його руху.

Вертикальне положення рівноваги двоколісного самобалансуючого робота досягається аналогічним чином завдання стабілізації перевернутого маятника на візку.

З математичної точки зору завдання стабілізації перевернутого маятника може бути приведено до двох основних кроків:

1. Якщо кут нахилу зміщений управо, то візок має рухатися вправо й навпаки.

2. Положення візку x стосовно його центру мас стабілізується шляхом перерахунку нульового кута положення візку. Це величина відхилення від положення рівноваги, яку система намагається звести до нуля. Вона зумовлює відхилення стрижня перевернутого маятника стосовно центру візка та спричиняє стабілізацію положення там, де кут відхилення розташований точно вертикально. Будь-які зміщення чи відхилення роблять систему нестабільною.

Якщо переміщення візку буде позитивним, то неочікуваний рух управо спричинить наступним кроком рух уліво. Щоб стабілізувати положення маятника, система виконає ще один рух знову вправо. Отже, стабільним станом для системи двоколісного самобалансуючого робота, за основу математичної моделі якого взята модель перевернутого маятника, є коливальний рух у межах допустимого інтервалу відхилення регулювання величини від показника завдання.

У статті [1] запропонована конструкція та система керування в реальному часі двоколісного робота, побудованого за принципом перевернутого маятника.

У статті [2] описана математична модель двоколісного самобалансуючого робота, оснащеного двома моторами-редукторами постійного струму, у просторі станів.

У статті [3] розглянуто метод навігації двоколісного робота в неструктурованому просторі з наявними в ньому перешкодами. Запропоновано використання нечіткого регулятора для вирішення завдання керування.

У статті [4] представлено процеси розробки прототипу двоколісного самобалансуючого робота та його моделювання в просторі станів за допомогою програми Matlab Simulink.

У роботі [5] автором спроектовано та сконструйовано обладнання для двоколісного балансуєчого робота за принципом Сегвей. Для усунення недоліків системи, побудованої лише на основі аналітичної моделі без урахування витрат на тертя у двигунах, запропоновано SISO ПІД-компенсатор і SISO-компенсатор випередження-запізнення.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження якості регулювання швидкості руху автоматизованої системи управління двоколісного самобалансуючого робота за умови зміщення його центру мас за допомогою власноруч збудованого прототипу.

Виклад основного матеріалу дослідження. У статті досліджена модель самобалансуючого двоколісного робота з двома ведучими колесами. Робот побудовано на основі двох платформ з органічного скла, двох крокових двигунів із використанням плати Arduino Micro з процесором ATmega 32U4.

На верхній платформі розташовано плата Arduino Micro, драйвери крокових двигунів, акселерометр MPU 6050 і модуль Bluetooth. На нижній платформі реалізована схема живлення 5В та 12В, джерело живлення у вигляді трьох батарейок INR 18650-30Q. Крокові двигуни NEMA17 JK42HS40-1704 кріпляться безпосередньо до лівого й правого колеса та з'єднуються з драйверами на нижній платформі. Висоту кріплення кожної платформи можна довільно змінювати.

Зовнішній вигляд прототипу представлений на рис. 2.а.

Алгоритм самобалансування двоколісного робота реалізований із використанням каскадної системи регулювання з ПІ-регулятором швидкості й ПІД-регулятором кута нахилу прототипу.

Збурення надходить в об'єкт управління. Це може бути поштовх або будь-яке інше зміщення, у результаті чого робот виходить із положення рівноваги. ПІ-регулятор швидкості розраховує оптимальний цільовий кут нахилу прототипу. Ця величина порівнюється з положенням прототипу в теперішній момент часу.

Розрахована різниця між цільовим кутом і наявним кутом нахилу прототипу надходить у ПІД-регулятор кута нахилу прототипу. Тут обчислюється величина керуючого впливу, яка надходить у драйвери крокових двигунів, а звідки – до самих моторів. Колеса обертаються.

Налаштування ПІ-регулятора швидкості й ПІД-регулятора кута нахилу робота підібрані експериментальним шляхом. Програмний код для Arduino Micro написано з використанням середовища Arduino IDE.

Керування роботом здійснюється зі смартфона на базі Android-системи з використанням Bluetooth-модуля. Для управління напрямком руху робота розроблено додаток на основі Kewlsoft Bluetooth Electronics. Інтерфейс додатку для керування напрямком руху двокісного самобалансуючого робота представлено на рис. 1.

Результати дослідження. Базовим станом моделі вважається робот із піднятою верхньою платформою. Зміна центру мас робота досягається шляхом зміщення верхньої платформи вниз. Базовий та експериментальний види прототипу показано на рис. 2.

Після зміщення центру мас налаштування регулятора зміни не зазнавали. Ступінчатий вхідний сигнал моделюється за допомогою джойстика та надходить до прототипу з використанням техно-

логії Bluetooth. Пристрій приведено в положення «вверх» у максимальному відхиленні одним рухом.

Перехідний процес після надання ступінчатого вхідного сигналу на модель у базовому й експериментальному станах показано на рис. 3.

Характеристика перехідних процесів після надання ступінчатого впливу на модель у базовому й експериментальному стані описана в таблиці 1.

Проаналізувавши графіки перехідних процесів, зображених на рис. 3, і дані, представлені в таблиці 1, можемо стверджувати таке: зміщення центру мас прототипу покращує якість його керування.

Амплітуда коливань у досліді з використанням двокісного робота з центром мас вище колісної платформи вища, ніж у випадку, коли центр мас знаходиться ближче до коліс. Період коливань



Рис. 1. Інтерфейс додатка для керування напрямком руху двокісного самобалансуючого робота

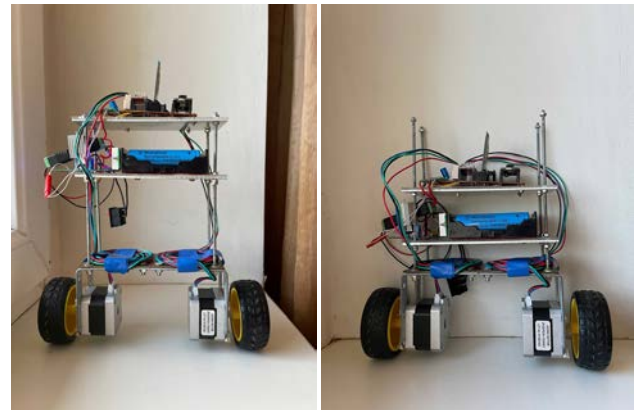


Рис. 2. Двокісний самобалансуючий робот: а) базовий стан; б) експериментальний стан

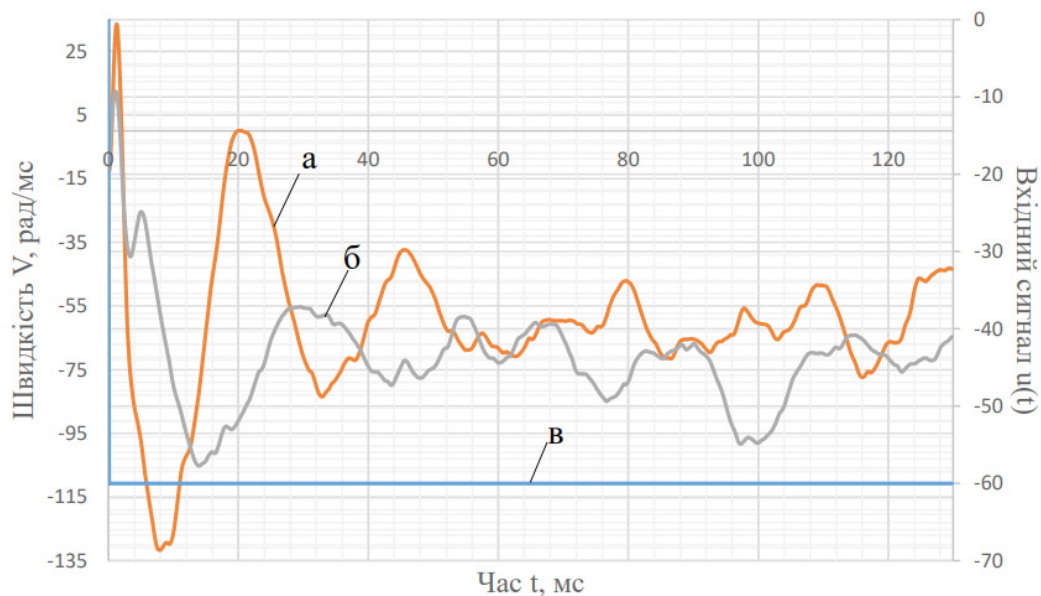


Рис. 3. Перехідний процес після надання ступінчатого впливу на модель: а) у базовому стані; б) в експериментальному стані; в) вхідний сигнал

прототипу в експериментальному вигляді більшій, ніж у базовому. Це є показником більш плавного перехідного процесу.

Під час другого експерименту вхідний сигнал надається за допомогою пружини. На рис. 4 зображено перехідні процеси після виведення робота зі стану рівноваги шляхом поштовху в базовому й експериментальному стані прототипу.

Характеристика перехідних процесів після надання ступінчатого впливу на модель у базовому й експериментальному стані описана в таблиці 2.

Проаналізувавши графіки перехідних процесів, показані на рис. 4, а також дані, подані в таблиці 2, можемо стверджувати, що прототип в експериментальному стані забезпечує більш якісний перехідний процес.

Величина максимального відхилення після зміщення центру мас ближче до блоку коліс

стала значно меншою. Перехідний процес більш плавний, робот стабілізується краще. На графіку процес стабілізації відображений коливальними рухами з амплітудою від -25 рад/мс до 15 рад/мс. Зменшилися час регулювання та період коливань.

Висновки. У результаті дослідження теоретичних матеріалів і проведення експериментів визначено: після зміщення центру мас ближче до колісної платформи якість регулювання покращується. У дослідях із прототипом в експериментальному стані спостерігається менша величина максимального відхилення, час регулювання та період коливань у стабільному стані.

При розробці прототипів двоколісних самобалансуючих роботів надалі краще основну масу робота розміщувати ближче до платформи коліс, щоб покращити якість його руху.

Таблиця 1

Характеристика перехідних процесів після надання ступінчатого впливу на модель у базовому та експериментальному стані

Характеристика	Базовий стан моделі	Експериментальний стан моделі
Величина максимального відхилення, рад/с	131,65	105,29
Час регулювання T_p , мс	-	-
Період коливань T_k , мс	18,5	27,7

Таблиця 2

Характеристика перехідних процесів після надання ступінчатого впливу на модель у базовому та експериментальному стані

Характеристика	Базовий стан моделі	Експериментальний стан моделі
Величина максимального відхилення, рад/мс	224,37	129,78
Час регулювання T_p , мс	90,8	84,7
Період коливань T_k , мс	23,2	21,7

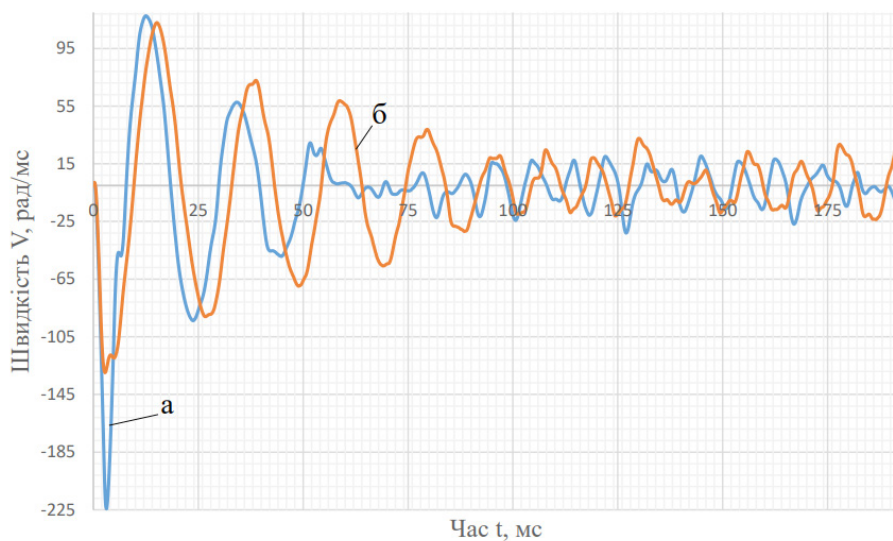


Рис. 4. Перехідні процеси після надання імпульсного вхідного впливу на модель: а) у базовому стані; б) в експериментальному стані

Список літератури:

1. Nawawi S.W., Ahmad M.N., Osman J.H.S. Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2008. Vol. 2. № 3. P. 406–412.
2. Modeling of two-wheeled self-balancing robot driven by DC gearmotors by / P. Frankovský, L. Dominik, A. Gmitterko, I. Virgala, P. Kurylo, O. Perminova. *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 22. № 3. P. 739–747. URL: <https://sciendo.com/pdf/10.1515/ijame-2017-0046> (дата звернення: 10.12.2021).
3. Kocaturk B. Motion control of wheeled mobile robots. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*. 2015. № 13 (1). P. 41–47 URL: <https://www.indecs.eu/2015/indecs2015-pp41-47.pdf> (дата звернення: 29.11.2021).
4. Modeling and Control of a Two-Wheeled Auto-Balancing Robot: a didactic platform for control engineering education. URL: http://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/full_papers/FP556.pdf (дата звернення: 19.12.2021).
5. Bageant M.R. Balancing a Two-Wheeled Segway Robot. Massachusetts Institute of Technology. Boston, USA, 2011. 57 p. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/69500/775672333-MIT.pdf?sequence=2> (дата звернення: 03.01.2022).

Kvasha Yu.V. RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE DISPLACEMENT OF TWO-WHEELED SELF-BALANCING ROBOT'S CENTER OF MASS ON THE QUALITY OF SPEED REGULATION

As the fourth industrial revolution approached, humanity began to use work more and more in everyday life. Robots do their homework, solve scientific problems, become part of industrial management systems and even military units. Exploring planets unfamiliar to the earth, ocean depths, moving cargo, performing tasks in the presence of radiation or high temperatures, lack or low concentration of oxygen in the air, attracting robots to perform typical tasks in plants and factories-just a short list of areas where they work today the first prototypes.

The implementation of work management tasks opens a wide field of research for the field of automation and computer-integrated technologies. Today, one of the most common models of robots in Ukraine are balancer robots. These are both components of cargo transportation systems in ports, and rescue assistants during landslides in mines or the release of people from the rubble of residential buildings, and are well known to every Segway. The main task of managing such prototypes is to stabilize their movement in accordance with the specified route.

After solving the problem of controlling the movement of two-wheeled robots, you can begin to provide a prototype of additional functions. For example, the task of traffic control works with Bluetooth or Wi-fi modules, the ability to avoid obstacles in the way, lifting and moving loads, attaching to the body of the hand-manipulator, photo and video fixation and more.

The object of control studied in this article of the system is a two-wheeled self-balancing robot. The basic principles of construction of the inverted pendulum model, on which the mathematical model of the control object is based, are considered.

The article lists the necessary details for the construction of a prototype two-wheeled robot, shows a diagram of a cascade automated control system for such a prototype, describes the principle of speed control. An experimental study of the effect of displacement of the center of mass of the prototype on the quality of regulation of its speed. The article shows the graphs of the corresponding transients and provides their analysis.

Key words: *two-wheeled robot, self-balancing robot, speed control, inverted pendulum model, cascade control system, center of mass displacement.*