

**РОЗРОБКА ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРИСТРОЮ ДЛЯ
ТРАНСПОРТУВАННЯ МАЛОГАБАРИТНИХ ВАНТАЖІВ****О. Ю. ЗАРІВНИЙ**, аспірант

E-mail: Alex-zar@ukr.net

Ю. О. РОМАСЕВИЧ, доктор технічних наук, професор

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net

Національний університет біоресурсів і природокористування України[https://doi.org/10.31548/dopovidi6\(106\).2023.024](https://doi.org/10.31548/dopovidi6(106).2023.024)

Анотація. У роботі описано процес створення фізичної моделі (прототипу) пристрою для транспортування малогабаритних вантажів, яка дає змогу перевіряти роботу алгоритмів стабілізації та керуванням руху даного класу пристроїв. Розроблено CAD-модель пристрою та на її основі проведено збірку фізичної моделі пристрою. На базі мікроконтролера STM32 розроблено систему стабілізації положення пристрою, яка отримує сенсорну інформацію від акселерометра і гіроскопа. Розроблено програмний код опитування та обробки даних з датчиків та керування приводами. Проведені тестові випробування і збір даних при стабілізації положення пристрою. Виконано короткий аналіз даних та вказано перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

Ключові слова: двоколісний пристрій, фізична модель, керування рухом, нестійка динамічна система

Актуальність. Процеси переміщення товарів є характерною рисою сучасного виробництва, сфери послуг та побуту. Для переміщення різного роду товарів застосовуються різні засоби починаючи від великих транспортних машин, закінчуючи пішими кур'єрами та доставкою на велосипедах, роках чи звичайних візках. В умовах складського зберігання товарів у межах закритої території малогабаритний товар транспортують люди у візках або вручну. Ця праця є виснажливою і вона регламентується максимальною масою товару, який переносить робітник за один раз, а також

загальною масою товару, яку він може перенести за зміну. Тому використання пристроїв, які полегшують людську працю також дає змогу зменшити кількість робітників та зменшити рівень їхнього фізичного навантаження.

Крім того, сучасна сфера послуг у великих містах в значній мірі спирається на служби доставки (доставки замовлень, товарів та їжі). Зазвичай цю функцію виконують кур'єри, які переміщуються на велосипедах, скутерах або пішки. В деяких технологічно розвинених країнах для цієї мети вже починають застосовувати літаючі дрони,

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

чотириколісні роботи та інші засоби. Однак вони мають певні недоліки і обмеження (літаючі дрони неефективні через значну кількість перешкод в місті, а чотириколісні роботи мають малу швидкість пересування та можуть спричинити виникнення небезпечних ситуацій для учасників дорожнього руху).

Запропонований у роботі прототип двоколісного засобу переміщення вантажів може мати переваги в швидкості доставки вантажів, не створюючи при цьому навантаження на транспортну мережу і, можливо, зменшуючи вартість послуг доставки. Тому доцільно було б дослідити можливість використання даного класу засобів переміщення для встановлення перспектив їхнього практичного використання.

Проектування такого пристрою починається із розробки і дослідження прототипу. Однак, вже на цьому етапі виникатиме проблема стабілізації його положення, яка є необхідною умовою його функціонування і представляє предмет даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розглядаючи двоколісні пристрої для переміщення вантажів, можна виділити їх два основні типи: з колесами на одній осі (гіроскутери), чи на різних (самокати, велосипеди, мотоцикли). Обидва ці типи є принципово нестійкими, а це означає, що необхідно застосовувати керування для набуття ними

властивості динамічної стійкості. Це, в свою чергу, викликає необхідність побудови математичної моделі тієї чи іншої механічної системи. Загалом більшість науковців та розробників таких пристроїв у свої дослідженнях використовують перший тип двоколісного пристрою, який відповідає відомій механічній системі «обернений маятник». Наукові роботи по дослідженню задач керування таких систем публікувались ще в минулому сторіччі. Однак, ця проблема є актуальною і до нині. Свідченням цього є значна кількість публікацій за тематикою ідентифікації моделі і синтезу оптимального керуванням руху пристрою типу «обернений маятник». Наприклад, застосування ПД-регулятора з нечіткою логікою [1] для стабілізації положення гіроскутера, яке, однак, не дає змогу досягнути високої якості руху. Зокрема, це стосується значного перерегулювання. Для вирішення цієї задачі, була застосована технологія штучних нейронних мереж [2]. В роботі [2] штучна нейронна мережа була навчена за парадигмою «з підкріпленням» і показала доволі швидке усунення коливань системи під час перехідного процесу. Метод параметризації SDRE [3] та [4], гібридний метод стабілізації GWO [5], пропорційний регулятор [6] – ось далеко не повний перелік застосованих підходів для вирішення цієї задачі.

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

У цілому можна відмітити спільну рису цих робіт, яка полягає в синтезі математичної моделі засобу переміщення вантажів. Відмінними рисами є механізми стабілізації пристроїв: починаючи від приводних коліс [7, 8], гіроскопів [6], реактивного колеса [9], закінчуючи механізмами, які для стабілізації зміщують центр ваги самого пристрою [10].

Кількість досліджень за тематикою синтезу керування двоколісними засобами переміщення вантажів, в яких колеса знаходяться на різних осях [9], є незначною. В таких роботах [11] розв'язуються задачі виведення математичної моделі складної механічної системи двоколісного роллерсерфа, керування рухом якого здійснюється за допомогою привода повороту рами. Інший приклад вирішення задачі балансування засобу – використання реактивного колеса [9], або двох гіроскопів [12]. Останній підхід дав змогу створити мотоцикл зі стабілізованим положенням [13]. Однак, недоліками реактивних коліс чи гіроскопів є постійне обертання значної маси, що призводить до великих енергозатрат і викликає необхідність збільшення габаритів самих пристроїв.

Проблематика досліджень у цій галузі не обмежується задачами стабілізації (наприклад побудова оптимальної траєкторії на основі комп'ютерного зору [14] або

орієнтування в просторі такого типу пристрою [15]).

Спосіб стабілізації положення динамічної системи, який є необхідною умовою функціонування пристрою для переміщення малогабаритних вантажів, за рахунок зміщення центра ваги зустрічається не часто. Однак, розробка раціональних сфер застосування такого пристрою потребує вивчення його динамічних характеристик. Остання можлива лише із використанням робочого прототипу пристрою. Саме цьому питанню і присвячена дана робота.

Метою роботи є розробка і створення фізичної моделі пристрою, яка дасть змогу виконувати апробацію алгоритмів стабілізації положення пристрою та керувати його рухом.

Методи. Для реалізації концепції пристрою для переміщення малогабаритних вантажів було запропоновано пристрій, який має схожість із конструкцією електросамоката і доповнений механізмом балансування та системою керуванням його рухом.

Першим етапом створення фізичної моделі пристрою є постановка вимог до створення моделі пристрою. Це має бути пристрій з двома колісними рушіями, типу самоката або мотоцикла. У конструкції також має бути передбачено механізм балансування,

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

що включає необхідні датчики, плату керування та систему живлення.

При розробці концепції пристрою для транспортування малогабаритних вантажів були задані головні вимоги, яким він повинен відповідати:

1) пристрій повинен бути мобільним, двоколісним з двома приводним колесами;

2) повинна забезпечуватись стійкість в повздовжньому напрямку руху, а механізм стабілізації не має містити реактивних коліс, або гіроскопів;

3) номінальна вантажопідйомність пристрою має становити 20 кг;

4) швидкість переміщення вантажу номінальної маси по горизонтальній поверхні складатиме 5 м/с;

5) пристрій повинен долати перешкоди (типу сходинка) вистою до 20 мм.

Наступним етапом у розробці пристрою є підбір комплектуючих та приблизна оцінка розмірів та габаритів пристрою. Факторами, які визначали геометричні параметри пристрою, виступали габаритні розміри необхідних приводів, акумуляторів та електронного обладнання.

Перед виготовленням кріплень та деталей в середовищі Solidworks було розроблено 3D модель установки (рис. 1).

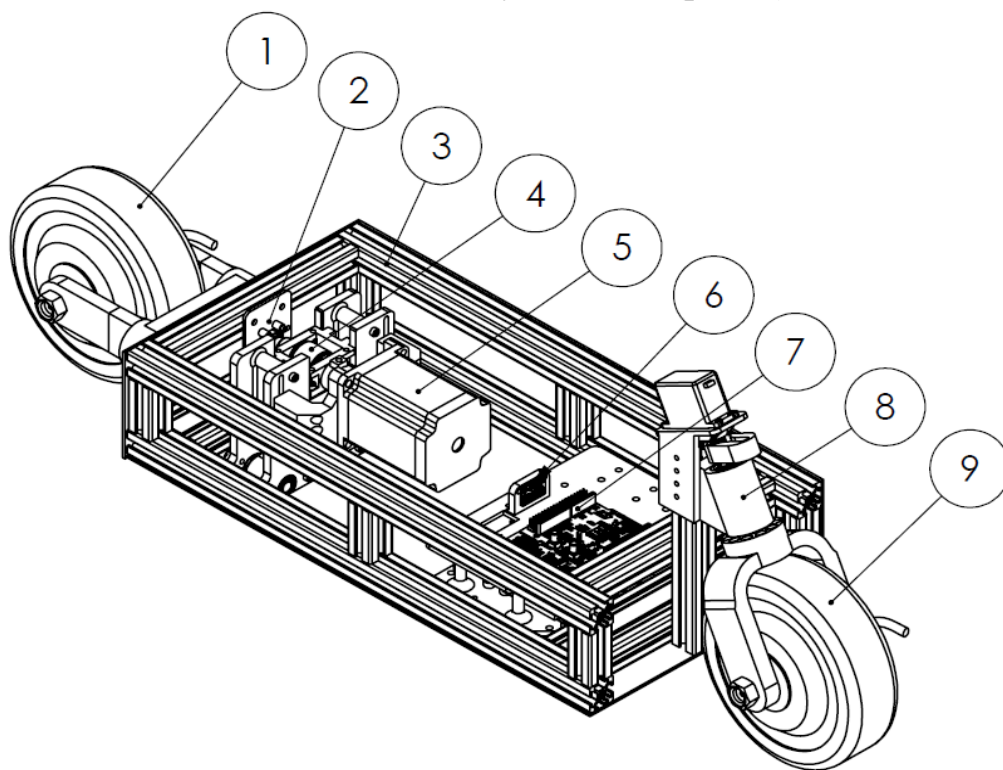


Рис. 1. 3D-модель пристрою для транспортування малогабаритних вантажів: 1) заднє приводне мотор-колесо; 2) датчик повороту заднього колеса; 3) рама пристрою; 4) механізм балансування; 5) кроковий електродвигун; 6) гіроскоп; 7) плата керування; 8) поворотна стійка з механізмом повороту колеса; 9) переднє приводне мотор-колесо

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

Рама пристрою (рис. 2) виконана з станкового профілю 20x20 мм, її габаритні розміри складають

400x200x80 мм. Передня стійка має висоту 150 мм. Рама закривається алюмінієвим листом товщиною 2 мм.

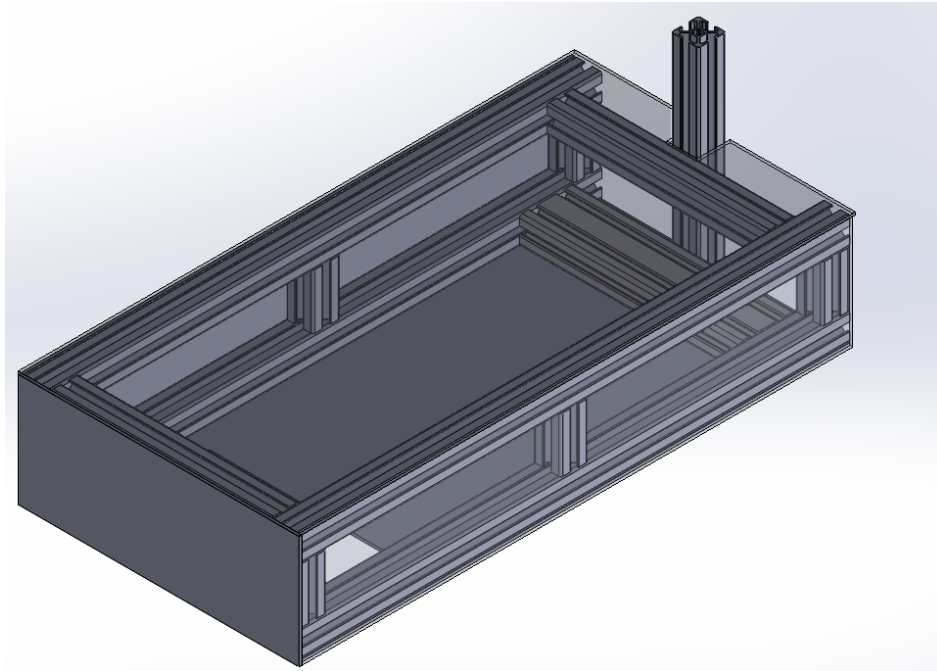


Рис. 2. Модель рами пристрою

На передній стійці знаходиться кріплення переднього колеса (рис. 3) з сервоприводом, який створює рушійний момент 20 кгс·см. Було розроблено і надруковано на 3D-

принтері вилку переднього колеса, корпус стійки підшипників, муфту для з'єднання валу сервопривода та валу переднього колеса.

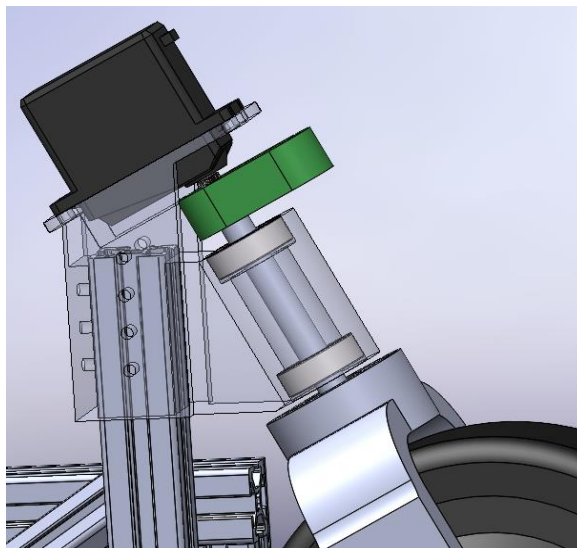


Рис. 3. Модель кріплення переднього колеса та сервопривода

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

В якості рушіїв пристрою використано мотор-колеса (позиції 1 та 9 на рис. 1) та драйвери керування (для кожного окремих). Їхня номінальна потужність становить 200 Вт, максимальна швидкість 25 км/год, напруга живлення 24 В. Механізм стабілізації пристрою (рис. 4) знаходиться позаду і виконує дві

функції: кріплення заднього колеса і балансування пристрою шляхом зміщення колеса відносно вертикальної осі. Приводом механізму балансування служить двофазний кроковий двигун (позиція 5 на рис. 1) NEMA23 (крок повороту ротора рівний $1,8^\circ$). Ним керує драйвер SH-750.

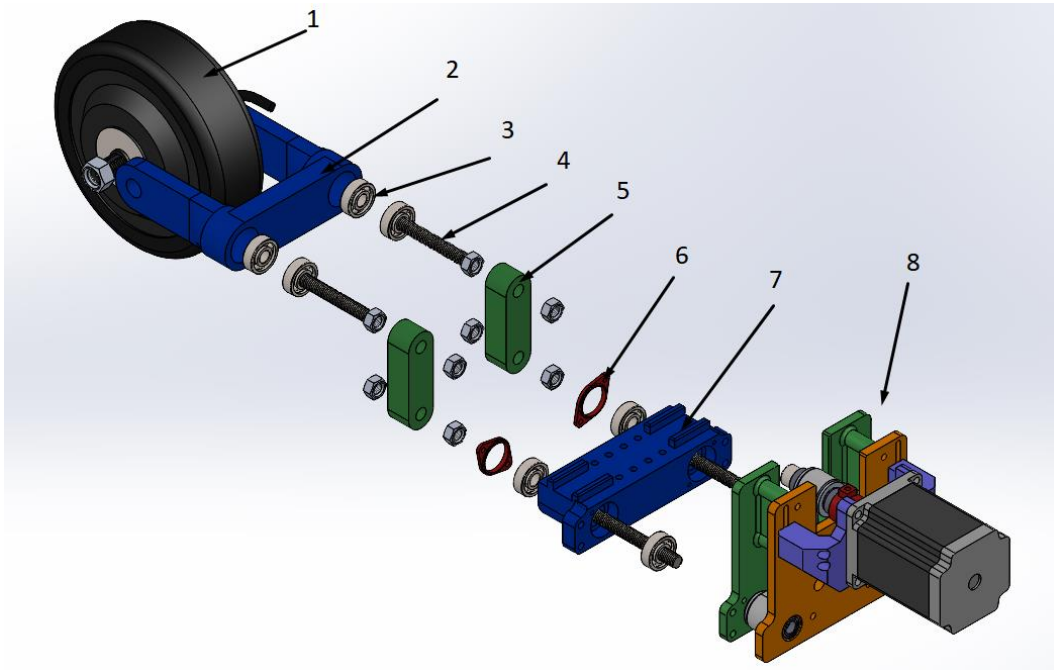


Рис. 4. Модель механізму стабілізації положення пристрою: 1) заднє приводне колесо; 2) вилка заднього колеса 3) підшипники серії 608; 4) шпильки M8x60; 5) кривошип; 6) кришки підшипників; 7) корпус; 8) привід механізму

Заднє колесо 1 кріпиться до вилки 2, в яку запресовано чотири підшипники 3. В них вставлені шпильки 4 і вони зафіксовані гайками M8. До шпильок кріпляться кривошипи 5, вони зафіксовані гайками. Зафіксовані шпильки

M8x100 вільно обертаються в запресованих підшипниках корпуса 7. З іншої сторони до корпуса болтами кріпиться привід механізму стабілізації 8, конструкцію якого представлена на рис. 5.

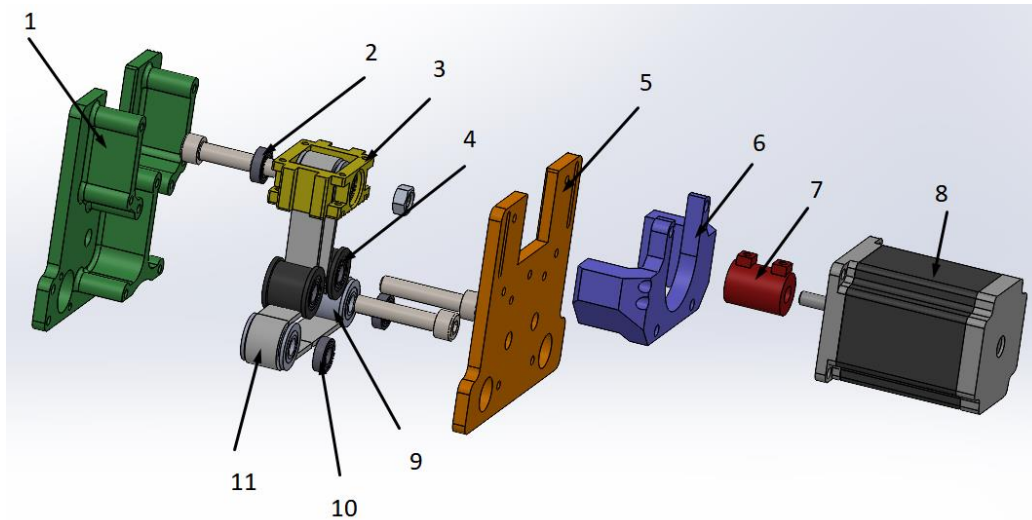


Рис. 5. Модель приводу механізму стабілізації положення пристрою:
 1) корпус приводу; 2) підшипник Z889; 3) рухоме кріплення приводного шківа пасової передачі; 4) пасивні ролики; 5) кришка корпусу приводу; 6) кріплення крокового двигуна; 7) муфта жорстка; 8) кроковий двигун; 9) зубчатий шків; 10) підшипник Z889; 11) пас зубчатий замкнений

Привід механізму стабілізації складається з корпусу 1 та кришки 5, між якими розміщується пасова передача з зубчатим пасом 3М-360 мм. Крутний момент передається від ваду крокового двигуна 8 через жорстку муфту 7 на приводний шків, далі через зубчатий пас на два нижніх шківа 9, які жорстко закріплені на різьбових шпильках і синхронно передають крутний момент на кривошип. Передаточне співвідношення передачі 1:1. Ролики 4 вільно обертаються на осі і служать для збільшення кута обхвату зубчатих шківів пасом. Натяг ременя здійснюється переміщенням приводного шківа 3, разом з кріпленням крокового двигуна 6.

Живлення пристрою забезпечує літєва акумуляторна

батарея з номінальною напругою 22,5 В ємністю 3,3 А·год, що достатньо для роботи установки протягом більш, ніж години. Для низьковольтних споживачів (сервопривод та плата керування) встановлені понижуючі перетворювачі. Керування рухом організовано на платі розробки Arduino Nucleo F446RE на базі 32-х бітного мікроконтролера STM32 F446RE з частотою роботи ядра до 180 МГц. Виготовлена фізична модель пристрою для транспортування малогабаритних вантажів представлена на рис. 6.

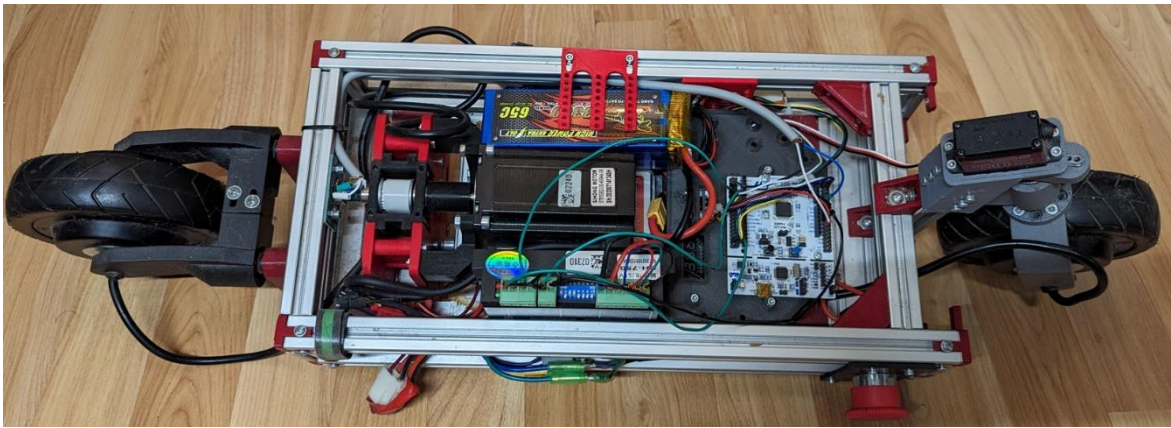


Рис. 6. Зовнішній вигляд фізичної моделі пристрою

Для зчитування фізичних даних щодо процесу стабілізації положення пристрою та керування всіма приводами в середовищі розробки STM32Cube_IDE з використанням стандартної бібліотеки HAL проведено розробку програмної частини. З її допомогою було

написано функції зчитування даних з 9-осьового гіро-акселерометра MPU9250, вимірювання кута α та кутової швидкості нахилу пристрою α' (рис. 7) та резистивного датчика повороту для вимірювання кута нахилу кривошипів β (рис. 7) відносно рами пристрою.

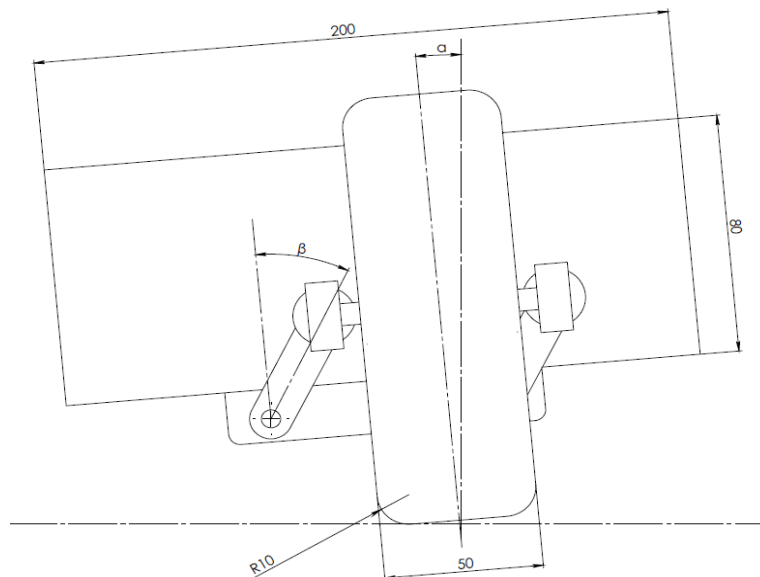


Рис. 7. Позначення кута нахилу пристрою відносно вертикальної осі α та кута відхилення заднього колеса відносно рами пристрою β

Оскільки сигнал, який отримували від модуля MPU9250 щодо кута нахилу пристрою із акселерометра мав сильну шумову

складову, було застосовано комплементарний метод [7] вимірювання кута нахилу пристрою

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

а. Для цього використано наступний вираз:

$$\alpha_i = K_{gyro}\alpha_{gyro.i} - (1 - K_{gyro})\alpha_{accel.i}, \quad (1)$$

де i – індекс, який вказує на номер циклу вимірювання сигналів; K_{gyro} – коефіцієнт, який визначає вагу впливу даних із гіроскопа ($K_{gyro}=0,985$) при

визначенні кута α_i ; $\alpha_{accel.i}$ – кут, що отримують за допомогою акселерометра і який знаходиться із використанням наступного виразу:

$$\alpha_{accel.i} = 57,29 \cdot \arcsin(a_{y.i} / g), \quad (2)$$

де $a_{y.i}$ – прискорення пристрою по горизонтальній осі; g – прискорення вільного падіння g у вертикальній осі;

$\alpha_{gyro.i}$ – кут, що отримують за допомогою гіроскопа і який визначається за наступним виразом:

$$\alpha_{gyro.i} = \alpha_{i-1} + (g_{z.i-1} + g_{z.i})/2 \cdot \Delta t, \quad (3)$$

де $g_{z.i-1}$ та $g_{z.i}$ – це попереднє та поточне значення кутової швидкості, які отримані за допомогою гіроскопа; Δt – час між вимірами. На першому циклі вимірів задається $\alpha_0 = 0$.

такі значення дозволили стабілізувати положення пристрою відносно вертикальної осі. Роботу цього регулятора можна розглядати лише як тимчасовий захід, що дозволяє зібрати масив експериментальних даних.

Нефільтровані дані гіроскопа піддаються фільтрації за допомогою цифрового фільтра біжучого середнього з розмірністю вікна 3.

Запис даних було організовано у пакети, кожен з яких містив дискретні значення кута нахилу пристрою α , кутову швидкість нахилу пристрою α' , кута відхилення заднього колеса відносно рами пристрою β , кутової швидкості крокового двигуна і поточний момент часу. Зібрано масив даних, який налічує 8405 елементів, які отримані протягом 30 секунд роботи пристрою. При цьому частота дискретизації вимірів складала 280 Гц.

Для збору даних щодо стабілізації положення пристрою відносно вертикальної осі було використано ПД-регулятор, входом якого служив кут нахилу пристрою α , а виходом – кутова швидкість заднього колеса (кутова швидкість крокового двигуна). Для цього ПД-регулятора було емпірично підібрано значення коефіцієнтів: пропорційної складової 3, а диференційної -3. Саме

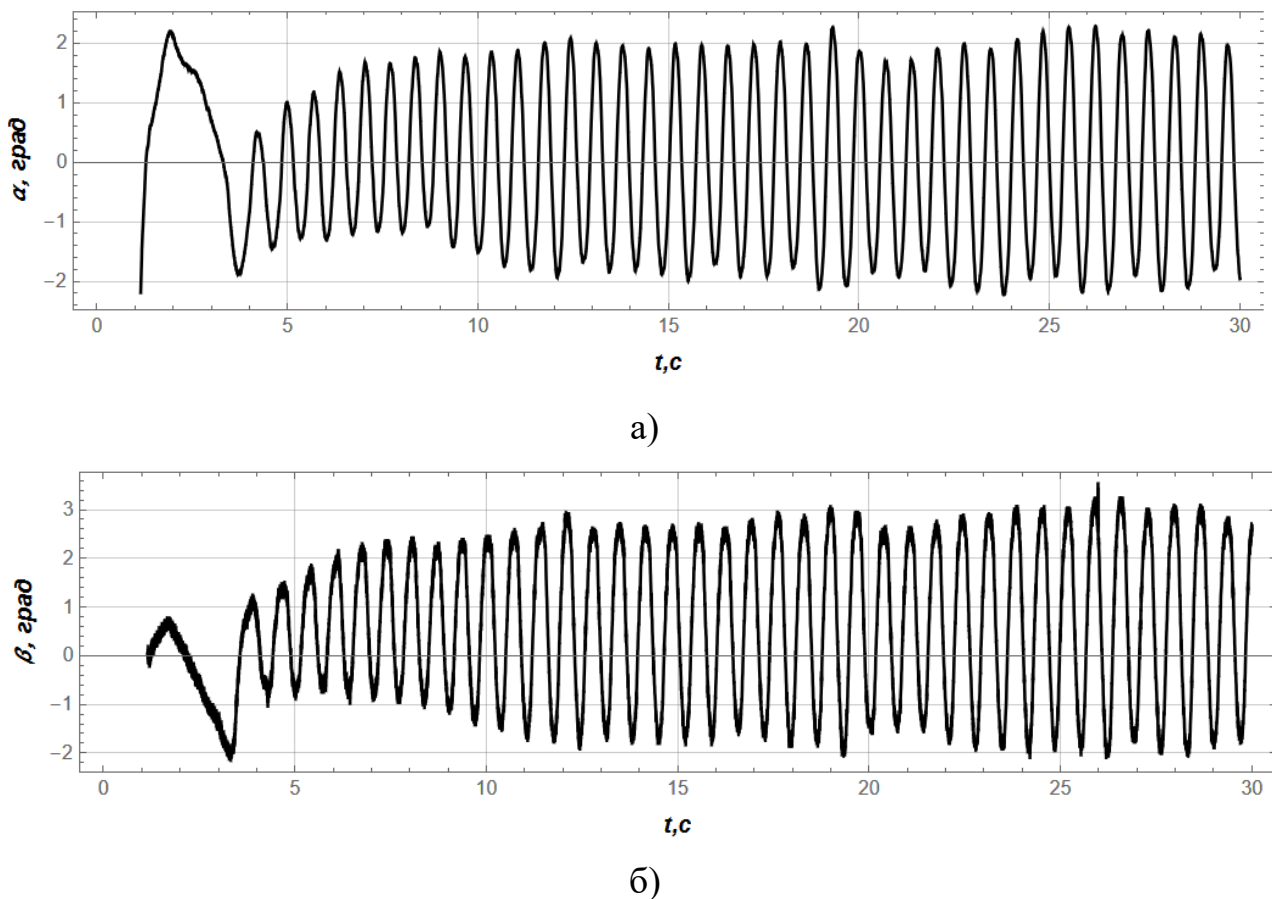


Рис. 8. Експериментальні дані, які відповідають процесу стабілізації роботи пристрою: а) кут нахилу пристрою α ; б) кут відхилення заднього колеса відносно рами пристрою β

Для підтвердження стійкості роботи пристрою проведено серію дослідів, зібрані дані одного з них представлені на рис. 8. З графіку кута нахилу пристрою α (рис. 8, а) видно, що присутні автоколивання пристрою з амплітудою 2 градуси відносно нульового положення. Ці ж коливання видно на графіку кута β , причому його графік знаходиться над нульовим положенням на 0,5 градуса. Це зумовлено дисбалансом в самій конструкції. При розміщенні компонентів центр ваги пристрою трохи зміщений відносно центра його симетрії. Саме це зміщення і

компенсується шляхом попереднього нахилу пристрою.

Висновки і перспективи подальших досліджень:

1. У роботі проведено опис розробки моделі пристрою для транспортування малогабаритних вантажів та створено його фізичну модель. Остання включає механічну: розробка пристрою в програмі моделювання з подальшим виготовленням, електричну: підбір та підключення всіх приводів, живлення пристрою, та електронну частини: це написання програмного коду

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

опитування керування, та збору даних пристрою.

2. Виконано розробку програмного коду, який дозволив провести збір експериментальних даних щодо стабілізації положення пристрою. Вони вказують на те, що практичні умови його працездатності на практиці будуть витримані. Наприклад, кут відхилення пристрою від вертикалі знаходиться у межах 2 градусів, що відповідає стійкій роботі пристрою, навіть без спеціально розробленого регулятора стійкості пристрою.

Список використаних джерел

1. Chiraz J. B., Seddik, Hassene. Design of a PID optimized neural networks and PD fuzzy logic controllers for a two-wheeled mobile robot. *Asian Journal of Control*. 2021. Vol 23. P. 23-41. doi: 10.1002/asjc.2356.
2. Guo L., Ali S., Rizvi A., Lin Z. Optimal Control of a Two-Wheeled Self-Balancing Robot by Reinforcement Q-learning. 16th International Conference on Control. 2020. P. 1-20. doi: 10.1109/icca51439.2020.9264485.
3. Jeyed A., Ali J. A nonlinear optimal control based on the SDRE technique for the two-wheeled self-balancing robot. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2020. P. 1–9. doi: 10.1080/14484846.2020.1745733.
4. Li-Gang L., Ming X. Nonlinear Control of Two-Wheeled Robot Based on Novel Analysis and Design of SDRE Scheme. *Transactions on Control Systems Technology*. 2019. P. 1-9. doi: 10.1109/TCST.2019.2899802.
5. Komor D., Roman R., Precup R., David R., Pamfilii I. Models of Two-Wheeled Mobile Robots with Experimental Validation. 14th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics. 2020. P. 211-216. doi: 10.1109/SACI49304.2020.9118823.
6. Faruk Ü. Proportional control moment gyroscope for two-wheeled self-

3. В подальшому на основі зібраного масиву експериментальних даних (розмірності 8405 вимірів, що виконані протягом 30 секунд під час стабілізації положення пристрою) буде створено математичну модель руху пристрою у відносно вертикальній осі за допомогою рекурентних нейронних мереж. Це дасть змогу провести синтез оптимального регулятора стабілізації руху пристрою з подальшою перевіркою його роботи в умовах, що наближені до робочих.

balancing robot. *Journal of Vibration and Control*. 2021. P. 1-9. doi: 10.1177/10775463211009988.

7. Kim S., Kwon S.J. Robust transition control of underactuated two-wheeled self-balancing vehicle with semi-online dynamic trajectory planning. *Mechatronics*, 2020. Vol 68. 102366 doi: 10.1016/j.mechatronics.2020.102366.

8. Flavius-Catalin P., Szeidert I., Ioan F., Vasar C. Two-Wheeled Self-Balancing Robot. 2021. 15th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics. 2021. doi:10.1109/saci51354.2021.9465568.

9. Ngoc K.V., Hong Q. N. Design Low-Order Robust Controller for Self-Balancing Two-Wheel Vehicle. *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*. 2021. P. 1-22. doi: 10.1155/20216693807.

10. Zambella G., Monteleone S., Alarcón E., Negrello F., Lentini G., Caporale D., Grioli G., Garabini M., Catalano M., Bicchi A. An Integrated Dynamic Fall Protection and Recovery System for Two-Wheeled Humanoids. *Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 5, No. 2. P. 2138 – 2145. doi: 10.1109/LRA.2020.2970951.

11. Yisheng G., Zhaozheng Z., Daye C., Tao Z., Haifei Z., Li H. Kinematic Modeling, Analysis, and Verification of an Essboard-Like

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

Robot. Transactions on Mechatronics. 2021. P. 864-875. doi: 10.1109/TMECH.2020.3009421.

12. Tofigh M.A., Mahjoob M.J., Hanachi M.R., Ayati M. Fractional sliding mode control for an autonomous two-wheeled vehicle equipped with an innovative gyroscopic actuator. Robotics and Autonomous Systems. 2021. 103756. doi: 10.1016/j.robot.2021.103756.

13. Tian D., Tai Y., Ma Z. Control of Different-Axis Two-Wheeled Self-Balancing Vehicles. 2020. 158840. doi: 10.1109/access.2020.3019538.

14. Chih-Hung G., Long-Ping Z., Yu-Hua C. Self-Balancing Two-Wheeled Robot Featuring Intelligent End-to-End Deep Visual-Steering. Transactions on Mechatronics. 2021. P. 1-10. doi: 10.1109/TMECH.2020.3036579.

15. Liu Z., Suo C., Liu Y., Shen Y., Qiao Z., Wei H. Deep Learning-Based Localization and Perception Systems: Approaches for Autonomous Cargo Transportation Vehicles in Large-Scale, Semiclosed Environments. Robotics & Automation Magazine. 2020. P. 1-10. doi: 10.1109/MRA.2020.2977290.

References

1. Chiraz J. B., Seddik, Hassene. (2021). Design of a PID optimized neural networks and PD fuzzy logic controllers for a two-wheeled mobile robot. Asian Journal of Control. Vol 23. P. 23-41. doi: 10.1002/asjc.2356.

2. Guo L., Ali S., Rizvi A., Lin Z. (2020). Optimal Control of a Two-Wheeled Self-Balancing Robot by Reinforcement Q-learning. 16th International Conference on Control & Automation. P. 1-20. doi: 10.1109/icca51439.2020.9264485.

3. Jeyed A., Ali J. (2020). A nonlinear optimal control based on the SDRE technique for the two-wheeled self-balancing robot. Australian Journal of Mechanical Engineering. P. 1-9. doi: 10.1080/14484846.2020.1745733.

4. Li-Gang L., Ming X. (2019). Nonlinear Control of Two-Wheeled Robot Based on Novel Analysis and Design of SDRE Scheme. Transactions on Control Systems Technology. P. 1-9. doi: 10.1109/TCST.2019.2899802.

5. Komor D., Roman R., Precup R., David R., Pamfilii I. (2020). Models of Two-Wheeled Mobile Robots with Experimental

Validation. 14th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics. P. 211-216. doi: 10.1109/SACI49304.2020.9118823.

6. Faruk Ü. (2021). Proportional control moment gyroscope for two-wheeled self-balancing robot. Journal of Vibration and Control. P. 1-9. doi: 10.1177/10775463211009988.

7. Kim S., Kwon S.J. (2020). Robust transition control of underactuated two-wheeled self-balancing vehicle with semi-online dynamic trajectory planning. Mechatronics, Vol 68. 102366 doi: 10.1016/j.mechatronics.2020.102366.

8. Flavius-Catalin P., Szeidert I., Ioan F., Vasar C. (2021). Two-Wheeled Self-Balancing Robot. 2021. 15th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics. doi: 10.1109/saci51354.2021.9465568.

9. Ngoc K.V., Hong Q. N. (2021). Design Low-Order Robust Controller for Self-Balancing Two-Wheel Vehicle. Hindawi, Mathematical Problems in Engineering. P. 1-22. doi: 10.1155/20216693807.

10. Zambella G., Monteleone S., Alarcón E., Negrello F., Lentini G., Caporale D., Grioli G., Garabini M., Catalano M., Bicchi A. (2020). An Integrated Dynamic Fall Protection and Recovery System for Two-Wheeled Humanoids. Robotics and Automation Letters. Vol. 5, NO. 2. P. 2138 – 2145. doi: 10.1109/LRA.2020.2970951.

11. Yisheng G., Zhaozheng Z., Daye C., Tao Z., Haifei Z., Li H. (2021). Kinematic Modeling, Analysis, and Verification of an Essboard-Like Robot. Transactions on Mechatronics. 864-875. doi: 10.1109/TMECH.2020.3009421.

12. Tofigh M.A., Mahjoob M.J., Hanachi M.R., Ayati M. (2021). Fractional sliding mode control for an autonomous two-wheeled vehicle equipped with an innovative gyroscopic actuator. Robotics and Autonomous Systems. 103756. doi: 10.1016/j.robot.2021.103756.

13. Tian D., Tai Y., Ma Z. (2020). Control of Different-Axis Two-Wheeled Self-Balancing Vehicles. 158840. doi: 10.1109/access.2020.3019538.

Зарівний О. Ю., Ромасевич Ю. О.

14. Chih-Hung G., Long-Ping Z., Yu-Hua C. (2021). Self-Balancing Two-Wheeled Robot Featuring Intelligent End-to-End Deep Visual-Steering. Transactions on Mechatronics. P. 1-10. doi: 10.1109/TMECH.2020.3036579.

15. Liu Z., Suo C., Liu Y., Shen Y., Qiao Z., Wei H. (2020). Deep Learning-Based

Localization and Perception Systems: Approaches for Autonomous Cargo Transportation Vehicles in Large-Scale, Semiclosed Environments. Robotics & Automation Magazine. P. 1-10. doi: 10.1109/MRA.2020.2977290.

DEVELOPMENT OF A PHYSICAL MODEL OF THE DEVICE FOR TRANSPORTING SMALL LOADS

O.Y. Zarivnyi, Y.O. Romasevich

Abstract. *The work describes the process of creating a physical model (prototype) of a device for transporting small-sized cargoes, which makes it possible to test the operation of stabilization algorithms and motion control of this class of devices. A CAD model of the device has been developed, and the physical model of the device has been assembled on its basis. Based on the STM32 microcontroller, a device position stabilization system was developed that receives sensory information from the accelerometer and gyroscope. For interrogating and processing data from sensors and controlling actuators the program code was developed. Test runs and data collection during the stabilization of the device's position were performed. A brief analysis of the data is performed, and prospects for further research in this area are indicated.*

Key words: *two-wheeled device, physical model, motion control, unstable dynamic system*