

Розробка самобалансуючого робота

Нікіта Керекелія, студент ¹ (ORCID: 0009-0003-1118-1636),
Дмитро Міщук, доц., канд. техн. наук ¹ (ORCID: 0000-0002-8263-9400)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

Розглянуто принципи розробки самобалансуючого робота – пристрою, здатного підтримувати рівновагу за допомогою динамічної стабілізації. В роботі проаналізовано основні компоненти системи: мікроконтролери, датчики (гіроскопи, акселерометри), двигуни та алгоритми управління на базі PID-регуляторів. Особлива увага приділена математичному моделюванню та практичним аспектам реалізації, включаючи вибір платформи на основі Arduino та Raspberry Pi. Розглянуто рекомендації щодо налаштування параметрів системи для досягнення максимальної стійкості та маневреності. Результати дослідження можуть бути корисними в подальшому для інженерів робототехніки, які цікавляться створенням автономних мобільних пристроїв.

Ключові слова: самобалансуючий робот, рівновага, розробка, Arduino, Raspberry.

1. ВСТУП

Самобалансуючі роботи це – системи, які поєднують в собі механіку, електроніку та алгоритмів управління. Їхня здатність підтримувати рівновагу в динамічних умовах робить такі пристрої популярними в освіті, дослідженнях та промисловості.

Створення такого робота вимагає розуміння фізичних принципів, вибору компонентів та налаштування системи керування.

2. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Серед колісних роботів особливої популярності набули самобалансуючі моделі Segway та Ninebot, які активно використовують для щоденних поїздок та в якості патрульних транспортерів. Також платформа такого робота, як Apybots QB, стала основою для створення сервісних роботів різного призначення.

Механічна частина самобалансуючого робота є основою його стабільності та маневреності. Основними елементами конструкції є рама, колеса, двигуни та система передачі. Раму пропонується виготовляти з легких та міцних матеріалів, наприклад, алюмінію або вуглепластику, щоб забезпечити жорсткість при мінімальній вазі. Для приводу використовуються два колеса, які розташовано по боках, з незалежними приводами. Це дозволяє реалізувати динамічне балансування. В якості приводних механізмів застосовують двигуни постійного струму з редукторами або безщіткові двигуни, які забезпечують необхідний крутний момент і точність керування. Оптимальним варіантом редукторного двигуна постійного струму буде модель на 12 В і обертовим моментом не менше 1–2 кг·см.

Для управління електродвигуном постійного струму 12 В оптимально використовувати H-міст (драйвер двигуна) та мікроконтролер. Так як в колекторних електродвигунах постійного струму можуть виникати пікові струми величиною до 10 А, тоді в якості драйвера двигуна пропонується застосовувати драйвери VESC 6, Sabertooth 2x12 R/C або Cytron MD10C. Cytron MD10C (рис. 1) та VESC є оптимальними варіантами якщо потрібна висока

точність і функціональність, а Sabertooth – хороший варіант для готових рішень з двома двигунами.

Для зменшення вібрацій та підвищення стійкості застосовують амортизатори або гумові прокладки. Центр мас робота розташовують якомога нижче, щоб знизити навантаження на систему стабілізації. Кріплення датчиків (гіроскопів, акселерометрів) має бути жорстким, щоб уникнути помилок вимірювань.

В якості датчика пропонується використати MPU6050 – це мікроелектромеханічна система (MEMS), яка складається з тривісного акселерометра та тривісного гіроскопа. Такий датчик видає шість значень на виході: три значення з акселерометра та три – з гіроскопа. Це дозволяє вимірювати швидкість, орієнтацію, прискорення та переміщення. Даний датчик може надсилати 16-біт даних для аналого-цифрового перетворення по кожному з каналів та містить шину I2C для взаємодії з мікроконтролером. Таким чином можна фіксувати одночасно канали по осям x , y та z . MPU6050 може вимірювати кутове обертання за допомогою вбудованого гіроскопа з чотирма програмованими діапазонами $\pm 250^\circ/\text{c}$, $\pm 500^\circ/\text{c}$, $\pm 1000^\circ/\text{c}$ та $\pm 2000^\circ/\text{c}$.

Самобалансуючі роботи використовують систему «керування із зворотним зв'язком із замкнутим контуром». Це означає, що дані з датчиків руху в режимі реального часу використовуються для керування двигунами та швидкої компенсації будь-якого нахилу, щоб робот залишався у вертикальному положенні. Для зчитування даних з датчика використаємо плату Arduino, яка містить аналого-цифровий перетворювач. Акселерометр вимірює прискорення вздовж трьох осей, а гіроскоп вимірює кутову швидкість навколо трьох осей. Щоб виміряти кут нахилу робота, потрібно знати значення прискорення вздовж осей y та z , а вимірювання кутової швидкості вздовж осі x достатньо для визначення швидкості падіння робота.

Алгоритм системи керування для самобалансуючого робота на базі двох двигунів можна розділити на кілька ключових блоків:

- налаштувати драйвер двигунів та ПІД-регулятор для керування швидкістю обертання коліс. Для цього потрібно встановити початкові параметри ПІД-регулятора (K_p , K_i , K_d) – їх можна підібрати експериментально;

- визначити значення кута нахилу та кутової швидкості з MPU6050. Дані потрібно профільтрувати (наприклад, за допомогою фільтра Калмана або комплементарного фільтра) для зменшення шуму;
- обчислити похибку, як різницю між бажаним кутом (зазвичай 0° для вертикального положення) та поточним кутом нахилу. Вихідний сигнал ПІД-регулятора потрібно обмежити граничними значеннями, щоб уникнути перенапруги двигунів;
- перетворити вихідний сигнал ПІД-регулятора на ШІМ-сигнали для драйвера двигунів. Наприклад, можна застосувати диференціальне керування: якщо робот нахилиється вперед, обертати колеса вперед, якщо назад – назад. Додатково можна реалізувати керування швидкістю руху вперед/назад;
- циклічно повторювати кроки 2–4 з частотою 100–500 Гц для стабільного керування.

Додатково можна реалізувати захист від падіння (наприклад, вимкнути двигуни, якщо кут нахилу перевищує критичне значення).

Комплементарний фільтр – це фільтр високих частот, який діє на гіроскоп та фільтр низьких частот, який діє на акселерометр, для фільтрації дрейфу та шуму під час вимірювання. Для визначення кута нахилу можна користатися такою формулою для фільтра:

$$\alpha_i = k1 * (\alpha_{i-1} + \alpha_{HPF}) + (k1 - 1) \alpha_{LPF}, \quad (1)$$

де α_i , α_{i-1} - поточне та попереднє значення кута нахилу;
 $k1$ - коефіцієнт фільтрації (для постійної часу 0,75 можна приймати $k1 = 0,9934$); α_{HPF} - значення кута виміряне з гіроскопа; α_{LPF} - допоміжний кут корекції.

3. ВИСНОВКИ

В даній роботі було розглянуто конструкцію системи керування самобалансуючим роботом на базі двох колісних двигунів, драйвера та інерційного датчика. Застосовано класичну схему ПІД регулятора та алгоритми фільтрації даних.

Розроблений алгоритм фільтрації в подальшому буде слугувати базою для створення дослідницьких робототехнічних платформ. Практичне значення роботи полягає у формалізації алгоритму балансування з урахуванням інерції сенсорної системи та використанню регуляторів з можливістю адаптації до швидкозмінних станів системи.

Список літератури

- [1] Komor D., Roman R., Precup R., David R., Pamfilii I. Models of TwoWheeled Mobile Robots with Experimental Validation. *14th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*. 2020. P. 211-216.
- [2] 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.
- [3] Romasevych Y., Zarivnyi O. Mathematical modeling of the device for transporting small-sized cargo. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 86. Iss.3. P. 87-102.
- [4] Loveikin V., Romasevych Y., Zarivnyi O. Development of a mathematical model of stabilisation of device for small-sized cargo transportation. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. Vol. 20(4). P. 57 - 71.
- [5] Mishchuk D., Mishchuk Y., Kalashnikov O. Analysis of the control system of the clear logic of the wheel robot with differential drive. *Girnichy, budivelni, Dorozhni Ta meliorativni Mashini*. 2021. No. 97. P. 12–23.
- [6] Ромасевич Ю., Зарівний О. Експериментальне дослідження стабілізації положення пристрою для переміщення малогабаритних вантажів. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2025. № 105, С. 37–44.

Робота виконана під керівництвом Дмитра Міщука, доц., доц. кафедри БМ.