

УДК 681.5

В.Ю. Герман, студент гр. ПГ-41
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДВОКОЛІСНИЙ АВТОБАЛАНСУЮЧИЙ РОБОТ З ВЕРХНЬОЮ МАЯТНИКОВІСТЮ

Анотація. У даній статті розглядається використання двоколісних автобалансуючих роботів у повсякденному житті. Розглянуто різні методи керування нестійкими системами. Наведена математична модель системи. Був сконструйований макет двоколісного робота.

Ключові слова: автобалансуючий робот, зворотній маятник, закон керування, інклінометр.

ВСТУП

На сьогоднішній день самобалансуючі роботи є дуже динамічним напрямком розвитку систем робототехніки. Головне завдання даних роботів є динамічна підтримка рівноваги. Відмінність цих роботів пов'язана з особливостями конструкції, у якій відсутня достатня кількість точок опори для підтримки статичної стійкості. На даний момент, одним з самих відомих прикладів систем такого класу є самобалансуючий скутер Segway (Рис. 1), створений Д. Кейменом. Після Segway в 2012 році була представлена нова розробка – Solowheel (Рис. 2). Solowheel – це електричний самобалансуючий моноцикл з одним колесом та розташованими по обидві сторони від колеса підніжками. [1]



Рисунок 1. Мобільна платформа Segway



Рисунок 2. Мобільна платформа Solowheel

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Конструкція двоколісного робота містить продовгувате тіло з двома колесами прикріпленими до основи внизу. Для спрощення складання математичної моделі два колеса приймають за одне. Також припускається, що робот їздить по прямій лінії. При правильному виборі спрощень можна значно спростити складову моделювання та розробки апаратного забезпечення.

При обраних спрощеннях систему можна вважати, як тверде тіло з центром мас, який обертається у площині колеса. Надалі приведемо припущення, які зроблені для спрощення моделювання:

- Колеса завжди в контакті з підлогою та обертаються без проковзування.
- Електричними та механічними втратами можна знехтувати.
- Електрична стала часу системи значно менша чим механічна. Тобто динамікою електричної системи можна знехтувати.

- Рух робота обмежений прямою лінією. Це значить, що система може бути описана, як двовимірна, що здійснює лише планарний рух.
- Усі тіла є жорсткими.
- Кут нахилу від вертикалі верхньої частини тіла досить малий, щоб дозволити виконати лінеаризацію системи ($\sin(\theta_2) \approx \theta_2$);
- Кутова швидкість нахилу верхньої частини мала ($\dot{\theta}_2^2 \approx 0$), отже можна знехтувати доцентровим прискоренням.

При виконанні цих умов кінематична схема робота може бути зображена, як на рис. 3. Рівняння руху у цьому випадку мають наступний вигляд [2]:

$$\begin{aligned}\tau &= H_1 \ddot{\theta}_1 + H_3 \ddot{\theta}_2 - m_2 r L \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 \\ -\tau &= H_3 \ddot{\theta}_1 + H_2 \ddot{\theta}_2 - m_2 g L \sin \theta_2,\end{aligned}\quad (1)$$

де H_1, H_2 і H_3 задаються матрицями:

$$H = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_2 & H_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_1 + M_2)r^2 + I_1 & m_2 r L \cos \theta_2 \\ m_2 L \cos \theta_2 & m_2 L^2 + I_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де I_1, I_2 — обертальні моменти інерції колеса та корпусу робота відповідно; r — радіус колеса; L — довжина між центром маси тіла та осі колеса; m_1 і m_2 — маси коліс і тіла робота відповідно.

Після лінеаризації отримаємо наступні рівняння руху:

$$\begin{aligned}\tau &= H_3 \ddot{\theta}_1 + H_3 \ddot{\theta}_2; \\ -\tau &= H_3 \ddot{\theta}_1 + H_2 \ddot{\theta}_2 - m_2 g L \theta_2.\end{aligned}\quad (3)$$

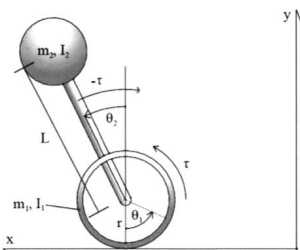


Рисунок 3. Кінематична схема двокілісного робота

На основі цих рівнянь руху регулятор керування роботом виконує зміну крутного моменту двигуна τ , а якості величин для контролю може бути або положення колеса θ_1 , або кут нахилу тіла θ_2 . Для досягнення стабільності балансування необхідно слідкувати за кутом нахилу корпусу θ_2 .

При розробці двокілісних роботів використовують різні закони керування моментом двигуна: пропорційно-інтегральний (ПІ), диференціальний, інтегральний, пропорційно-диференціальний (ПД), пропорційний (П), пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) та закони нечіткої логіки. Для керування самобалансуючим роботом у даній роботі був вибраний ПІД-регулятор, так як він найбільш зручний і він найчастіше зустрічається [2].

Передатна функція ПІД-регулятора по крутному моменту τ для керування кутом нахилу тіла θ_2 має вигляд:

$$G_2(s) = \frac{\theta_2}{\tau} = \frac{-(H_1 + H_3)}{Ds^2 - aH_1} \quad (4)$$

Перспективним напрямком синтезу регуляторів є використання апарату

нечіткої логіки, як наприклад, у роботі [3]. У ній був застосований алгоритм керування, який містить в собі елементи теорії нечіткої логіки та лінійної теорії модального керування. Використана математична модель об'єкту була наступною:

$$\begin{cases} (M + m) \cdot \ddot{x} + k \cdot \dot{x} + ml \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos \theta - ml \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta = u \\ (J + ml^2) \cdot \ddot{\theta} + c \cdot \dot{\theta} + ml \cdot \ddot{x} \cdot \cos \theta - mgl \cdot \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

де m , M – маса маятника та платформи; g – прискорення вільного падіння; l – відстань від точки кріплення до центру тяжіння маятника; J – момент інерції маятника відносно центра тяжіння; c – коефіцієнт в'язкого тертя маятника; k – коефіцієнт тертя платформи; $u(t)$ – сила діюча на платформу; $x(t)$ – положення платформи; $\theta(t)$ – кут відхилення маятника від вертикалі.

Загальні принципи запропонованого у роботі [3] алгоритму керування наступні:

1. На етапі приведення маятника у вертикальне положення та його стабілізації, керування здійснюється на основі нечітких правил.
2. На етапі переміщення платформи модель (5) може бути наближена лінійною моделлю, на основі якої здійснюється модальне керування (по заданому розміщенню коренів характеристичного рівняння замкнутої системи).
3. У випадку втрати маятником стійкості внаслідок дії збурень, здійснюється його стабілізація у стійкому нижньому положенні за допомогою нечітких правил, після чого повторюються п. 1, 2.

ОПИС РОЗРОБЛЕНОГО МАКЕТУ

Було виконано 3D-проекування та конструювання макету робота власної оригінальної конструкції (рис.4, рис.5). Робот складається з трьох пластикових плат, нейлонових стійок, двох коліс з моторами постійного струму і редуктором (передатне відношенням 48:1), блоку керування роботом, інклінометра, драйвера двигунів L298N та двох елементів живлення напругою 9В.

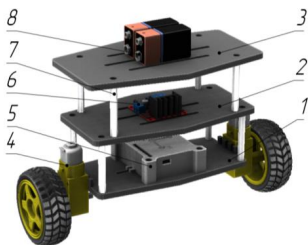


Рисунок 4. 3D модель робота

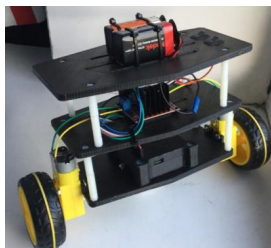


Рисунок 5. Побудований робот.

Конструкція робота наступна: до плати 1 з обох боків кріпляться мотори з колесами 4 металевими гвинтами М3, також на цю плату встановлюється блок керування 5. Нейлонові стійки 7 з'єднують базові плати 1, 2 та 3. На плату 2 кріпиться драйвер 6, батареї живлення встановлюються на платі 3. На рис. 6 показано фотографії покупних елементів робота.

Робот оснащений системою орієнтацію на базі інклінометра власної розробки (інклінометр на базі акселерометрів та магнітометрів). Було виконано калібрування чутливих елементів інклінометра. Спочатку було створена 3D-модель корпусу приладу, яка потім була роздрукована на 3D принтері.

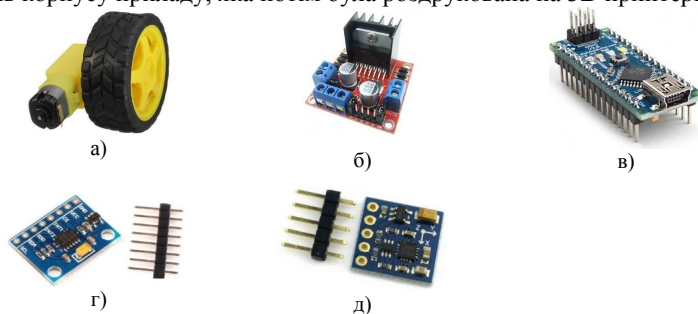


Рисунок 6. Використані компоненти: а) колесо та двигун постійного струму, б) драйвер L298N, в) Arduino Nano, г) GY-291 трьохосьовий акселерометр, д) GY-271 трьохосьовий магнітометр

ВИСНОВОК

Виконано опис особливостей самобалансуючих двоколісних роботів. У роботі приведена математична модель, яка дозволяє синтезувати певний закон керування системою. Розроблений самобалансуючий робот оригінальної конструкції.

У майбутньому планується реалізувати цифровий регулятор у коді для прошивки мікроконтролера, який буде управляти створеним механізмом. Планується розширити функціональність модуля для переміщень робота по довільній траєкторії яку обирає користувач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. Шинтемиров, Практическая реализация самобалансирующего робота с использованием инфракрасных сенсоров / Б. Аубакир, Ж. Каппасов, А. Саудабаев // Назарбаев Университет.
2. Bageant, M. R. (2011). Balancing a two-wheeled Segway robot (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology)
3. Исследование комбинированных методов управления нелинейными неустойчивыми механическими объектами / Д.А. Панкин, Н.В. Жукова // Донецкий национальный технический университет, г. Донецк. – 2009.

Науковий керівник: к.т.н., ас. Лакоза С.Л.