

АЛГОРИТМІЧНИЙ ПІДХІД ДО СТАБІЛІЗАЦІЇ МАГНІТНОГО ЛЕВІТАТОРА

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

У роботі розглянуто алгоритмічний підхід до стабілізації магнітного левітатора на основі математичної моделі електромагнітної системи. Запропоновано метод керування, що враховує нелінійність електромагнітної сили та динаміку переміщення левітуючого об'єкта. Проведено аналіз стійкості системи та визначено параметри регулятора, які забезпечують мінімізацію коливань об'єкта у процесі левітації.

Ключові слова: магнітний левітатор, математична модель, PID-регулятор, електромагнітна сила, стабілізація, алгоритм керування.

Abstract

The paper considers an algorithmic approach to magnetic levitator stabilization based on a mathematical model of the electromagnetic system. A control method taking into account the nonlinearity of the electromagnetic force and the dynamics of the levitating object movement is proposed. The stability analysis of the system was carried out and the controller parameters ensuring minimization of object oscillations during levitation were determined.

Keywords: magnetic levitator, mathematical model, PID controller, electromagnetic force, stabilization, control algorithm.

Вступ

Магнітні левітатори є прикладом нестійких динамічних систем, для яких підтримання рівноважного положення можливе лише за наявності автоматичного регулювання. Основною задачею системи керування є компенсація зміни електромагнітної сили при зміні положення об'єкта.

Особливістю магнітного левітатора є нелінійна залежність сили притягання від струму котушки та відстані між електромагнітом і об'єктом. Це ускладнює процес стабілізації та вимагає використання математичних моделей і алгоритмів автоматичного керування.

Метою роботи є розроблення алгоритмічного підходу до стабілізації магнітного левітатора на основі математичного опису системи.

Результати дослідження

Рух левітуючого об'єкта описується другим законом Ньютона

$$\frac{m(d^2x)}{dt^2} = F_e - mg \quad (1)$$

де m – маса об'єкта; x – координата положення; F_e – електромагнітна сила; g – прискорення вільного падіння.

Електромагнітна сила залежить від струму котушки та відстані до об'єкта і визначається співвідношенням

$$F_e = \frac{ki^2}{x^2} \quad (2)$$

де k – коефіцієнт електромагнітної системи; i – струм котушки; x – відстань до об'єкта. Для забезпечення стійкої левітації необхідно виконання умови рівноваги

$$F_e = mg \quad (3)$$

Після лінеаризації системи поблизу робочої точки отримано передавальну функцію об'єкта керування

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + a} \quad (4)$$

де K – коефіцієнт підсилення; a – параметр системи, що враховує вплив електромагнітної сили.

Для стабілізації положення об'єкта використано PID-регулятор із законом керування

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

де $e(t) = x_0 - x(t)$ – похибка регулювання; x_0 – задане положення об'єкта.

У процесі моделювання встановлено, що збільшення коефіцієнта K_p підвищує швидкодію системи, але може призводити до коливань. Зростання коефіцієнта K_d дозволяє зменшити перерегулювання, а інтегральна складова K_i забезпечує усунення статичної похибки.

За результатами дослідження визначено оптимальні параметри регулятора, при яких система забезпечує стійке утримання об'єкта та мінімальний час перехідного процесу.

Висновки

Запропоновано алгоритмічний підхід до стабілізації магнітного левітатора на основі математичної моделі електромагнітної системи. Проведений аналіз дозволив визначити вплив параметрів регулятора на динамічні характеристики системи. Використання PID-регулятора забезпечує стабільне утримання об'єкта та підвищує точність роботи магнітного левітатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ: Либідь, 2007. 544 с.
2. Денисов Ю. О., Кучерук В. Ю. Мікропроцесорна техніка: мікроконтролери, інтерфейси, апаратне забезпечення. Вінниця: ВНТУ, 2018. 210 с.
3. Руденко В. С., Сенько В. І. Основи промислової електроніки. Київ: Техніка, 2015. 340 с.
4. Довідник мови програмування Arduino [Електронний ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/reference/en/> (дата звернення: 14.05.2026).
5. Ultrasonic Ranging Module HC-SR04 Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf> (дата звернення: 14.05.2026).

Прокоп Богдан Володимирович — студент групи СП-23б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: prokopbodj@gmail.com

Науковий керівник: Богомолів Сергій Віталійович, к.т.н., доцент каф. ОТ, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: bogomolovsergiy@vntu.edu.ua

Bohdan V. Prokop — Student of the SP-23b group, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: prokopbodj@gmail.com

Supervisor: Bohomolov Serhii, Ph.D., Associate Professor kaf. OT, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogomolovsergiy@vntu.edu.ua