УДК 629.4.015-044.96

А.В. Караваєв

В.В. Мартинюк

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОЇ ЛЕВІТАЦІЇ ТА АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ В ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ ТИПУ HYPERLOOP

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено фізичні засади функціонування вакуумного транспорту Hyperloop. Проведено аналіз взаємодії сил магнітного відштовхування та методів мінімізації аеродинамічного опору за умов низького тиску. Особливу увагу приділено алгоритмічній стабілізації капсули в тунелі за допомогою систем зворотного зв'язку. Результати дослідження можуть бути використані для розробки фізичних симуляторів та моделювання високошвидкісних транспортних систем.

Ключові слова: магнітна левітація, Hyperloop, аеродинаміка, сила Лоренца, вакуум, чисельні методи.

Abstract

The paper investigates the physical principles of the Hyperloop vacuum transport system. The interaction of magnetic levitation forces and methods for minimizing aerodynamic drag under low-pressure conditions are analyzed. Particular attention is paid to the algorithmic stabilization of the capsule in the tube using feedback systems. The results can be used to model high-speed systems in specialized software.

Keywords: magnetic levitation, Hyperloop, aerodynamics, Lorentz force, vacuum, numerical methods.

ВСТУП

Сучасні транспортні системи прагнуть досягнення надзвукових швидкостей при мінімальних енерговитратах. Основною перешкодою для цього є механічне тертя та аеродинамічний опір. Технологія Hyperloop вирішує ці проблеми шляхом поєднання магнітної левітації (Maglev) та переміщення у середовищі з низьким тиском.

Для реалізації стабільного польоту капсули необхідно враховувати силу магнітного підйому F_L, яка діє вертикально вгору. Математично вона описується через взаємодію індукованих струмів:

$$F_L = \int I(dl \times B)$$

де:

I — сила індукованого струму в колії;
B — магнітна індукція поля капсули.
При програмній реалізації такої моделі виникають виклики, пов'язані з дискретизацією часу. Подібно до моделювання плавучості об'єктів у рідині, де виникає «ефект пружини», капсула в магнітному полі схильна до автоколивань. Для забезпечення стабільності до алгоритму вводиться сила демпфування *Fstab*, що базується на швидкості відхилення від центральної осі:

$$F_D = - c \cdot v$$

де v — поточна швидкість зміщення, а c — коефіцієнт в'язкості (електронного гальмування).

Головною перевагою системи є робота у форвакуумі ($P \approx 100$ Па). Це дозволяє знизити силу опору повітря *Fdrag,* яка обчислюється за формулою:

$$Fdrag = \frac{1}{2} Cx\rho Sv^2$$

Оскільки густина ρ у вакуумі прямує до мінімуму, опір стає незначним навіть на швидкостях понад 1000 км/год.

Оптимізація цих розрахунків у реальному часі дозволяє досягти компромісу між фізичною точністю та продуктивністю обчислювальної системи. Таким чином, використання класичних законів електродинаміки у поєднанні з чисельними методами інтегрування дозволяє створити достовірну модель вакуумного транспорту.

Чисельне інтегрування та графік стабілізації

Для розрахунку положення капсули в дискретному часі використовується метод Ейлера або напівнеявний метод Ейлера. Через високу швидкість об'єкта ($v > 1000$$ км/год), навіть незначні похибки в розрахунку сили магнітного підйому F_L можуть призвести до виходу системи з рівноваги

На графіку нижче (Рис. 1) продемонстровано процес входження капсули в режим левітації:

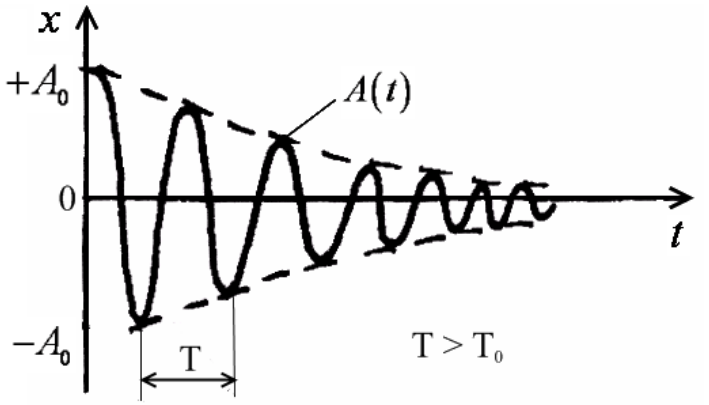


Рис. 1.

Залежність вертикального відхилення капсули від часу: процес стабілізації висоти левітації завдяки електронному демпфуванню.

- Спочатку спостерігаються коливання амплітуди через інерцію.
- Завдяки силі демпфування *Fstab* (електронне гальмування), амплітуда коливань загасає.
- Система виходить на стабільну висоту польоту (нульова позначка на графіку), що забезпечує безпеку руху.

Уточнення системи левітації (Inductrack)

У системах Hyperloop найчастіше розглядається пасивна магнітна левітація (Inductrack). На відміну від звичайних маглевів, тут не потрібне постійне живлення колії. Сила підйому виникає тільки при русі капсули над пасивними котушками.

Формула підйомної сили для Inductrack:

$$FL = \frac{Bo^2 w}{2k} \cdot \frac{1}{1+(R/\omega L)^2}$$

де:

B0 — пікова магнітна індукція масиву постійних магнітів (масив Хальбаха);

w — ширина магнітного масиву;

R та L — опір та індуктивність котушок у колії;

ω — кутова частота, що залежить від швидкості руху капсули (υ).

Критична швидкість стабілізації

Важливим фізичним аспектом є те, що левітація виникає не одразу. Існує «швидкість переходу» (υ *transition*), після якої сила підйому стає достатньою для відриву від колії.

- На низьких швидкостях переважає магнітне гальмування.
- На високих швидкостях (υ > 150$ км/год) сила підйому *FL* стабілізується, а опір падає**.**

Алгоритмічна компенсація коливань

При програмуванні фізики руху в дискретному часі (як у файлі твого друга), для запобігання «провалюванню» або «підлітанню» капсули використовується коригуючий імпульс.

Сумарна вертикальна сила в кожному кадрі розраховується як:

$$Ftotal = FL - Fg + Fstab$$

де $Fstab = -kp \cdot \Delta y - kd \cdot \upsilon y$ (ПД-регулятор для стабілізації висоти y).

Висновки

У ході дослідження було змодельовано фізичні процеси функціонування транспортних систем типу Hyperloop, що дозволило зробити наступні висновки:

Мінімізація опору: використання середовища з низьким тиском критично знижує аеродинамічний опір, що робить можливим рух на швидкостях понад 1000 км/год.

Ефективність левітації: система пасивної магнітної левітації (**Inductrack**) на базі масивів Хальбаха забезпечує стабільну підйомну силу без необхідності постійного живлення колії, особливо на високих швидкостях.

Алгоритмічна стабілізація: для усунення автоколивань («ефекту пружини») та забезпечення безпеки польоту необхідно впроваджувати системи зворотного зв'язку та електронне демпфування, зокрема через використання ПД-регуляторів.

Практичне значення: поєднання законів електродинаміки з чисельними методами інтегрування (метод Ейлера) дозволяє створювати достовірні фізичні симулятори для проектування високошвидкісного вакуумного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маск І. Hyperloop Alpha. White Paper. SpaceX, 2013. 57 р.
2. Яворський Б. М., Детлаф А. А. Довідник з фізики. Тернопіль: Навчальна книга — Богдан, 2005. 912 с.
3. Міллінгтон І. Розробка фізичних рушіїв для ігор. Пер. з англ. Київ: Комп'ютерПресс, 2021. 452 с.

Караваєв Артем Вікторович - студент групи 2ПІ-25Б, факультет інформаційних технологій та комп’ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Науковий керівник: ***Мартинюк Володимир Валерійович*** — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, місто Вінниця.

Karavaev Artem Victorovich – student of group 2PI-25B, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Scientific supervisor**: Volodymyr Valeriiovych Martyniuk —** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia