

Сохацький А. В., доктор технічних наук,
професор, професор кафедри транспортних технологій
та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
провідний науковий співробітник
Інституту транспортних систем та технологій
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-3593-6517

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТА ДИНАМІКИ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ АПАРАТІВ ТИПУ MAGLEV З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ДИСКРЕТНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ

Перехід суспільства на якісно новий технічний рівень є, центральною ланкою сьогодення. Високі темпи науково-технічного розвитку і глобалізації економіки в XXI ст. вступає у протиріччя з невисокими темпами розвитку і можливостями модернізації існуючих транспортних систем. Необхідні ефективні якісні технічні рішення з кардинального якісного підвищення швидкостей та пропускної здатності транспортних систем. Необхідною вимогою є зниження енергетичних затрат та підвищення безпеки. Окрім цього формуються жорсткі екологічні вимоги. Економічного зростання України можуть сприяти проривні технологічні рішення в галузі транспортних систем. Впровадження нових технологій на нових фізичних принципах може сприяти якісному стрибку економічного розвитку країни. Розробка та впровадження таких нових технологій, як Maglev та Hyperloop є необхідною умовою науково-технологічного розвитку суспільства. Проте створення такого високошвидкісного транспорту з застосування вказаних технологій вимагає вирішення цілого ряду наукових проблем.

В статті розглянуто зв'язану задачу моделювання аеродинаміки та динаміки руху швидкісних наземних транспортних апаратів. Для ефективного використання аеродинамічних ефектів пропонується обладнати транспортний апарат крилом, завдяки якому будуть розвантажуватися магнітолевітаційні пристрої. Це дозволить більш зменшити енергозатрати на підтримку транспортного апарата над шляховою структурою. Окрім цього наявність несучих поверхонь можна використовувати для сприяння стабілізації руху. Моделювання аеродинамічних процесів проведено шляхом використання сингулярних інтегральних рівнянь. Для цього несучу систему транспортного апарата представлено набором приєднаних та вільних дискретних вихорів. Застосування моделі ідеальної рідини для розрахунку несучої системи магнітолевітуючого транспортного апарата дозволяє сформулювати аеродинамічну задачу як задачу Неймана для рівняння Лапласа. Транспортний засіб має складну геометричну форму, тому при моделюванні його обтікання передбачено кілька поверхонь сходу нестационарного сліду. Для розрахунку параметрів стійкості руху розв'язано систему диференціальних рівнянь динаміку руху транспортного апарата поблизу шляхової структури.

Результати моделювання показали, що використання екранного ефекту, що формується під впливом близькості шляхової структури сприяє розвантаженню магнітолевітаційних пристроїв. Близькість землі створює небезпеку зіткнення транспортного апарата з шляховою структурою при втраті динамічної стійкості. Наявність несучих поверхонь транспортного апарата сприяє покращенню параметрів стійкості.

Ключові слова: аеродинаміка транспортних апаратів, стилі методи, метод дискретних вихорів, математичне моделювання, інтегральні сингулярні рівняння, динаміка руху.

Sokhatsky A. V. Mathematical modeling of aerodynamics and dynamics of Maglev-type vehicles using the method of discrete features

The transition of society to a qualitatively new technical level is a central part of today's world. The high pace of scientific and technological development and economic globalization in the 21st century contradicts the slow pace of development and the possibilities of modernizing existing transport systems. Effective, high-quality technical solutions are needed to dramatically improve the speed and capacity of transport systems. Reducing energy costs and improving safety are also essential. In addition, stringent environmental requirements are being formed. Breakthrough technological solutions in the field of transportation systems can contribute to Ukraine's economic growth. The introduction of new technologies based on new physical principles can contribute to a qualitative leap in the country's economic development. The development and implementation of new technologies such as Maglev and Hyperloop is a prerequisite for the scientific and technological development of society. However, the creation of such high-speed transportation using these technologies requires solving a number of scientific problems.

The paper considers the coupled problem of modeling the aerodynamics and motion dynamics of high-speed ground transportation vehicles. For the efficient use of aerodynamic effects, it is proposed to equip the vehicle with a wing, which will unload the magnetolevitation devices. This will reduce the energy consumption for maintaining the vehicle over the road structure. In addition, the presence of bearing surfaces can be used to help stabilize the movement. The aerodynamic processes were modeled using singular integral equations. For this purpose, the vehicle's bearing system is represented by a set of attached and

free discrete vortices. The use of an ideal fluid model to calculate the bearing system of a magnetically levitating vehicle allows us to formulate the aerodynamic problem as a Neumann problem for the Laplace equation. The vehicle has a complex geometric shape, so when modeling its flow, several surfaces of the unsteady wake are provided. To calculate the parameters of motion stability, a system of differential equations is solved for the dynamics of the vehicle motion near the road structure.

The simulation results showed that the use of the screen effect formed under the influence of the proximity of the road structure helps to unload magnetolevitation devices. The proximity of the ground creates a danger of a vehicle collision with the road structure with a loss of dynamic stability. The presence of bearing surfaces of the vehicle helps to improve stability parameters.

Key words: vehicle aerodynamics, numerical methods, discrete vortex method, mathematical modeling, integral singular equations, motion dynamics.

Постановка проблеми. Перехід суспільства на новий технічний рівень є, центральною ланкою сьогодення. Прискорення темпів науково-технічного розвитку і глобалізації економіки в ХХІ ст. вступає у протиріччя з невисокими темпами розвитку і можливостями модернізації існуючих транспортних систем. Необхідні ефективні якісні технічні рішення з кардинального якісного підвищення швидкостей та пропускної здатності транспортних систем. Необхідною вимогою є зниження енергетичних затрат та підвищення безпеки. Окрім цього формуються жорсткі екологічні вимоги. Для економічного зростання України базовим є інноваційно-технологічний розвиток. Цьому можуть сприяти проривні технологічні рішення в галузі транспортних систем.. Впровадження нових технологій на нових фізичних принципах може сприяти якісному стрибку економічного розвитку країни. Розробка та впровадження таких нових технологій, як Maglev та Hyperloop є к необхідною умовою науково-технологічного розвитку суспільства. Проте створення такого високошвидкісного транспорту з застосування вказаних технологій вимагає вирішення цілого ряду наукових проблем.

Актуальність досліджень. Вважається, що підвіс перспективних магнітолевітуючих транспортних засобів буде базуватися на дії електродинамічної левітації з використанням надпровідних магнітів [1–8].

Однією з них є забезпечення оптимальних динамічних характеристик та відповідних партерів стійкості та керованості. Наявність близько розміщеної шляхової структури накладає певні вимоги на параметри стійкості та керованості такого транспортного засобу. Окрім цього збільшення швидкостей руху не повинно знижувати безпеку та шкідливо впливати на навколишнє середовище. Вважається, що підвіс перспективних магнітолевітуючих транспортних засобів буде базуватися на дії електродинамічної левітації з використанням надпровідних магнітів [1; 3].

Традиційно, підвіс магнітолевітуючих транспортних засобів базується на дії електродинамічної левітації, в основу якої покладено принцип електромагнітної інерції Ленца. Високі швидкості руху сприяють формуванню значних аеродинамічних сил та моментів. Їх позитивне використання буде сприяти мінімальним енергетичним витратам. Використання несучих поверхонь для формування підйімальної сили дозволить розвантажувати магнітолевітуючі пристрої. Окрім цього аеродинамічні поверхні можна використовувати для забезпечення необхідної стійкості.

Вирішення наукових проблем, що виникають при створенні сучасних висошвидкісних транспортних засобів вимагає застосування математичного апарату. Чисельне розв'язування диференціальних та інтегро-диференціальних рівнянь дозволяє знайти шляхи оптимізації їх технічних параметрів. Однією з важливих задач є забезпечення оптимальних динамічних характеристик. Вважається, що підвіс перспективних магнітолевітуючих транспортних засобів буде базуватися на дії електродинамічної левітації з використанням надпровідних магнітів [1; 4–8]. Наявність близько розміщеної шляхової структури накладає певні вимоги на параметри стійкості та керованості такого транспортного засобу. Обмежуються величини відхилення параметрів руху, таких як кути тангажу, крену та ковзання, відстань до шляхової структури та інші. Аналіз існуючих публікацій з транспорту, що ґрунтується на технологіях Maglev показує, що при дослідженні його динамічних характеристик в основному враховують навантаження від магнітолевітуючих пристроїв.

Мета статті. Традиційно задачі аеродинаміки та динаміки руху розв'язуються окремо одна від одної. Вирішення ж сумісної задачі аеродинаміки та динаміки руху є надзвичайно важливою проблемою сьогодення. Тому виникає потреба в розробці ефективних методик розв'язування такої сумісної задачі та досконалого дослідження динаміки руху магнітолевітуючих транспортних засобів на надпровідних магнітах

Метод розв'язування сумісної задачі динаміки та аеродинаміки. Система рівнянь для розв'язування зв'язаної задачі аеродинаміки та динаміки руху транспортного апарата матиме вигляд:

$$m \left(\frac{d\vec{V}_c}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{V}_c \right) = \vec{F}_c; \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{K}_c}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{K}_c = \vec{M}_c; \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_m}{\partial \xi_m} + \frac{\partial F_m^{diff}}{\partial \xi_m} = \vec{S}_q + \vec{S}_{xyz}; \quad (3)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = f(\gamma, \vartheta, \psi, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}, t); \quad (4)$$

$$\vec{R}_{mag} = \vec{R}_{mag}(V_c, \gamma, \vartheta, \psi, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}, h); \quad (5)$$

$$\vec{F}_c = \vec{F}(p, k, \rho, V_c, h, \alpha, \beta, \gamma, \vartheta, \psi, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}, \delta_c, P_{ps}); \quad (6)$$

$$\vec{M}_c = \vec{M}(p, k, \rho, V_c, h, \alpha, \beta, \gamma, \vartheta, \psi, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}, \delta_c, P_{ps}); \quad (7)$$

$$\phi \leq |\phi_{\max}|; \dot{\phi} \leq |\dot{\phi}_{\max}|; h_{\min} \leq h \leq h_{\max}, \quad (8)$$

де \vec{F}_c, \vec{M}_c – вектор сил та моментів; \vec{K}_c – момент кількості руху; \vec{R}_{mag} – вектор магнітних сил; p – тиск; k – параметр, що характеризує турбулентний стан атмосфери; ρ – густина повітря; V_c – швидкість центра мас транспортного апарата; h – відстань до шляхової структури; F_m, F_m^{diff} – вектор конвективних та дифузійних потоків; \vec{S}_q – джерельний член; \vec{S}_{xyz} – джерельний член, що визначається типом системи координат; $\phi = \{\gamma, \vartheta, \psi\}$; $\dot{\phi} = \{\dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}\}$; $\alpha, \beta, \gamma, \vartheta, \psi, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}$ – кути атаки, ковзання, крену, тангажа, ристання та їх похідні за часом; $Q = \{\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E_t, \rho \tilde{v}\}$ – вектор густини потоку; P_{ps} – тяга силових установок; δ – дія органів керування транспортного засобу; $\xi_m = \xi_m(t, x_1, x_2, x_3)$, $m = 1, 2, 3$; c – центр мас.

Враховуючи можливості наявної обчислювальної техніки прийmemo ряд спрощень до системи рівнянь (1–8). Для моделювання динаміки руху магнітолевітуючого транспортного засобу використано систему диференціальних рівнянь (1, 2).

Замикання системи рівнянь руху транспортного засобу (4) запишемо у вигляді наступних кінематичних співвідношень

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma), \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma, \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_x - tg \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma), \end{aligned} \quad (9)$$

Для визначення відстані до шляхової структури необхідно інтегрувати наступне рівняння

$$\frac{dh}{dt} = V_x \sin \vartheta + V_y \cos \vartheta \cos \gamma - V_z \cos \vartheta \sin \gamma. \quad (10)$$

Величину левітаційних електромагнітних сил, що виникають при русі транспортного засобу над суцільним струмопровідним полотном визначимо за виразом [3]

$$F_L = F_1 \left[1 - \left(1 + \frac{V^2}{\omega^2} \right)^{-n_1} \right], \quad (11)$$

де F_1 – фиктивна підйомна сила, що діє на соленоїд; n_1 – коефіцієнт, який визначається геометрією соленоїда;

У відповідності з роботою [3] силу F_1 та параметр ω визначаємо за формулами

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{\mu_0 N^2 i_c^2 (a+b)}{2\pi h} \eta, \\ \omega &= \frac{2}{\mu_0 \sigma \delta}, \end{aligned}$$

де N – число обмоток соленоїда; i_c – струм в соленоїді; a, b – розміри соленоїда уздовж осей ОХ, ОУ; h – відстань між магнітом транспортного засобу та суцільним струмопровідним полотном.

Коефіцієнт η визначається емпіричним шляхом, але в роботі [2] запропонована апроксимаційна формула

$$\eta = \left(1 - K \frac{2h}{a} \right),$$

$$\text{де } K = 0,42 + 0,6 \frac{a}{b} - 0,0775 \left(\frac{a}{b} \right)^2.$$

Чисельне розв'язування системи диференціальних рівнянь (1–2) проведено методом Ейлера.

Для визначення аеродинамічних навантажень необхідно розв'язати зовнішню задачу Неймана для рівняння Лапласа. Для цього представляємо транспортний засіб, що рухається в суцільному середовищі у вигляді несучої поверхні σ_1 з якої сходять нестационарний слід σ_2 по кривій L .

Нехай несуча поверхня σ_1 транспортного засобу знаходиться в нестационарному полі швидкостей

$$U_0(V, t) = \text{grad } u_0(V, t),$$

де $\bar{U}_0(V, t)$ – гармонічна функція по усьому просторі у будь який момент часу. Поверхня σ_2 є поверхнею розриву дотичних швидкостей і на ній повинні виконуватися умова

$$p^+(M, t) - p^-(M, t) = 0, \quad V_n^+(M, t) = V_n^-(M, t), \quad M \in \sigma_2,$$

де p, V – тиск та швидкість з однієї та іншої сторони поверхні σ_2 .

Так як середовище є суцільним то в кожний наступний момент часу τ в будь якій точці $M(s)$ кривої L сходять частинка рідини на які є розриви дотичних швидкостей і яка займає положення $M(s, \tau, t)$. Причому ця частинка рідини рухається зі швидкістю потоку в даній точці $M(s, \tau, t)$. Таким чином нестационарний слід σ_2 в момент часу t представляє собою поверхню точок $M(s, \tau, t)$, що рухається з швидкістю $\bar{V}(M(s, \tau, t))$. З цього слідує, що для знаходження поверхні σ_2 необхідно розв'язати наступну систему диференціальних рівнянь

$$\frac{d\bar{r}}{dt} = \bar{V}(M(s, \tau, t)), \quad s \in [0, l], \quad \tau \in [0, t], \quad t \geq \tau. \quad (12)$$

При цьому повинні виконуватися початкові умови $\bar{r}(s, \tau, t) = \bar{r}_{M(s, \tau, t)}$. Це означає, що в початковий момент часу $\tau = t$ точка $M(s, \tau, t)$ з точкою $M(s)$ кривої L . Поверхня σ_2 має розрив дотичних швидкостей і на ній виконується умова нерозривності нормальної до σ_2 швидкості потоку. В такому випадку поверхню σ_2 можна моделювати потенціалом подвійного шару.

Розв'язок задачі розшукується в вигляді потенціала подвійного шару, що описується інтегро-диференціальним рівнянням

$$f(M_0, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial \bar{n}_{M_0}} \sum_{i=1}^2 \int_{\sigma_i} \frac{\partial}{\partial \bar{n}_{M_0}} \left(\frac{1}{r_{MM_0}} \right) \left(\frac{1}{r_{MM_0}} \right) q_i(M_0, t) d\sigma_{i, M}, \quad M_0 \in \sigma_1. \quad (13)$$

Така як поле швидкостей $\{\bar{V}(M_0)\}, M_0 \in \sigma_1$ має такі ж властивості як поле швидкостей індукване вихором шаром $\{\bar{\gamma}(M_0)\}, M_0 \in \sigma_1$ то математичне моделювання аеродинаміки транспортного засобу базується на представленні поверхні транспортного засобу σ_1 вихором шаром. З поверхні σ_1 сходять нестационарний слід-поверхня – σ_2 . Визначення аеродинамічних навантажень побудована на основі методу дискретних вихорів [2; 3], з використанням присднаних та вільних вихорових рамок, що сходять з кромки несучих поверхонь (рис. 1) інтегралом Коші-Лагранжа.

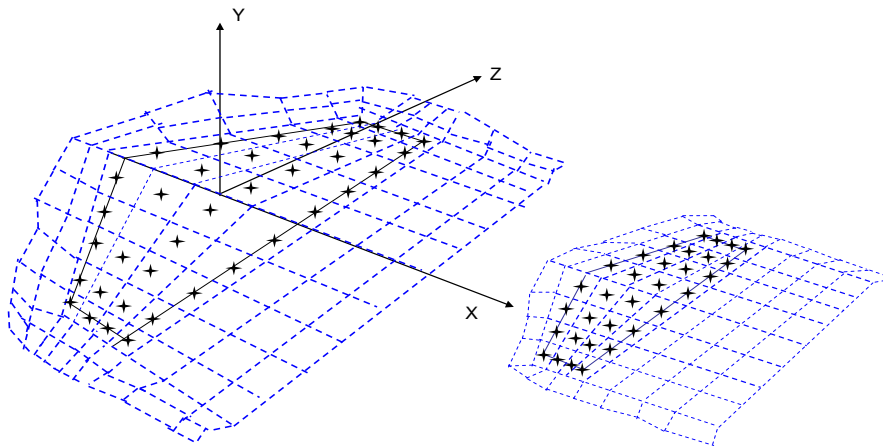


Рис. 1. Вихорова схема транспортного засобу

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_\infty}{\rho} - \frac{\bar{V}^2}{2} - \frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (14)$$

Система лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих циркуляцій приєднаних вихорових рамок записується

$$\sum_{\mu=1}^{2(N+n)} \sum_{\nu=1}^{M+m} \Gamma_{\mu\nu} w_{\mu\nu}^{ik} + \sum_{l=1}^3 \sum_{\mu=1}^{2N} \sum_{r=1}^P \Gamma_{\mu r}^{lkr} w_{\mu r}^{ik} + \sum_{l=1}^3 \sum_{\mu=1}^{2n} \sum_{r=1}^P \Gamma_{\mu r}^{lgo} w_{\mu r}^{ik} + U_0 \sin(\alpha) = 0, \quad (15)$$

де $\Gamma = \Gamma_r / V_0 b_0$ – безрозмірна циркуляція вихорової рамки; $\Gamma_{\mu r}^I, \Gamma_{\mu r}^{II}, \Gamma_{\mu r}^{III}$ – безрозмірні циркуляції вільних вихорових рамок i -ї контрольній точці k -ї панелі, $w_{\mu\nu}^{ik}, w_{\nu r}^{ik}, w_{\mu r}^{ik}$ – швидкості індуковані вихоровою рамкою, що складається з вихорових відрізків одиничної інтенсивності; α – місцевий кут атаки k -го перерізу несучої поверхні; U_0 – швидкість незбуреного потоку.

Для моделювання наявності шляхової структури вводилась дзеркально відображена вихорова система [3].

Розв'язуючи одержану систему рівнянь (15), визначаємо величину циркуляції $\Gamma_{\mu\nu}$ вихорових рамок. Для визначення аеродинамічних навантажень використаємо інтеграл Коші-Лагранжа (14). Потім знаходимо коефіцієнти підйомної сили та моменту тангажу несучих поверхонь транспортного засобу. На транспортний засіб, окрім аеродинамічних та гравітаційних навантажень діють і магнітні сили. Для їх визначення була розроблена методика з використанням залежностей викладених в роботі [3], Апробацію використаної методики проведено в роботі [3].

Числове моделювання та результати розрахунків. Для математичного моделювання динаміки та аеродинаміки транспортного засобу на надпровідних магнітах було обрано його аеродинамічну схему показану на рис. 2.

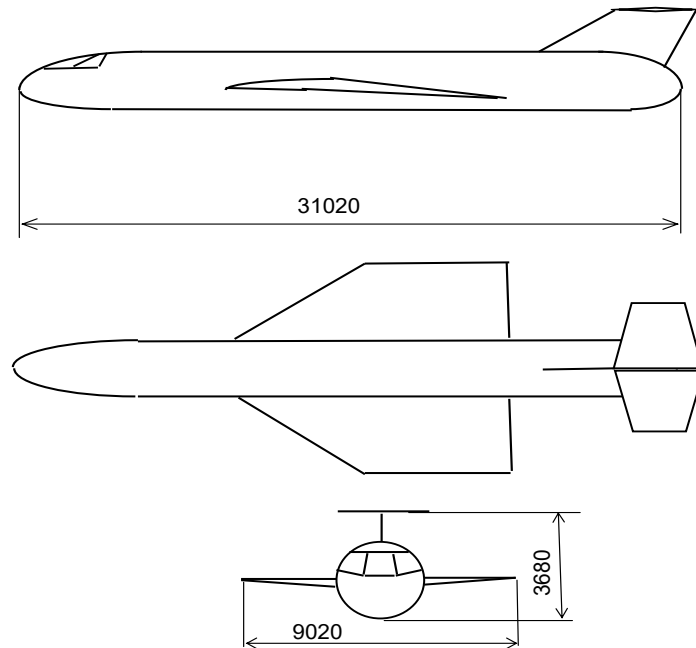


Рис. 2. Аеродинамічна схема крилового транспортного засобу з використанням електромагнітної левітації

Задача розв'язувалась шляхом чисельних розрахунків на ПЕОМ за наступним алгоритмом

1. Задання геометричних, масових параметрів транспортного апарата
2. Задання початкових умов, розрахунок моментів інерції.
3. Розв'язування балансовочного рівняння, визначення та оптимізація необхідних вхідних параметрів.
4. Математичне моделювання аеродинаміки транспортного засобу методом дискретних вихорів.
5. Визначення аеродинамічних та магнітолевітуючих сил та моментів.
6. Чисельне розв'язування диференціальних рівнянь динаміки руху.
7. Визначення положення транспортного засобу в просторі.
8. Оцінка величини прирощення кута тангажу $\Delta\theta$ та відстані до шляхової структури Δh як функції за часом.
9. Якщо $\Delta\theta \rightarrow 0$ та $\Delta h \rightarrow 0$ то розрахунки закінчуються. В противному випадку цикл розрахунків повторюється починаючи з п. 3.

Вважалось що транспортний засіб рухається поблизу шляховою структури з швидкістю $V_x=150$ м/с, що відповідає числу $M=0,416$ на відстані до шляхової структури $h=0,2$ м. Маса апарату складає 30 000 кг, початкова швидкість руху – $V_y=0$ м/с; величина кута атаки апарату – 0 град; густина повітря – $1,24$ кг/м³; площа крила – $65,05$ м²; довжина апарату – $31,02$ м; сумарна маса кріомодулів – 1000 кг.

Проводилося моделювання руху транспортного засобу на надпровідних магнітах в поздовжній площині. Вважалось, що кути ризику та крену залишаються незмінними. Чисельні дослідження динаміки поздовжнього руху та аеродинаміки транспортного засобу на надпровідних магнітах проводилися як без горизонтального оперення так із горизонтальним оперенням. Розрахунки показали, що відсутність горизонтального оперення приводила до зростання амплітуди коливань транспортного засобу, як по куті тангажу так і по висоті над шляховою структурою. Наявність горизонтального оперення стабілізувала положення транспортного засобу в просторі. На рис. 3–4 представлені результати розрахунку зміни відстані до шляхової структури h (м) та кута тангажу $teta$ (градус) транспортного засобу з горизонтальним оперенням.

Проведені числові дослідження показали, що для досягнення оптимальних динамічних характеристик окрім відповідних параметрів статичної стійкості транспортного засобу необхідно забезпечити і достатню динамічну стійкість.

За результатами чисельних досліджень встановлено, що для даної компоновки транспортного засобу коливання по висоті та куті тангажу згасають за час біля 20–25 с. Це досягнуто шляхом введення горизонтального оперення в задній частині транспортного засобу та оптимальним вибором його параметрів. Без горизонтального оперення транспортний засіб є нестійким.

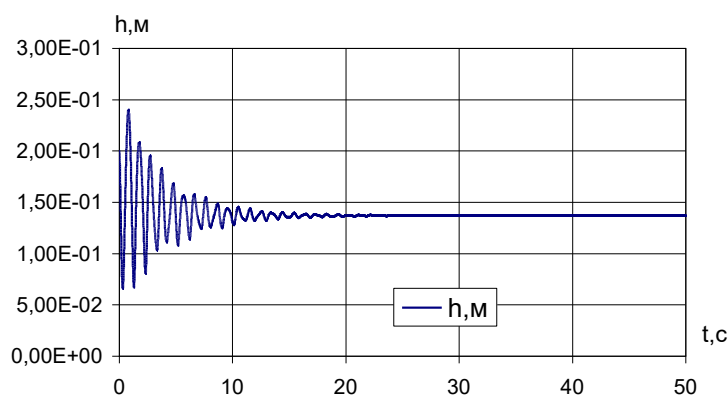


Рис. 3. Зміна величини відстані від транспортного засобу до поверхні шляхової структури після дії збурення

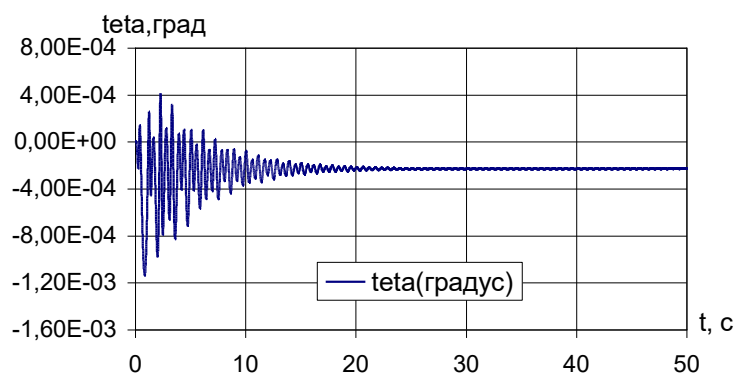


Рис. 4. Зміна кута тангажу транспортного засобу після дії збурення

Висновки. Проведене числове моделювання показало, що досліджуваний магнітолевітуючий транспортний засіб на надпровідних магнітах потребує додаткової системи стабілізації. Для цього в конструкцію апарату було введено хвостовий горизонтальний стабілізатор. Це дозволило забезпечити його динамічну стійкість. В подальшій перспективі необхідно розглянути динаміку руху з урахуванням бокових сил та моментів.

Список використаних джерел:

1. Дзензерский В.А., Омеляненко В.И., Васильев С.В., Сергеев С.А. Развитие экономичных та научно-технических основ транспорта пятого поколения. Киев : Институт экономики та прогнозирования НАН Украины. 2020. 254 с.
2. Сохацький А. В. Метод дискретних особливостей як засіб проектування аеродинамічних обрисів транспортних апаратів. *Журнал обчислювальної та прикладної математики*. 2021. № 1 (135). С. 186–192.
3. Сохацький А. В. Теоретичні основи створення аеродинамічних компоновань перспективних швидкісних транспортних апаратів : дис. ... доктора технічних наук : 05.07.01. Дніпропетровськ. 2010. 364 с.
4. The 13th International conference on magnetically levitated systems and linear drives” “MAGLEV’93”. Argona National laboratory USA. 1993. 464 p.
5. Prykhodko O., Sokhatsky A. On the aerodynamic calculation of high-speed ground transport vehicles. 17th international conference on magnetically levitated systems and linear drives. Swiss Federal Institute of technology. Lausanne, 2002. N PP05201. P. 11.
6. The 9th International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH2021) in, Chiba, Japan, Nov. 23–25, 2021. URL: https://web.apollon.nta.co.jp/stech2021/symposium_venue
7. The 1st International Conference on Ultra-High-Speed Transportation, March 1-2, 2021 was organized by the Technical University of Munich, Germany. URL: <https://www.maglevboard.net/en/the-conferences/342-2021-brazil-ismb17-conference>
8. The 25th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives was hosted by Changsha, PR China, October 18–19, 2022. URL: <https://www.maglevboard.net/en/the-conferences/306-2022-pr-china-the-maglev-2022-conference>

References:

1. Dzenzersky V.A., Omelianenko V.Y., Vasylev S.V., Serheev S.A. Rozvytok ekonomichnykh ta naukovotekhnichnykh osnov transportu piatoho pokolinnia [Development of economic and scientific and technical foundations of the fifth generation transport]. Kyiv : Instytut ekonomiky ta prohnozuvannia NAN Ukrainy. 2020. 254 c.
2. Sokhatsky A.V. Metod dyskretnykh osoblyvostei yak zasib proektuvannia aerodynamichnykh obrysyv transportnykh aparativ [The method of discrete features as a means of designing aerodynamic outlines of vehicles]. *Zhurnal obchysliuvalnoi ta prykladnoi matematyky*. 2021. № 1 (135). S. 186–192.
3. Sokhatsky, A. V. (2010). *Teoretychni osnovy stvorennia aerodynamichnykh komponovan perspektyvnykh shvydkisnykh transportnykh aparativ* [Theoretical bases of creation of aerodynamic layouts of perspective high-speed transport vehicles] (dys. doktora tekhnichnykh nauk). Dnipropetrovsk. Ukraina.
4. The 13th International conference on magnetically levitated systems and linear drives” “MAGLEV’93”. Argona National laboratory USA. 1993. 464 p.
5. Prykhodko O., Sokhatsky A. On the aerodynamic calculation of high-speed ground transport vehicles. 17th international conference on magnetically levitated systems and linear drives. Swiss Federal Institute of technology. Lausanne, 2002. N PP05201. P. 11.
6. The 9th International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH2021) in, Chiba, Japan, Nov. 23–25, 2021. URL: https://web.apollon.nta.co.jp/stech2021/symposium_venue
7. The 1st International Conference on Ultra-High-Speed Transportation, March 1-2, 2021 was organized by the Technical University of Munich, Germany. URL: <https://www.maglevboard.net/en/the-conferences/342-2021-brazil-ismb17-conference>
8. The 25th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives was hosted by Changsha, PR China, October 18–19, 2022. URL: <https://www.maglevboard.net/en/the-conferences/306-2022-pr-china-the-maglev-2022-conference>