

А. В. Сохацький, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем та технологій Академії митної служби України

КОНЦЕПЦІЯ ФОРМУВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО КОМПОНУВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТРАНСПОРТНОГО АПАРАТУ НА НАДПРОВІДНИХ МАГНІТАХ

Розглядається проблема розробки методології створення аеродинамічного компонування транспортних апаратів на надпровідних магнітах. Пропонується підхід, що ґрунтується на розв'язуванні зв'язаної задачі аеродинаміки, електродинаміки та динаміки руху з використанням математичних моделей різного рівня складності.

There is considered the problem of design the methodology of creation of the aerodynamic assembling of the high-speed vehicle on superconducting magnets. There is offered the method based on the solution of the coupled aerodynamics, electrodynamics and dynamics of movement problem with the use of mathematical models of different level of complexity.

Ключові слова. Аеродинамічне компонування, надпровідні магніти, транспортний апарат, математичне моделювання.

Вступ. Основою методології формування аеродинамічного компонування є математичне та фізичне моделювання. Проте створення аеродинамічного компонування транспортного апарату – зворотна задача: необхідно вибрати форму корпусу, аеродинамічних поверхонь, взаємне розміщення елементів так, щоб величини похідних давали саме той розв'язок рівнянь руху, який відповідає заданим критеріям руху. Суперечливість багатьох вимог, що ставляться до аеродинамічного компонування транспортного апарату, не дозволяють виробити однозначний критерій оцінювання його досконалості. Для розв'язання цієї проблеми необхідно використовувати моделювання, яке дасть можливість розробляти раціональні форми транспортних апаратів залежно від його призначення й режимів руху.

© **А. В. Сохацький, 2009**

На сьогодні проблема формування аеродинамічного компонування розв'язується еволюційним шляхом: вибирається прототип транспортного апарату і шляхом модифікації його складових проектується новий [1, 2]. Створення транспортних апаратів на нових фізичних принципах потребує розробки більш ефективних підходів, адже прототипів немає.

Окрім цього, існує ряд істотних труднощів, пов'язаних із невизначеністю математичних співвідношень для показників ефективності, як функцій параметрів, що описують геометрію поверхні транспортного апарату та його кінематичних і масових характеристик. Аеродинамічне компонування має таку множинність показників ефективності, з яких одні бажано обернути в максимум, другі – в мінімум, а іншим надати певних значень. Жоден з цих показників не може бути вибраний як головний. Формулювання системи показників – не таке вже просте завдання. Самі показники ефективності та їх упорядкованість за важливістю залежать від того, які задачі виконуватиме транспортний апарат. Наявність значної кількості показників ефективності, різнорідних за фізичним змістом та ступенем важливості робить її багатокритеріальною, а мету задачі – невизначеною. Формальними методами перебороти невизначеність мети неможливо. Необхідно скоротити діапазон невизначеності до розумних розмірів.

Постановка завдання. Теорія проектування літальних апаратів не визначає склад та кількість критеріїв і тим самим допускає ситуацію, за якої відбір кращих з альтернативних варіантів неможливий тому, що всім показникам ефективності в рівному ступені відповідає декілька технічних розв'язків [1, 2]. Розшукувати оптимальний розв'язок на шляху встановлення розрізень у долях процентів між показниками ефективності немає сенсу. Невизначеність вихідних даних на ранніх стадіях проектування призводить до значних похибок. Необхідно мінімізувати кількість критеріїв без зниження достовірності результатів системного аналізу. Для цього пропонується поетапний пошук раціонального аеродинамічного компонування (рис. 1).

Досягти успіху можна тільки шляхом знаходження критеріїв, які мають лежати в певних межах. Для цього необхідно розв'язувати зв'язану задачу аеродинаміки, електродинаміки та динаміки руху.

Метод розв'язування задачі. У загальному випадку сама задача динаміки руху транспортного апарату на надпровідних магнітах є надзвичайно складною і може бути досліджена найбільш повно тільки через математичне моделювання з використанням високопродуктивних ЕОМ. Але і цей підхід має істотні проблеми. Це обумовлено нелінійним характером досліджуваних рівнянь, неоднозначними та багатофункціональними залежностями параметрів руху, впливом передісторії руху і т. п. У зв'язку з цим розглядається проблема розв'язування зв'язаної задачі аеродинаміки та динаміки руху транспортних

апаратів на надпровідних магнітах з поетапним моделюванням, шляхом використання математичних моделей різного рівня складності (рис. 1, 2).

Повна математична модель зв'язаної задачі аеродинаміки, електродинаміки та динаміки руху транспортного засобу має містити найбільш точну математичну модель аеродинаміки [3, 4], електромагнітної взаємодії [5], динаміки руху, дані фізичного моделювання, тестові розрахунки, обробку одержаних результатів та їх аналіз (рис. 3).

ПРОЕКТНІ ПАРАМЕТРИ
ТРАНСПОРТНОГО
АПАРАТА

ПРОЕКТНІ РОЗРАХУНКИ
МАСОВИХ
ТА ГЕОМЕТРИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК

ЕТАП 3 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ РІВНЯНЬ НАВІС-СТОКСА
--

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
НА РОЗРОБКУ
ТРАНСПОРТНОГО АПАРАТА
НА НАДПРОВІДНИХ МАГНІТАХ

СИНТЕЗ КОМПОНУВАННЯ

ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ

ФОРМА
ТРАНСПОРТНОГО АПАРАТА
НА НАДПРОВІДНИХ МАГНІТАХ

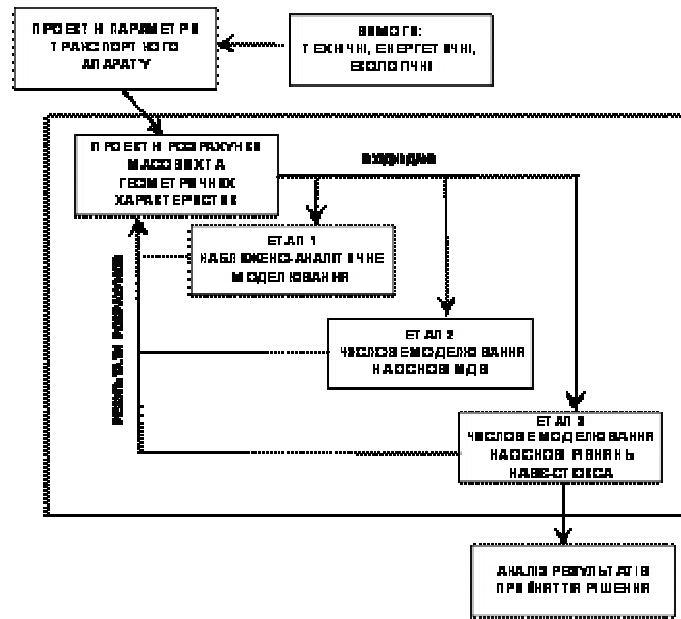


Рис. 1. Етапи формування аеродинамічного компонентування

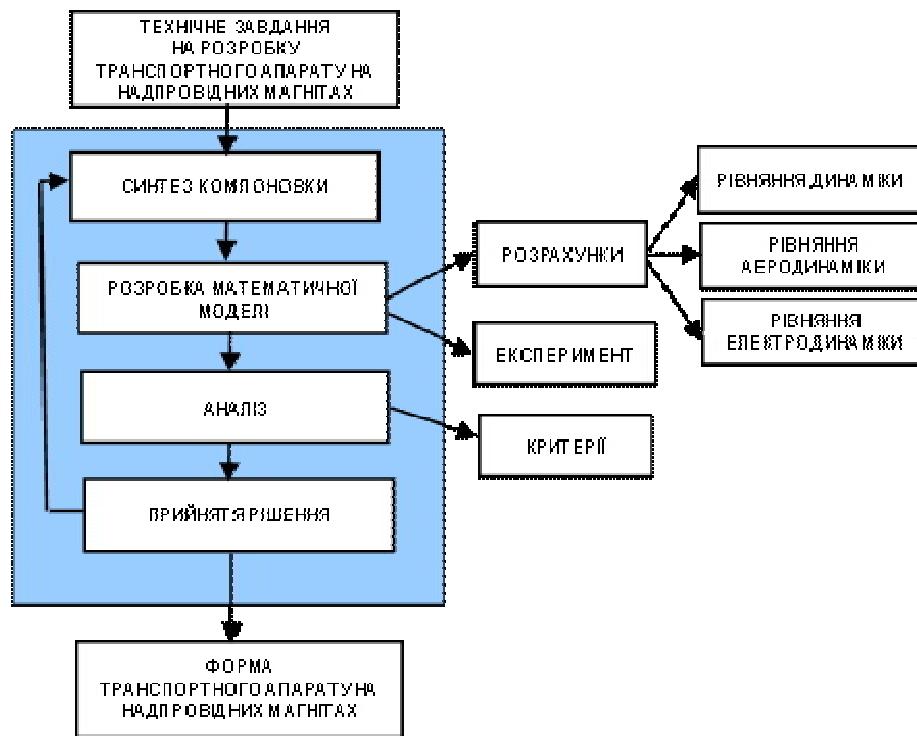


Рис. 2. Алгоритм формування аеродинамічного компонентування транспортного апарату на надпровідних магнітах

Система рівнянь для розв'язування зв'язаної задачі аеродинаміки, електродинаміки та динаміки руху транспортного засобу має вигляд:

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

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

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}_m}{\partial \xi_m} + \frac{\partial \vec{F}_m^{diff}}{\partial \xi_m} = \vec{S}_q + \vec{S}_{XYZ}; \quad (3)$$

$$p = f(p_{oc}, \rho, T, V, \Phi); \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = f(\gamma, \vartheta, \psi, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}, t); \quad (5)$$

$$\vec{R}_{mag} = \vec{R}_{mag}(V, \gamma, \vartheta, \psi, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}, h); \quad (6)$$

$$\vec{F} = \vec{F}(p, k, \rho, V, h, \alpha, \beta, \gamma, \vartheta, \psi, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}, \delta_c, P_{ps}, R_{mag}); \quad (7)$$

$$\vec{M} = \vec{M}(p, k, \rho, V, h, \alpha, \beta, \gamma, \vartheta, \psi, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}, \delta_c, P_{ps}, R_{mag}); \quad (8)$$

де \vec{F}, \vec{M} – вектор сил та моментів;

\vec{K} – момент кількості руху;

\vec{R}_{mag} – вектор магнітних сил;

p – тиск;

k – параметр, що характеризує турбулентний стан атмосфери;

ρ – густина повітря;

\vec{V} – вектор швидкості руху транспортного апарату;

h – відстань до шляхової структури;

$\frac{\partial \vec{F}}{\partial m}, \frac{\partial \vec{M}}{\partial m}$ – вектор конвективних та дифузійних потоків;

\vec{S}_q – джерельний член;

\vec{S}_{XYZ} – джерельний член, що визначається типом системи координат;

$\varphi = \{\gamma, \vartheta, \psi\}, \alpha, \beta, \gamma, \vartheta, \psi, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}$ – кути атаки, ковзання, крену, тангажу, ристання та їх похідні за часом;

$q = \{\alpha, u, v, w, e, \Phi, \Psi\}$ – вектор густини потоку величини q ;

P_{ps} – тяга силових установок;

δ_c – дія органів керування транспортного засобу.

Процес моделювання починається з аналізу фізичного процесу, що дозволяє структурувати його складові на основні та другорядні. Залежно від мети етапу дослідження той самий фактор вважатиметься важливим або другорядним. На першому етапі пропонується використовувати наближено-аналітичну модель, яка дозволяє провести розрахунки з малими часовими та матеріальними затратами.

АНАЛІЗ
РЕЗУЛЬТАТІВ
ЧИСЛОВОГО
ТА ФІЗИЧНОГО
ЕКСПЕРИМЕНТІВ

АЕРОДИНАМІЧНЕ
КОМПОНУВАННЯ
ТРАНСПОРТНОГО
ЗАСОБУ

ОБРОБКА
РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ ТА
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

АЛГОРИТМИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ
ЗВ'ЯЗАНОЇ ЗАДАЧІ
ДИНАМІКИ РУХУ

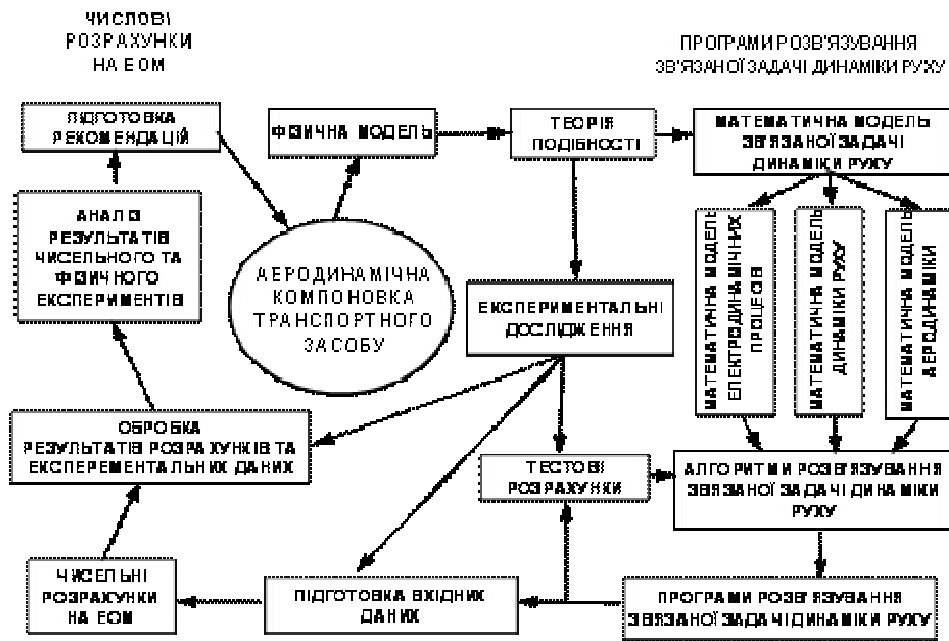


Рис. 3. Процедура формування аеродинамічного компонування транспортного апарата на надпровідних магнітах шляхом розв'язування зв'язаної задачі аеродинаміки, електродинаміки та динаміки руху

Для цього за результатами аналізу даних, проведених експериментальних і теоретичних досліджень одержано аналітичні співвідношення для визначення аеродинамічних коефіцієнтів транспортного засобу поблизу шляхової структури. Пропонується вести їх розрахунок на основі аеродинамічних характеристик для безмежного потоку за такими співвідношеннями:

$$C_{x\,zv}(h) = C_{x\,zv} \left(1 + \frac{1}{k_{x1\,zv}} \pi \cdot \exp(-k_{x2\,zv} \cdot \bar{h}_{zv}) \right), \quad (9)$$

$$C_{y\,zv}(h) = C_{y\,zv} \left(1 + \frac{1}{k_{y1\,zv}} \pi \cdot \exp(-k_{y2\,zv} \cdot \bar{h}_{zv}) \right). \quad (10)$$

$$C_{z\,zv}(h) = C_{z\,zv} \left(1 + \frac{1}{k_{z1\,zv}} \pi \cdot \exp(-k_{z2\,zv} \cdot \bar{h}_{zv}) \right). \quad (11)$$

$$m_{x\,zv}(h) = m_{x\,zv} \left(1 + \frac{1}{k_{mx1\,zv}} \pi \cdot \exp(-k_{mx2\,zv} \cdot \bar{h}_{zv}) \right), \quad (12)$$

$$m_{y\,zv}(h) = m_{y\,zv} \left(1 + \frac{1}{k_{my1\,zv}} \pi \cdot \exp(-k_{my2\,zv} \cdot \bar{h}_{zv}) \right), \quad (13)$$

$$m_{zTV}(h) = m_{zactv} \left(1 + \frac{1}{k_{mszTV}} \cdot \pi \cdot \exp \left(-k_{mszTV} \cdot \bar{h}_{TV} \right) \right), \quad (14)$$

де $\bar{h} = h/L$ – відносна відстань до шляхової структури,
 L – характерний розмір транспортного засобу,

$C_{xactv}, C_{yactv}, C_{zactv}, M_{xactv}, M_{yactv}, M_{zactv}$ – коефіцієнти аеродинамічних сил та моментів визначені в умовах безмежного потоку.

Проведені розрахунки показали придатність запропонованих співвідношень для розрахунку аеродинамічних характеристик транспортного апарата поблизу шляхової структури. Для прикладу на рис. 4 показано величину коефіцієнта лобового опору, одержаного шляхом розрахунку та в експерименті [6, 7].

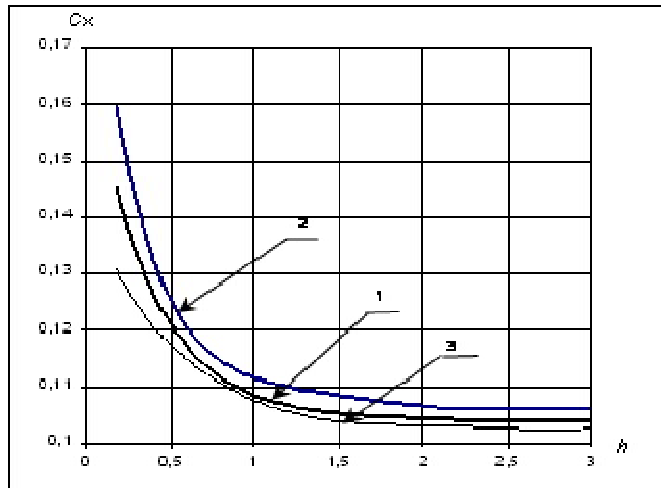


Рис. 4. Порівняння коефіцієнта лобового опору для моделі транспортного апарата, одержаного шляхом розрахунку та фізичного експерименту.
 1 – розрахунок, 2 – експеримент [7], 3 – експеримент [6]

У міру поглиблення досліджень будуються нові досконаліші математичні моделі, що більш детально описують явища. Тому на другому етапі раціонально використати такий підхід, який би будувався на моделі ідеальної рідини, але відтворював фізику відривного обтікання транспортного апарата. Таким методом є метод дискретних вихорів (МДВ). Він базується на рівняннях для потенціалу швидкості, які зводяться до системи інтегральних сингулярних рівнянь [8]. Зображення газового потоку ідеальною рідиною дозволяє сформулювати її як задачу Неймана для рівняння Лапласа

$$\Phi_0(M_0) = \frac{1}{4\pi} \int_L \frac{\partial U_0(M, M_0)}{\partial \bar{n}_M} g(M) d\sigma_M, \quad M_0 \notin \sigma \quad (15)$$

$$\Phi(M) = \frac{1}{4\pi} \int_L \frac{\partial U(M, M_0)}{\partial \bar{n}_M} g(M) d\sigma_M, \quad M_0 \notin \sigma, \quad (16)$$

де \bar{n}_M – орт нормалі до кривої L у точці M ; $g(M)$ – густина потенціалу подвійного шару, $M(x, y, z), M_0(x_0, y_0, z_0)$

– точки простору R^3 , $M \neq M_0$, $\bar{r}_{M, M_0} = \frac{MM_0}{r_{M, M_0}}$, $r_{M, M_0} = |\bar{r}_{M, M_0}| = \frac{MM_0}{r_{M, M_0}}$, що задовольняють рівнянню Лапласа.

$$U_0(M, M_0) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{ikr_{M, M_0}}}{r_{M, M_0}}$$

Функція задовольняє рівняння Гельмгольца за координатами точки M для будь-якої фіксованої точки M_0 .

На третьому етапі використовується модель течії, що описується рівняннями Нав'є – Стокса

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = H_q + H_r, \quad (17)$$

де $q = \{\rho, u, v, w, e, \vec{v}\}$ E, F, G, Φ – сумарні конвективно-дифузійні потоки;

H_q – вектор джерельних членів;

H_r – вектор, що відображає тип системи координат.

Для замикання системи рівнянь Нав'є–Стокса (17) в розроблених алгоритмах та програмах використовується модель турбулентності Спаларта–Аллмараса в реалізації від'єднаних вихорів.

Усі етапи моделювання доповнюються відповідними рівняннями з електродинаміки залежно від системи підвісу [5]. Вважається, що найбільш ефективними, але й більш технологічно складними та високовартісними є системи підвісу з дискретними шляховими контурами [5]. На сьогодні найбільш ефективною вважається нуль-потоківна схема дискретних шляхових контурів з їх розміщенням у вертикальній площині паралельно один до одного [5]. Секції шляхової обмотки в цих пристроях складаються з двох окремих котушок, розміщених одна над одною і з'єднаних зустрічно. Якщо надпровідний магніт рухається уздовж шляхового полотна так, що його поздовжня вісь симетрії не збігається з поздовжньою віссю симетрії шляхових секцій, тобто є деяке вертикальне зміщення, то в шляховій обмотці починає протікати струм, пропорціональний зміщенню, і, отже, виникає електромагнітна сила, пропорціональна зміщенню. Середнє та миттєве значення цієї сили визначається за формулою [5]:

$$F_L = \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} f_L dx, \quad (18)$$

$$f_L = I_S \sum_{g=-\infty}^{g=\infty} i_g \frac{\partial M_{i_g}}{\partial y}, \quad (19)$$

де i_g – величина струму в шляхових контурах,

M_{i_g} – коефіцієнт взаємодукції котушок.

Середню силу електродинамічного гальмування та її миттєве значення може бути розраховано за виразами [5]

$$F_D = \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} f_d dx, \quad (20)$$

$$f_d = I_S \sum_{g=-\infty}^{g=\infty} i_g \frac{\partial M_{i_g}}{\partial x}. \quad (21)$$

Теплові витрати в контурах визначаються як

$$P_g = \frac{1}{H} \sum_{g=-\infty}^{g=\infty} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} i_g^2 R_g dx. \quad (22)$$

Величину струму i_g у шляхових контурах можна знаходити через розв'язання диференціальних рівнянь через коефіцієнт взаємодукції M_{i_g} [5]

$$R_g i_g + L_g \frac{di_g}{dt} = -I \frac{dM_{i_g}}{dt}. \quad (23)$$

Для магнітозв'язаних шляхових контурів струм i_g дискретної шляхової може бути знайдено із системи рівнянь, складених згідно із законом Кірхгофа [5]:

$$\begin{array}{cccccc}
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\dots & + M_{-3-1} \frac{di_{-3}}{dt} & + M_{-2-1} \frac{di_{-2}}{dt} & + R_{\varepsilon}^{j-1} & + I_{\varepsilon} \frac{di_{-1}}{dt} & + \\
& + M_{0-1} \frac{di_0}{dt} & + M_{1-1} \frac{di_1}{dt} & + M_{2-1} \frac{di_2}{dt} & + M_{3-1} \frac{di_3}{dt} & + \dots = e_{-1} \\
& + M_{-3-0} \frac{di_{-3}}{dt} & + M_{-2-0} \frac{di_{-2}}{dt} & + M_{-1-0} \frac{di_{-1}}{dt} & + R_{\varepsilon}^{j0} & + \\
\dots & + I_{\varepsilon} \frac{di_0}{dt} & + M_{1-0} \frac{di_1}{dt} & + M_{2-0} \frac{di_2}{dt} & + M_{3-0} \frac{di_3}{dt} & + \dots = e_0 \\
& + M_{-31} \frac{di_{-3}}{dt} & + M_{-21} \frac{di_{-2}}{dt} & + M_{-11} \frac{di_{-1}}{dt} & + M_{01} \frac{di_0}{dt} & \\
& + R_{\varepsilon}^{j1} & + I_{\varepsilon} \frac{di_1}{dt} & + M_{21} \frac{di_2}{dt} & + M_{13} \frac{di_3}{dt} & + \dots = e_1 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots
\end{array} \quad (24)$$

Висновки. Таким чином, за результатами математичного та фізичного моделювання, узагальнення експериментальних і теоретичних досліджень аеродинаміки та динаміки руху запропоновано методологію формоутворення аеродинамічного компонування високошвидкісного транспортного апарата на надпровідних магнітах. Основними складовими розробленої методології є:

- наближено-аналітичний метод, алгоритм і програмне забезпечення для визначення аеродинамічних параметрів аеродинамічного компонування;
- методики, алгоритми та програмне забезпечення на основі використання сингулярних інтегральних рівнянь для математичного моделювання нелінійних нестационарних аеродинамічних процесів під час обтікання компонування транспортного засобу просторовим потоком;
- методики-алгоритми та програмне забезпечення на основі числового розв’язування осереднених рівнянь Нав’є–Стокса, замкнених моделлю турбулентності Спаларта–Аллмараса в реалізації від’єднаних вихорів;
- методи фізичного моделювання обтікання компонування транспортного засобу поблизу шляхової структури.

Література

1. Егер С. М. Проектирование самолетов [Текст] / С. М. Егер, В. Ф. Мишин, Н. К. Лисейцев, А. А. Бадягин, В. Е. Рогин. – М. : Машиностроение, 1983. – 616 с.
2. Кюхеман Д. Аэродинамическое проектирование самолетов [Текст] / Д. Кюхеман ; пер. с англ. Н. А. Благовещенский, Г. И. Майкапар ; под ред. Г. И. Майкапара. – М. : Машиностроение, 1983. – 656 с.
3. Приходько А. А. Математическое и экспериментальное моделирование аэродинамики транспортных систем вблизи земли [Текст] / А. А. Приходько, А. В. Сохацкий. – Днепропетровск : Наука и образование, 1998. – 154 с.
4. Приходько А. А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене [Текст] / А. А. Приходько. – К. : Наукова думка, 2003. – 380 с.
5. Дзензерский В. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией [Текст] / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, С. А. Сергеев. – К. : Наукова думка, 2001. – 480 с.
6. Гухо В. Г. Аэродинамика автомобиля [Текст] / В. Г. Гухо. – М. : Машиностроение, 1987. – 420 с.
7. Hansen M., Schlör W.K Der AVA-Versuchswagen. AVA – Bericht 43W26. Gettingen, 1943.
8. Сохацкий А. В. Метод побудови розв’язку зв’язаної задачі аеродинаміки та динаміки руху високошвидкісного магнітолевітуючого транспортного засобу [Текст] / А. В. Сохацкий // Вісник Академії митної служби України. – 2008. – № 3 (39). – С. 90–97.