

Подригало М. А., Шеїн В.С.  
*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

## МАСШТАБНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АВТОМОБІЛЯ

Випробування дослідних зразків автомобілів та іншої мобільної техніки є невід'ємною частиною їх виробництва. Отримані результати таких випробувань дозволяють робити висновок про можливість подальшого запуску в серійне виробництво. Виробництво натурального дослідного зразка та його випробування вимагає значних витрат ресурсів, зокрема – часу. Тому актуальним було та лишається випробування масштабних моделей. При проведенні випробувань масштабної моделі особливо важливим є забезпечення вірогідності отриманих результатів. Указана вірогідність забезпечується як коректним вибором масштабної подоби (масштабних коефіцієнтів), так і точністю вимірювань зазначених величин при проведенні випробувань. Метою дослідження є скорочення часу і зменшення витрат при розробці й постановці на виробництво автомобілів та іншої мобільної техніки шляхом використання випробувань масштабних моделей за рахунок підвищення вірогідності отриманих результатів.

У запропонованому дослідженні розглянуто метод вибору масштабних коефіцієнтів для фізичних величин, що входять до функції стану автомобіля, а також вимоги до точності вимірювань на масштабних моделях. У роботі представлено результати розрахунку масштабних коефіцієнтів для основних фізичних величин, які використовуються при побудові математичних моделей автомобілів та інших колісних машин. У дослідженні також встановлено взаємозв'язок між максимальною допустимою похибкою вимірювань при проведенні натурних випробувань і похибкою при випробуваннях масштабних моделей. У результаті проведеного дослідження визначено взаємозв'язок між лінійним масштабним коефіцієнтом та масштабними коефіцієнтами інших фізичних величин, які до сьогодні не були визначені. Визначено залежності відношення максимально допустимих похибок вимірювань при проведенні натурних випробувань і випробувань масштабних моделей від лінійного масштабного коефіцієнта моделі для різних фізичних величин.

**Ключові слова:** випробування автомобілів, функція стану автомобіля, натурні випробування, масштабне моделювання, похибка вимірювань, масштаб подоби.

### ВСТУП

Натурне (масштабне) моделювання широко використовується в різних галузях науки і техніки, що спростило та пришвидшило процес впровадження нових технічних рішень у виробництво.

Одним з найбільш відомих історичних фактів, які дійшли до нас, було натурне моделювання стійкості лінійних суден у дослідному басейні в м. Санкт-Петербурзі, що було виконано на початку минулого століття академіком Олексієм Миколайовичем Криловим. Завдяки натурному моделюванню, йому вдалося створити систему стабілізації положення остова судна при частковому затопленні водою, що попередило перекидання броненосця «Орел» у Цусімській битві.

При проведенні випробувань масштабної моделі особливо важливим є забезпечення вірогідності отриманих результатів. Вказана вірогідність забезпечується як коректним вибором масштабної подоби (масштабних коефіцієнтів), так і точністю вимірювань зазначених величин при проведенні випробувань.

У запропонованому дослідженні розглядається метод вибору масштабних коефіцієнтів для фізичних величин, що входять до функції стану автомобіля, а також вимоги до точності вимірювань на масштабних моделях.

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Натурне моделювання широко використовується в різноманітних галузях науки і техніки: авіабудуванні, автомобілебудуванні, енергетичному машинобудуванні. Наприклад, при конструюванні нових зразків лопатних машин проводять лабораторні дослідження на моделях: перевіряються і остаточно встановлюється форма лопатей робочого колеса та спрямовуючого апарату, визначається ККД насоса та його зміна в залежності від кількості обертів, продуктивності, напору, а також досліджується явище кавітації [1].

Теоретичною базою для проведення випробувань з використанням натурних моделей є теорія подоби чи теорія узагальнених змінних [2].

Уперше натурне моделювання руху автомобіля було виконане в інституті автомобільних інженерів в Англії [3]. Проводилися досліди по оцінці впливу гальмування передніх і задніх коліс на стійкість при гальмуванні моделі автомобіля. Як зазначав академік Е.О. Чудаков, результати цього експерименту добре узгоджувалися з результатами наступних теоретичних досліджень (див. рис. 1).

У подальшому натурне моделювання використовувалося О.С. Курочкіним при дослідженні механіки повороту тягача з причепом [4] і В.М. Поляковим при дослідженні маневреності триланкових автопоїздів [5]. Натурне моделювання використовувалося також представниками наукової школи професора В.П. Сахно [6], зокрема, П.Б. Прогній розглядав при дослідженні стійкості автомобіля у процесі гальмування [7].

Як свідчить досвід, використання натурального (масштабного) моделювання дозволяє з великою точністю підтверджувати результати теоретичних досліджень, забезпечити процес наукових досліджень і скоротити час підготовки виробництва нових виробів.

У мережі «Internet» отримали розповсюдження відеоролики руху моделей залізничних потягів на макетах міст. Дуже часто відеокамеру встановлюють у кабіні моделі тепловозу, електровозу чи паровозу. У глядача складається враження, що він їде по реальній, а не по іграшковій залізниці. Це враження складається тому, що при проектуванні моделі залізниці були коректно вибрані масштабні коефіцієнти.

При виборі масштабних коефіцієнтів потрібно не тільки визначити лінійні розміри моделі  $L_M$ , але також і швидкість, час, масу, моменти інерції, коефіцієнти жорсткості, демпфування та інші.

Для побудови системи масштабних коефіцієнтів необхідно створити математичну модель (систему диференціальних рівнянь), що описує динаміку натурального (початкового) об'єкту.

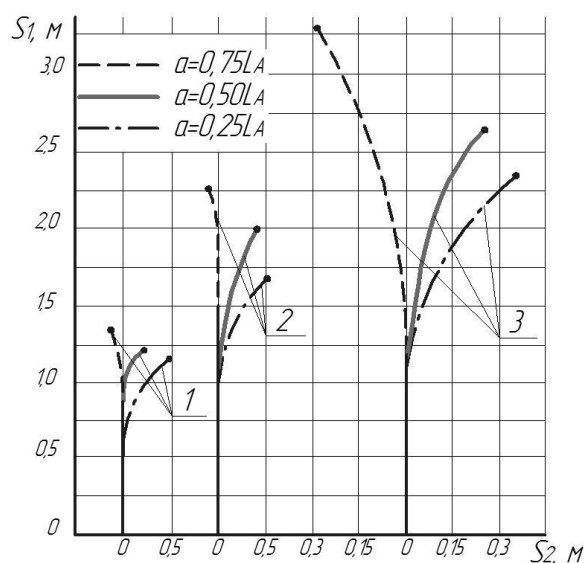


Рисунок 1 – Траєкторії руху центру мас моделі автомобіля при різному його положенні ( $\alpha$ ) відносно бази  $L_A$  і різної швидкості руху  $V$ : 1 –  $V=11,2$  км/год; 2 –  $V=15,9$  км/год; 3 –  $V=17,7$  км/год [3]

Нехай під дією збуджуючих сил рама автомобіля разом з колесами за рахунок еластичності шин отримала кутове зміщення  $\Psi$ . При цьому на колесах виникнуть пружні та демпфувальні сили періодичного характеру, що викликають відведення автомобіля від траєкторії в горизонтальній площині відносно центральної вертикальної осі. Вплив пружних та демпфувальних сил на динаміку автомобілів також розглядав в своїй роботі Д.Р. Елліс [8].

Диференціальне рівняння кутового руху автомобіля в площині дороги у роботі В.С. Колеснікова та В.В. Персіанова має такий вигляд:

$$Y_{Zc} \cdot \frac{d^2\Psi}{dt^2} + \frac{d\Psi}{dt} \cdot (a\lambda_a + b\lambda_b) + \Psi(a \cdot c_a + bc_b) + \sum_{i=1}^h M_{Zi}^b = 0, \quad (1)$$

де  $Y_{Zc}$  – момент інерції автомобіля відносно центральної вертикальної осі;

$\frac{d^2\Psi}{dt^2}$  – кутове прискорення автомобіля в площині дороги;

$a, b$  – відстань від передньої та задньої осей до проекції центру мас автомобіля на горизонтальну площину, що проходить через ці осі;

$\lambda_a, \lambda_b$  – поперечні коефіцієнти загасання шин передніх і задніх коліс, відповідно;

$\sum_{i=1}^h M_{Zi}^b$  – проекція суми усіх збуджуючих моментів (що повертають автомобіль у площині дороги)

на ось  $OZ$ .

Диференціальне рівняння поступового руху центру мас

$$m \left\{ \frac{d^2 Z}{dt^2} + \frac{d\omega_X}{dt} \cdot Z + \frac{d\omega_Y}{dt} \cdot X + \omega_Z \cdot (\omega_X \cdot Z + \omega_Y \cdot Y) + \omega_P^2 \cdot Z \right\} + \sum_{i=1}^h F_{Zi}^b = 0, \quad (2)$$

де  $m$  – маса автомобіля;

$\frac{d^2 Z}{dt^2}$  – проекція на ось  $OZ$  лінійного прискорення центру мас автомобіля в поступальному русі;

$\frac{d\omega_X}{dt}, \frac{d\omega_Y}{dt}$  – проекції на осі  $OX$  та  $OY$  кутового прискорення центру мас автомобіля;

$Z, X, Y$  – лінійні зміщення центру мас автомобіля впродовж осей  $OX, OY, OZ$ ;

$\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$  – проекції на осі  $OX, OY$  та  $OZ$  кутової швидкості обертання автомобіля відносно центру мас;

$\omega_P$  – кутова швидкість обертання центру мас відносно полюса повороту автомобіля.

Подібні перетворення початкових рівнянь [9] призводять до часткових інваріантних рівнянь зв'язку, що встановлюють залежності між фізичними характеристиками процесу. Для розв'язання подібних задач використовується критеріальна залежність виду, що характеризує явище, яке вивчається [9]

$$N_e = f(H_O; F_r; C_O; K_b; K_C; K_Y; K_Z), \quad (3)$$

де  $N_e = \frac{F \cdot t}{m \cdot V}$  – критерій Ньютона, що є основною характеристикою механічної подоби та встановлює залежність між силовими і швидкісними полями;

$H_O = \frac{V \cdot t}{L}$  – критерій гомохронності (безрозмірний час), що характеризує нестационарне явище;

$F_r = \frac{g \cdot L}{V^2}$  – критерій Фруда; встановлює залежність між полями тяжіння й інерційними полями;

$C_O = \frac{m \cdot V^2}{F \cdot L}$  – критерій Коши, що характеризує напружений стан системи, якщо під  $V$  розуміти швидкість пружних деформацій системи;

$K_b = \frac{m \cdot \omega^2}{K}$  – критерій відновлення, що характеризує пружні зв'язки системи;

$K_C = \frac{m \cdot \omega}{\beta}$  – критерій опору, що характеризує демпфувальні зв'язки системи;

$K_Y = \frac{F}{V \cdot c}$  – критерій уводу, що характеризує пружні властивості шин;

$K_Z = \frac{F}{V \cdot \lambda}$  – критерій демпфування, що характеризує дисипативні властивості шин.

Для забезпечення вірогідності результатів, отриманих за допомогою масштабних моделей, необхідно здійснювати коректний вибір масштабних коефіцієнтів. У роботі В.С. Колеснікова та В.В. Персіанова розглянуто послідовність побудови системи масштабних коефіцієнтів для механічного явища. Першим й основним є лінійний масштабний коефіцієнт, оскільки ця величина безрозмірна, то його можливо називати просто лінійним масштабом. Його величина визначається як відношення натурального лінійного розміру (характерного розміру)  $L_H$  до відповідного лінійного розміру  $L_M$  моделі

$$m_L = \frac{L_H}{L_M}. \quad (4)$$

При використанні натурального моделювання для оцінки гальмівних властивостей автомобілів і визначення масштабного коефіцієнту (масштабу) швидкості зручно використовувати довжину гальмівного шляху. Для натурального зразка автомобіля та для його моделі довжини гальмівного шляху можуть бути визначені за наступними приближеними формулами, що зазначені в роботах В.С. Колеснікова та В.В. Персіанова:

$$S_H = \frac{V_H^2}{2g}; \quad (5)$$

$$S_M = \frac{V_M^2}{2g}, \quad (6)$$

де  $S_H, S_M$  – гальмівні шляхи натурального автомобіля та його моделі при умові миттєвого зростання гальмівних сил від нуля до граничних, за умови блокування коліс, значень;

$V_H^2, V_M^2$  – квадрати лінійних швидкостей натурального автомобіля та його моделі;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ .

Якщо взяти відношення лівих та правих частин рівнянь (5) і (6), то отримаємо у лівій частині лінійний масштаб

$$m_L = \frac{S_H}{S_M} = \left( \frac{V_H}{V_M} \right)^2 = m_V^2. \quad (7)$$

З виразу (7) визначимо

$$m_V = m_L^{1/2}. \quad (8)$$

Час руху натурального автомобіля та моделі може бути визначено як:

$$t_H = \frac{S_H}{V_H}; \quad (9)$$

$$t_M = \frac{S_M}{V_M}. \quad (10)$$

Повторюючи операцію поділу лівої та правої частин рівнянь (9) на ліву та праву частину виразу (10), отримаємо

$$m_t = \frac{t_H}{t_M} = \frac{S_H}{S_M} \cdot \frac{V_M}{V_H} = \frac{m_L}{m_V} = \sqrt{m_L}. \quad (11)$$

При умові розгону з місця швидкості натурального автомобіля  $V_H$  та його моделі  $V_M$  можуть бути визначені як

$$V_H = a_H \cdot t_H; \quad (12)$$

$$V_M = a_M \cdot t_M, \quad (13)$$

де  $a_H, a_M$  – прискорення натурального автомобіля та його моделі, відповідно.

Однак у роботах В.С. Колеснікова та В.В. Персіанова не визначено масштаби сил  $m_F$  та маси  $m_M$ . Крім того, у відомих дослідженнях не розглянуто питання забезпечення достовірності результатів випробувань за рахунок точності вимірювання фізичних величин.

### ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є скорочення часу і зменшення витрат при розробці й постановці на виробництво автомобілів та іншої мобільної техніки шляхом використання випробувань масштабних моделей за рахунок підвищення вірогідності отриманих результатів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити масштабні коефіцієнти фізичних величин, які не були визначені раніше;
- визначити вимоги до точності вимірювання фізичних величин, які можуть входити до функції стану математичного опису динаміки мобільних машин.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для визначення масштабів  $m_F$  та  $m_M$  використаємо закон Гука

$$F = c \cdot x, \quad (14)$$

де  $c$  – жорсткість стержня;

$$c = E \cdot f, \quad (15)$$

$E$  – модуль пружності першого роду (модуль Юнга);

$f$  – площа поперечного перерізу стрижня;

$F$  – сила, що прикладено до стрижня;

$x$  – деформація стрижня (змінення лінійного розміру).

Масштаб сили  $F$

$$m_F = \frac{F_H}{F_M} = \frac{c_H}{c_M} \cdot \frac{x_H}{x_M} = m_C \cdot m_L. \quad (16)$$

Масштаб жорсткості

$$m_C = \frac{c_H}{c_M} = \frac{f_H}{f_M} = m_L^2. \quad (17)$$

Розміри площини поперечного перерізу мають розмірність квадрату лінійного розміру, що дає право запису рівняння (17). Таким чином рівняння (16) прийме такий вигляд:

$$m_F = m_L^3 = m_M. \quad (18)$$

Масштабний коефіцієнт потужності

$$m_N = \frac{F_H \cdot V_H}{F_M \cdot V_M} = m_F \cdot m_V = m_L^3 \cdot \sqrt{m_L} = m_L^{7/2}. \quad (19)$$

Масштабний коефіцієнт роботи (енергії)

$$m_W = \frac{F_H \cdot S_H}{F_M \cdot S_M} = m_F \cdot m_L = m_L^3 \cdot m_L = m_L^4, \quad (20)$$

де  $S_H, S_M$  – лінійні зміщення натурального автомобіля та масштабної моделі.

Поділення лівих та правих частин рівняння (12) на відповідні частини рівняння (13) дає наступний результат:

$$m_V = \frac{V_H}{V_M} = \frac{a_H}{a_M} \cdot \frac{t_H}{t_M} = m_a \cdot m_t = m_a \cdot \sqrt{m_L}. \quad (21)$$

З виразу (14) визначимо:

$$m_a = \frac{m_V}{\sqrt{m_L}} = \frac{\sqrt{m_L}}{\sqrt{m_L}} = 1. \quad (22)$$

З рівняння (22) видно, що при натурному моделюванні масштаб прискорення  $m_a=1$ . Це зрозуміло, оскільки ми розглядаємо рух як натурального автомобіля, так і його моделі в полі тяжіння Землі, в якому діє прискорення  $g=9,81 \text{ м/с}^2$  вільного падіння. Таким чином, при натурному моделюванні масштаб прискорень завжди дорівнює одиниці. Напевно, що в цьому випадку масштаб сили  $m_F$  буде дорівнювати масштабу маси  $m_M$ .

У таблиці 1 наведені відомі та отримані авторами масштабні коефіцієнти (масштаби подоби) фізичних величин, що можуть входити до функції стану мобільної машини.

Адекватність результатів натурних та модельних випробувань, у свою чергу, залежить також і від точності вимірювань фізичних величин. Як зазначається в роботі Х. Харта [10] вимоги до похибок вимірювань залежать від того чи може допускатися визначена похибка, чи похибка повинна бути за можливості зменшена. І це рішення буває довільним. У вимірювальній техніці існує правило [10]: «Вимірювати не так точно як можливо, а так точно, як необхідно».

Проведемо оцінку показників точності вимірювальних фізичних величин при проведенні модельних випробувань та визначимо їхній взаємозв'язок з показниками точності при проведенні натурних випробувань.

Таблиця 1 – Масштаби подоби механічних величин

№ п/п	Найменування механічної величини	Розмірність	Масштаб подоби	Формула для розрахунку масштабу подоби
1	Лінійний розмір (характерний)	$[L]$ , м	$m_L$	$L_H / L_M$
2	Час	$[t]$ , с	$m_t$	$\sqrt{m_L}$
3	Маса	$[m]$ , кг	$m_M$	$m_L^3$
4	Швидкість	$[L \cdot t^{-1}]$ , м/с	$m_V$	$\sqrt{m_L}$
5	Сила	$[m \cdot L \cdot t^{-2}]$ , Н	$m_F$	$m_L^3$
6	Потужність	$[F \cdot V]$ , Вт	$m_N$	$m_L^{7/2}$
7	Робота (енергія)	$[N \cdot t]$ , Дж	$m_W$	$m_L^4$
8	Момент інерції	$[m \cdot L^2]$ , кг·м <sup>2</sup>	$m_Y$	$m_L^5$
9	Коефіцієнт жорсткості	$[F / L]$ , Н/м	$m_c$	$m_L^2$
10	Коефіцієнт загасання	$[F \cdot t \cdot L^{-1}]$ , Н·с/м	$m_\beta$	$m_L^{5/2}$
11	Коефіцієнт відводу шин	$[F]$ , Н/рад	$m_Y = m_\delta$	$m_L^3$
12	Коефіцієнт демпфування шини	$[F \cdot t]$ , Нс	$m_\lambda$	$m_L^{5/2}$

Розглянемо вимоги до точності вимірювань лінійних величин. Із залежності (4), шляхом диференціювання, визначимо

$$\frac{dL_H}{dL_M} = m_L. \quad (23)$$

Після переходу від безкінечно малих величин до кінцевих, отримаємо

$$m_L = \frac{\Delta L_H}{\Delta L_M}, \quad (24)$$

де  $\Delta L_H$ ,  $\Delta L_M$  – похибки визначення лінійних розмірів натурального зразка та моделі автомобіля, відповідно.

У кожному стандарті на натурні випробування автомобілів й інших мобільних машин визначаються максимальні значення похибок вимірювання, у тому числі й на лінійні розміри. У такому разі, при обраному лінійному масштабному коефіцієнті  $m_L$  похибка вимірювання при модельних випробуваннях не повинна перевищувати величини

$$\Delta L_M \leq \frac{\Delta L_H}{m_L}. \quad (25)$$

Тому, максимально припустима величина похибки вимірювання лінійних розмірів при модельних випробуваннях становить

$$[\Delta L_M]_{\max} = \frac{\Delta L_H}{m_L}. \quad (26)$$

Якщо мінімально можлива похибка вимірювання, що визначається можливостями вимірювальної техніки становить  $[\Delta L_M]_{\min}$ , то максимально припустимий масштабний коефіцієнт буде дорівнювати

$$[m_L]_{\max} = \frac{\Delta L_H}{[\Delta L_M]_{\min}}. \quad (27)$$

Аналогічним чином розглянемо інші фізичні величини.  
Максимально припустимий масштабний коефіцієнт часу

$$[m_t]_{\max} = \frac{\Delta t_H}{[\Delta t]_{\min}} = [\sqrt{m_L}]_{\max}, \quad (28)$$

де  $\Delta t_H$  – вимоги до похибки вимірювання часу при стандартних випробуваннях натурних автомобілів;  
 $[\Delta t]_{\min}$  – мінімально можлива похибка вимірювання часу при модельних випробуваннях.  
Максимально припустимий масштабний коефіцієнт маси

$$[m_M]_{\max} = \frac{\Delta M_H}{[\Delta M_M]_{\min}} = [m_L^3]_{\max}, \quad (29)$$

де  $\Delta M_H$  – вимоги до похибки вимірювання маси при натурних випробуваннях за стандартом;  
 $[\Delta M_M]_{\min}$  – мінімально припустима похідна вимірювання маси при випробуваннях на масштабній моделі.

Максимально припустимий масштабний коефіцієнт швидкості

$$[m_V]_{\max} = \frac{\Delta V_H}{[\Delta V_M]_{\min}} = [\sqrt{m_L}]_{\max}, \quad (30)$$

де  $\Delta V_H$  – вимоги до похибки вимірювання швидкості при стандартних натурних випробуваннях;  
 $[\Delta V_M]_{\min}$  – мінімально припустима похибка вимірювання швидкості при модельних випробуваннях.

Таким чином, для інших фізичних величин отримано залежності для максимально припустимих масштабних коефіцієнтів

$$[m_F]_{\max} = [m_L^3]_{\max} \text{ – для зусилля}; \quad (31)$$

$$[m_N]_{\max} = [m_L^{7/2}]_{\max} \text{ – для потужності}; \quad (32)$$

$$[m_W]_{\max} = [m_L^4]_{\max} \text{ – для роботи та енергії}; \quad (33)$$

$$[m_I]_{\max} = [m_L^5]_{\max} \text{ – для моментів інерції}; \quad (34)$$

$$[m_C]_{\max} = [m_L^2]_{\max} \text{ – для показників жорсткості}; \quad (35)$$

$$[m_\beta]_{\max} = [m_L^{5/2}]_{\max} \text{ – для коефіцієнтів згасання}; \quad (36)$$

$$[m_\delta]_{\max} = [m_L^3]_{\max} \text{ – для коефіцієнтів відводу шин}; \quad (37)$$

$$[m_\lambda]_{\max} = [m_L^{5/2}]_{\max} \text{ – для коефіцієнтів демпфування шин}. \quad (38)$$

З аналізу рівнянь (26) – (38) видно, що максимально можливий лінійний масштабний коефіцієнт з умови забезпечення адекватності вимірювання різних фізичних величин змінюється. У загальному вигляді його величину можна визначити як

$$[m_L]_{\max} = \left( \frac{\Delta X_H}{[\Delta X_M]_{\min}} \right)^K, \quad (39)$$

де  $\Delta X_H$  – похибка, що регламентується для вимірювання будь-якої фізичної величини при натурних випробуваннях;

$[\Delta X_M]_{\min}$  – мінімально можлива похибка вимірювання величини при модельних випробуваннях;

$K$  – показник ступеня, який залежить від природи фізичної величини (табл. 2)

На рис. 2 наведено графіки залежності (39) при різних значеннях показника ступеня  $K$ . Аналіз цих графіків показує, що величина  $[m_L]_{\max}$  дуже обмежена, особливо при малих значеннях показника ступеня  $K$  (див. табл. 3).

Таблиця 2 – Показники ступеня  $K$  в формулі (39)

Фізична величина	Показник ступеню, $K$
Лінійний розмір	1
Час	2
Маса	1/3
Швидкість	2
Сила	1/3
Потужність	2/7
Енергія (робота)	1/4
Момент інерції	1/5
Жорсткість	1/2
Коефіцієнт загасання	2/5
Коефіцієнт відводу шин	1/3
Коефіцієнт демпфування шин	2/5

Підвищити максимально припустимий масштабний коефіцієнт  $[m_L]_{\max}$  можливо за рахунок зменшення, у порівнянні з натурними випробуваннями похибок вимірювання фізичних величин. З рівняння (39) отримаємо

$$[\Delta X_M]_{\min} = \frac{\Delta X_H}{m_L^{1/K}} \quad (40)$$

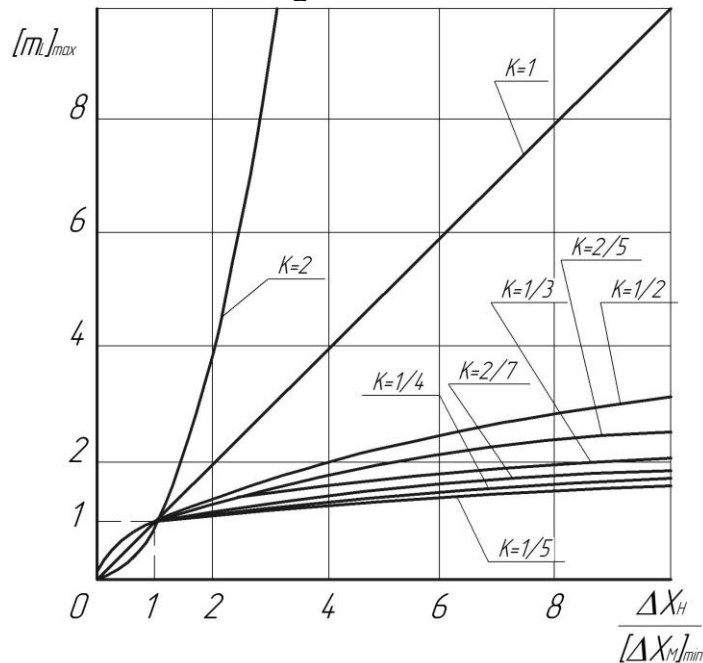


Рисунок 2 – Залежність  $[m_L]_{\max} = F\left(\frac{\Delta X_H}{[\Delta X_M]_{\min}}\right)$  для різних фізичних величин



Таблиця 3 – Розрахунок раціональних масштабних коефіцієнтів

$\frac{\Delta X_H}{[\Delta X_M]_{\min}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K$	$[m_L]_{\max}$									
1/5	1,00	1,15	1,25	1,32	1,38	1,43	1,48	1,52	1,55	1,58
1/4	1,00	1,19	1,32	1,41	1,49	1,56	1,63	1,68	1,73	1,78
2/7	1,00	1,22	1,37	1,49	1,58	1,67	1,74	1,81	1,87	1,93
1/3	1,00	1,26	1,44	1,59	1,71	1,82	1,91	2,00	2,08	2,15
2/5	1,00	1,32	1,55	1,74	1,90	2,05	2,18	2,30	2,41	2,51
1/2	1,00	1,41	1,73	2,00	2,24	2,45	2,65	2,83	3,00	3,16
1	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
2	1,00	4,00	9,00	16,00	25,00	36,00	49,00	64,00	81,00	100,00

Приймаючи  $[\Delta X_M]_{\min} = \Delta X_M$ , запишемо

$$\frac{\Delta X_M}{\Delta X_H} = m_L^{-1/K}. \quad (41)$$

У таблиці 4 наведено результати розрахунку відношення  $\frac{\Delta X_M}{\Delta X_H}$  від масштабного коефіцієнту  $m_L$  для різних значень показника  $K$ , а на рис. 3 – відповідні графіки залежності. Аналіз графіків на рис. 3 показав, що при масштабному моделюванні найбільш висока точність повинна бути при вимірюванні лінійних розмірів ( $K=1$ ), швидкості та часу ( $K=2$ ). З ростом лінійного масштабного коефіцієнту  $m_L$  вимоги до точності вимірювання фізичних величин зростають.

Таблиця 4 – Вимоги точності вимірювань на масштабній моделі

$m_L$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K$	$\Delta X_M / \Delta X_H$									
1/5	1,00	0,87	0,80	0,76	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,63
1/4	1,00	0,84	0,76	0,71	0,67	0,64	0,61	0,59	0,58	0,56
2/7	1,00	0,82	0,73	0,67	0,63	0,60	0,57	0,55	0,53	0,52
1/3	1,00	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,52	0,50	0,48	0,46
2/5	1,00	0,76	0,64	0,57	0,52	0,49	0,46	0,43	0,41	0,40
1/2	1,00	0,71	0,58	0,50	0,45	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
1	1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10
2	1,00	0,25	0,11	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01

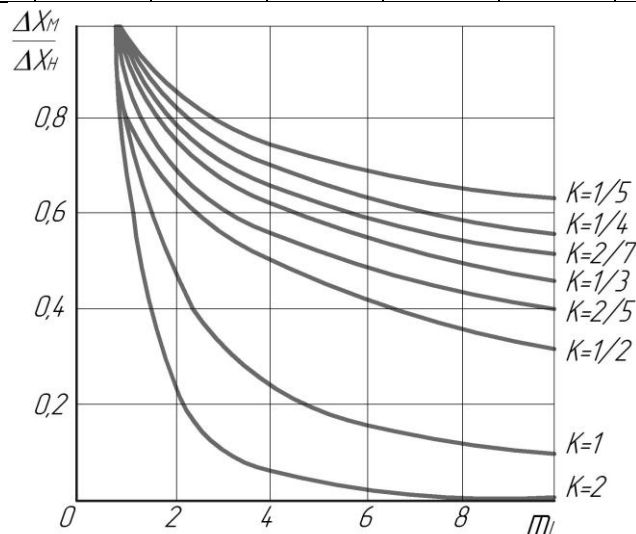


Рисунок 3 – Потрібне співвідношення між точністю вимірювань при випробуваннях на масштабній моделі та при натурних випробуваннях

## ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для проведення випробувань натурних моделей необхідно витратити значні ресурси, що, зокрема, впливає на строки постановки на виробництво продукції. Отриманню достовірних даних випробувань дослідних зразків та заощадженню часу в умовах вибагливості ринку та економічних труднощів сприяє масштабне моделювання при проведенні випробувань масштабних моделей.

Визначення максимально припустимих величин похибки вимірювання лінійних розмірів при модельних випробуваннях та максимально припустимих масштабних коефіцієнтів фізичних величин дозволило зробити висновок, що максимально можливий лінійний масштабний коефіцієнт з умови забезпечення адекватності вимірювання різних фізичних величин змінюється. Величина максимально можливого лінійного масштабного коефіцієнта при малих значеннях показника ступеня, що залежить від природи фізичних величин, дуже обмежена, а для її збільшення необхідне підвищення вимог до точності вимірювання фізичних величин.

Аналіз співвідношення між точністю вимірювань при масштабних та натурних випробуваннях показав, що при масштабному моделюванні найбільш висока точність повинна бути при вимірюванні лінійних розмірів, швидкості та часу.

## ВИСНОВКИ

1. У результаті проведеного дослідження визначено взаємозв'язок між лінійним масштабним коефіцієнтом та масштабними коефіцієнтами інших фізичних величин, які до сьогодні не були визначені. Побудова системи масштабних коефіцієнтів сприяє підвищенню вірогідності випробувань автомобілів та інших мобільних машин на масштабних моделях.

2. Збільшення лінійного масштабного коефіцієнту  $m_L$  дозволяє зменшити матеріальні витрати та термін проведення випробувань масштабних моделей автомобілів й інших мобільних машин. Але це потребує підвищення вимог до точності вимірювання фізичних величин.

3. У результаті проведеного дослідження визначено залежності допустимих похибок вимірювання фізичних величин залежно від обраного масштабу подоби. Зі зростанням коефіцієнту  $m_L$  необхідно зменшувати відношення похибки  $\frac{\Delta X_M}{\Delta X_H}$ .

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Угинчус А.А. Гидравлика и гидравлические машины. Харків : ХГУ, 1970. 295 с.
2. Gukhman A.A. Introduction to the Theory of Similarity. London : Academic Press, 1965. 256 p.
3. Olley M. Road Manners of the Modern Car. *Proceedings of the Institution of Automobile Engineers*. London, 1946. 41(1). Pp. 523-551. DOI:10.1243/PIAE\_PROC\_1946\_041\_034\_02
4. Курочкин О.С. Дослідження маневреності та стійкості автомобільного поїзда з довгобазним багатовісним напівпричепом: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 1978. 161 с.
5. Поляков В.М., Сахно В.П. Триланкові автопоїзди. Маневреність: монографія. Луганськ : Вид-во «Ноулідж», 2014. 206 с.
6. Автомобілі. Стійкість: монографія / В.Г. Вербицький, В.П. Сахно та ін. Луганськ : Вид-во «Ноулідж», 2013. 176 с.
7. Прогній П.Б. До аналізу стійкості автопоїзда у гальмівному режимі. *Вісник національного транспортного університету*. 2013. Випуск 27. С. 299-305.
8. Ellis J.R. Vehicle Dynamics. London : Business Books Limited, 1969. 243 p.
9. Sedov L.I. Similarity And Dimensional Methods In Mechanics. London : Academic Press, 1959. 363 p. DOI: 10.1016/C2013-0-08173-X.
10. Hans Hart Einführung in die Messtechnik 5, Durchgesehene Auflage. VEB Verlag Technik Berlin, 1989. 379 s.

## REFERENCES

1. Uginchus A.A. (1970). Gidravlika i gidravlicheskiye mashiny. Kharkiv: KHGU. 295 s. [In Ukrainian].
2. Gukhman A.A. (1965). Introduction to the Theory of Similarity. London: Academic Press. 256 p.
3. Olley M. (1946). Road Manners of the Modern Car. *Proceedings of the Institution of Automobile Engineers*. London, 41(1), pp. 523-551. DOI:10.1243/PIAE\_PROC\_1946\_041\_034\_02.
4. Kurochkin O.S. (1978). Doslidzhennya manevrenosti ta stiykosti avtomobil'noho poyizda z dovhobaznym bahatovisnym napivprychepom: dys. ... kand. tekhn. nauk. Kyiv. 161 s. [In Ukrainian].

5. Polyakov V. M., Sakhno V. P. (2014). Trylankovi avtopoyizdy. Manevrenist': monohrafiya. Luhans'k : Vyd-vo «Noulidzh». 206 s. [In Ukrainian].
6. Avtomobili. Stiykist': monohrafiya / V.H. Verbyts'kyy, V.P. Sakhno ta in. (2013). Luhans'k : Vyd-vo «Noulidzh»,. 176 s. [In Ukrainian].
7. Prohnyy P.B. (2013). Do analizu stiykosti avtopoyizda u hal'mivnomu rezhymi. Visnyk natsional'noho transportnoho universytetu. Vypusk 27. S. 299-305. [In Ukrainian].
8. Ellis J.R. (1969). Vehicle Dynamics. London : Business Books Limited. 243 p.
9. Sedov L.I. (1959). Similarity And Dimensional Methods In Mechanics. London: Academic Press. 363 p. DOI: 10.1016/C2013-0-08173-X.
10. Hans Hart (1989). Einführung in die Messtechnik 5, Durchgesehene Auflage. VEB Verlag Technik Berlin. 379 s.

***M. Podryhalo, V. Shein. Large-scale simulation in carrying out experimental investigations of a car***

Testing prototypes of cars and other mobile equipment is an integral part of their production. The results obtained from such tests suggest the possibility of further production. The production and testing of a full-scale prototype requires considerable resources, in particular time. Therefore, the testing of large-scale models was and remains relevant. When testing a scale-up model, it is especially important to ensure the reliability of the obtained results. This possibility is ensured both by the correct choice of large-scale similarities (scale coefficients) and by the accuracy of the measurements of the specified values during the tests. The purpose of the study is to reduce time and costs in the development and production of automobiles and other mobile machinery by using large-scale model tests by increasing the reliability of the obtained results.

In the proposed research, the method of choosing scale coefficients for physical quantities included in the automobile state function, as well as requirements to the accuracy of measurements on scale models is considered. The paper presents the results of the calculation of scale coefficients for the main physical quantities used in the construction of mathematical models of cars and other wheeled vehicles. The study also found a correlation between the maximum permissible measurement error of full-scale tests and the error of large-scale model tests. As a result of the conducted research, the relationship between the linear scale coefficient and scale coefficients of other physical quantities, which have not been determined so far, has been determined. The dependence of the ratio of the maximum allowable measurement errors during field tests and tests of large-scale models on the linear scale coefficient of the model for various physical quantities was determined.

**Key words:** vehicle tests, vehicle state function, full-scale tests, scale simulation, measurement error, similarity scale.

*ПОДРИГАЛО Михайло Абович*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, E-mail: [pmikhab@gmail.com](mailto:pmikhab@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>.

*ШЕЇН Віталій Сергійович*, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, E-mail: [sheinvitalis@gmail.com](mailto:sheinvitalis@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9282-0190>.

*Mykhailo PODRYHALO*, doctor of technical science, head of Technology of Machinery Manufacturing and Machine Maintenance Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, E-mail: [pmikhab@gmail.com](mailto:pmikhab@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>.

*Vitalii SHEIN*, Ph.D., associate professor, associate professor of Technology of Machinery Manufacturing and Machine Maintenance Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, E-mail: [sheinvitalis@gmail.com](mailto:sheinvitalis@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9282-0190>

DOI 10.36910/automash.v1i20.1048