

РАЦІОНАЛЬНА ДИНАМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОМОБІЛЯ

¹Національна академія Національної гвардії України, м. Харків

ВСТУП

Високі показники динамічності автомобілів повинні бути реалізовані при мінімальних затратах енергії двигуна. Поява автомобілів з комбінованим електромеханічним приводом дозволяє вирішити вказану проблему. В режимі розгону управління рухом машини доцільно здійснювати за допомогою електричної частини приводу.

Дослідження вибору раціональної швидкості руху за умовою забезпечення високих динамічних показників автомобіля розглядається в роботах [1, 2]. В роботі [3] визначений взаємозв'язок між потужністю двигуна, що витрачається на розгін автомобіля, швидкістю руху й рекомендованим прискоренням

$$m_a V_a \cdot \dot{V}_a = \frac{\Delta N_e \eta_{mp}}{\delta_{об}}, \quad (1)$$

де m_a – маса автомобіля; V_a, \dot{V}_a – лінійні швидкість й прискорення автомобіля; ΔN_e – додаткова потужність двигуна, що витрачається на розгін автомобіля; η_{mp} – ККД трансмісії; $\delta_{об}$ – коефіцієнт врахування обертових мас двигуна й трансмісії [4, 5];

$$\delta_{об} = 1 + \tau_1 + \tau_2 \cdot U_{kn}^2; \quad (2)$$

U_{kn} – передаточне число коробки передач; $\tau_1; \tau_2$ – коефіцієнти, що враховують вплив обертових мас, які пов'язані з ведучими колесами постійним й змінним передаточними відношеннями, $\tau_1=0,03 - 0,05$; $\tau_2=0,04 - 0,06$.

Розгін автомобіля від швидкості V_a до швидкості $V_a + \Delta V_a$ буде відбуватись до настання нової рівноваги (тягового балансу [3]). У роботах [1, 2] отримано рівняння, що визначає умову настання наступної рівноваги при більшій швидкості автомобіля, рівній $V_a + \Delta V_a$

$$\Delta N_e \eta_{mp} = m_a g \psi (V_{a1} - V_a) + k F (V_{a1}^3 - V_a^3), \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g=9,81$ м/с; ψ – сумарний коефіцієнт дорожнього опору; k – коефіцієнт опору повітря; F – площа лобового аеродинамічного опору (мідель) автомобіля; V_{a1} – швидкість, за якої настає нова рівновага автомобіля,

$$V_{a1} = V_a + \Delta V_a. \quad (4)$$

В роботах [1, 2], із рівняння (3) з врахуванням співвідношень (1) і (4), отримано алгебраїчне кубічне рівняння відносно параметра ΔV_a

$$(\Delta V_a)^3 + 3V_a (\Delta V_a)^2 + \left(3V_a^2 + \frac{m_a g \psi}{kF} \right) \Delta V_a - \frac{m_a \delta_{об}}{3kF} V_a \dot{V}_a = 0. \quad (5)$$

Завдання, що вирішується у роботах [1, 2], передбачало визначення функції $\Delta V_a(V_a)$, а потім отримання раціональної швидкості (V_a), що забезпечує $(\Delta V_a)_{max}$. Автори наукових праць [1, 2] відмовились від розв'язання рівняння (5) за допомогою виразу Кардано [6] й використовували наближені й чисельні розв'язання. На рис. 1 наведені залежності $\Delta V_a(V_a)$, що побудовані у роботах [1, 2] наближеними й чисельними методами без точного аналітичного розв'язання рівняння (5).

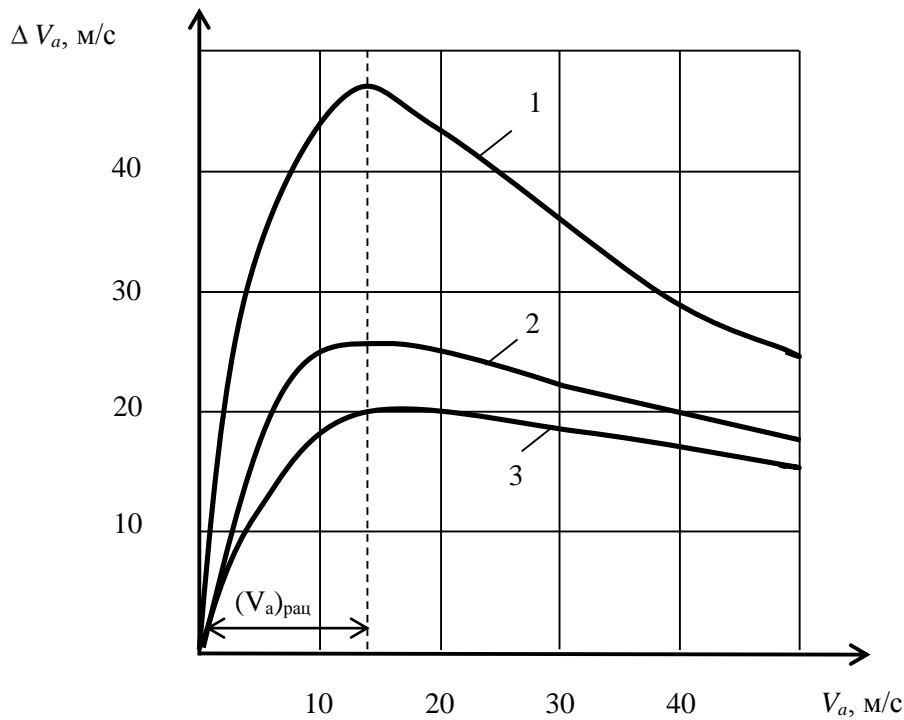


Рисунок 1 – Графік залежностей $\Delta V_a(V_a)$ при: $\psi=0,017$; $kF/m_a=0,0003 \text{ м}^{-1}$; $\delta_{oo}=1,176$ [1, 2]

Крива 3 на рис. 1 побудована в результаті чисельного розв’язання рівняння (5). Крива 1 на рис. 1 – при виключенні із рівняння (5) членів $(\Delta V_a)^3$ й $(\Delta V_a)^2$, а крива 2 – при $(\Delta V_a)^3=0$. Авторів робіт [1, 2] цікавили точки максимуму кривих 1, 2, 3. Аналіз цих кривих дозволив їм зробити висновки про те, що точки максимуму вказаних кривих збігаються. Вони визначаються залежністю

$$(V_a)_{\text{рац}} = \sqrt{\frac{m_a g \psi}{3kF}}. \quad (6)$$

Однак у роботах [1, 2] для визначення $(\Delta V_a)_{\text{max}}$ було запропоновано наближений аналітичний вираз, оскільки розв’язання кубічного алгебраїчного рівняння за виразом Кардано було трудомістким. Для отримання точного розв’язку необхідно розв’язати рівняння (5).

Метою дослідження є покращення динаміки розгону автомобіля шляхом раціонального управління швидкістю його руху.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити максимальне збільшення швидкості в залежності від початкової швидкості й прискорення автомобіля;
- побудувати раціональну динамічну характеристику автомобіля.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

В класичній постановці необхідно спочатку розв’язати рівняння (5) відносно ΔV_a , а потім здійснити пошук максимуму відомими методами [1, 2]

$$\begin{cases} \frac{d(\Delta V_a)}{dV_a} = 0; \\ \frac{d^2(\Delta V_a)}{dV_a^2} < 0. \end{cases} \quad \text{– при оптимальному значенні } V_a. \quad (7)$$

Пропонується спочатку продиференціювати рівняння (5) за V_a . У цьому випадку вказане рівняння матиме вигляд

$$3(\Delta V_a)^2 + 3 \left[(\Delta V_a)^2 + 2V_a \Delta V_a \frac{d\Delta V_a}{dV_a} \right] + 3 \left(V_a^2 \frac{d\Delta V_a}{dV_a} + 2V_a \Delta V_a \right) + \frac{m_a g \psi}{kF} \frac{d\Delta V_a}{dV_a} - \frac{m_a \delta_{об}}{kF} \dot{V}_a = 0. \quad (8)$$

Максимум функції (те, що є екстремумом видно на рис. 1) $\Delta V_a(V_a)$ досягається при $d\Delta V_a/dV_a=0$. При $d\Delta V_a/dV_a=0$ вираз (8) матиме такий вигляд:

$$3(\Delta V_a)^2 + 6V_a \Delta V_a - \frac{m_a \delta_{об}}{kF} \dot{V}_a = 0, \quad (9)$$

або

$$(\Delta V_a)^2 + 2V_a \Delta V_a - \frac{m_a \delta_{об}}{3kF} \dot{V}_a = 0. \quad (10)$$

Розв'язання рівняння (10) з врахуванням кореня, що має фізичний сенс, отримаємо у вигляді

$$\Delta V_a = (\Delta V_a)_{\max} = -(V_a)_{\text{рац}} + \sqrt{(V_a)_{\text{рац}}^2 + \frac{m_a \delta_{об}}{3kF} \dot{V}_a}. \quad (11)$$

Вираз (11) пов'язує між собою максимальне збільшення швидкості руху $(\Delta V_a)_{\max}$ і раціональну швидкість $(V_a)_{\text{рац}}$, при якій можна реалізувати вказане збільшення.

Пропонується розв'язати рівняння (5) відносно V_a . У цьому випадку вказане рівняння перетвориться до вигляду

$$V_a^2 + \left(\Delta V_a - \frac{m_a \dot{V}_a \delta_{об}}{3kF \Delta V_a} \right) V_a + \frac{m_a g \psi}{3kF} = 0. \quad (12)$$

Розв'язок квадратного рівняння (12)

$$V_{a1,2} = \frac{m_a \dot{V}_a \delta_{об}}{6kF \Delta V_a} - \frac{\Delta V_a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{m_a \dot{V}_a \delta_{об}}{6kF \Delta V_a} - \frac{\Delta V_a}{2} \right)^2 - \frac{m_a g \psi}{3kF}}. \quad (13)$$

Графік залежності $V_a(\Delta V_a)$ буде представляти собою повернутий на 90° графік, що представлений на рис. 1

Із графіка, що наведено на рис. 2 видно, що $(\Delta V_a)_{\max}$ реалізується при $V_a = (V_a)_{\text{рац}}$ й при $V_{a1} = V_{a2}$.

Умова $V_{a1} = V_{a2}$ реалізується при дискримінанті квадратичного рівняння, що дорівнює нулю, тобто при

$$\left(\frac{m_a \dot{V}_a \delta_{об}}{6kF \Delta V_a} - \frac{\Delta V_a}{2} \right)^2 - \frac{m_a g \psi}{3kF} = 0. \quad (14)$$

Із рівняння (14) визначимо

$$\Delta V_a = (\Delta V_a)_{\max} = \sqrt{\frac{m_a g \psi}{3kF} \left[\frac{\dot{V}_a \delta_{об}}{g \psi} + 2 \left(1 - \sqrt{1 + \frac{\dot{V}_a \delta_{об}}{g \psi}} \right) \right]}. \quad (15)$$

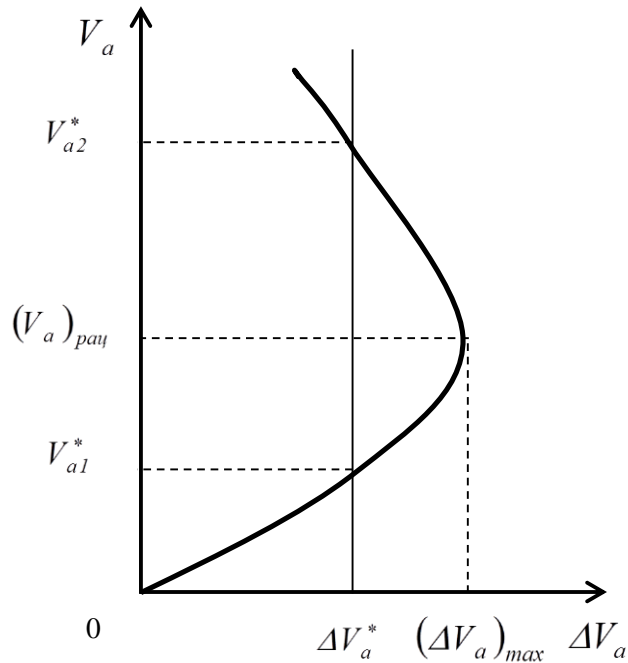


Рисунок 2 – Графік залежності $V_a(V_a)$

Таким чином згідно із виразом (13)

$$V_a = (V_a)_{рац} = \sqrt{\frac{m_a g \psi}{3kF}} \frac{\sqrt{1 + \frac{\dot{V}_a \delta_{об}}{g \psi} - 1}}{\sqrt{\frac{\dot{V}_a \delta_{об}}{g \psi} + 2 \left(\sqrt{1 + \frac{\dot{V}_a \delta_{об}}{g \psi} - 1} \right)}}. \quad (16)$$

Порівнюючи між собою вирази (6) й (16) можна зробити висновок про те, що аналітичний розв'язок рівняння (5) дозволив уточнити раніше отриманий наближений результат (6). Поправочний коефіцієнт

$$K_{попр} = \frac{\sqrt{1 + \frac{\dot{V}_a \delta_{об}}{g \psi} - 1}}{\sqrt{\frac{\dot{V}_a \delta_{об}}{g \psi} + 2 \left(\sqrt{1 + \frac{\dot{V}_a \delta_{об}}{g \psi} - 1} \right)}}. \quad (17)$$

Вирази (15) й (16) дозволяють не тільки визначати параметри $(\Delta V_a)_{max}$ і $(V_a)_{рац}$, але й отримати раціональну динамічну характеристику автомобіля.

Рівняння (16) розв'яжемо відносно прискорення \dot{V}_a . В результаті отримаємо

$$\dot{V}_a = \frac{8g\psi V_a^2}{\delta_{об}} \frac{\frac{m_a g \psi}{3kF} + V_a^2}{\left(\frac{m_a g \psi}{3kF} - V_a^2 \right)^2}. \quad (18)$$

Аналіз залежності (18) показує, що при виконанні рівності (6) величина $\dot{V}_a \rightarrow \infty$.

Рівняння (18) описує закон управління прискоренням, що забезпечує динаміку розгону автомобіля при найменших витратах енергії. Із виразу (18) отримаємо диференціальне рівняння розгону автомобіля

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{8g\psi V_a^2}{\delta_{об}} \frac{\frac{m_a g \psi}{3kF} + V_a^2}{\left(\frac{m_a g \psi}{3kF} - V_a^2\right)^2}. \quad (19)$$

Рівняння (19) є диференціальним рівнянням зі змінними, що розділяються

$$\int_{V_a}^{V_{a1}} \frac{\left(\frac{m_a g \psi}{3kF} - V_a^2\right)^2}{\left(\frac{m_a g \psi}{3kF} + V_a^2\right) V_a^2} dV_a = \frac{8g\psi}{\delta_{об}} \int_0^{t_p} dt. \quad (20)$$

В результаті розв'язання диференціального рівняння (20) знаходимо час розгону t_p від швидкості V_a до швидкості $V_{a1} = V_a + (\Delta V_a)_{\max}$ при раціональному управлінні прискоренням автомобіля

$$t_p = \frac{\delta_{об}}{8g\psi} \left\{ (V_{a1} - V_a) \left[\begin{aligned} & \left(1 + \frac{m_a g \psi}{3kF \cdot V_a \cdot V_{a1}} - 4 \sqrt{\frac{m_a g \psi}{3kF}} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \left[\arctg \left(V_{a1} \sqrt{\frac{3kF}{m_a g \psi}} \right) - \arctg \left(V_a \sqrt{\frac{3kF}{m_a g \psi}} \right) \right] \right] \right] \right\}. \quad (21) \end{aligned} \right.$$

Аналіз рівняння (21) показує, що зі зменшенням $\delta_{об}$ відбувається зменшення часу розгону t_p автомобіля від швидкості V_a до швидкості $V_{a1} = V_a + \Delta V_a$. Величина коефіцієнта врахування обертових мас трансмісії й двигуна близька до одиниці якщо колінчастий вал знаходиться в постійному швидкісному режимі, а розгін автомобіля здійснюється електродвигунами.

Помноживши ліву та праві частини рівняння (18) на величину $m_a V_a \delta_{об} / \eta_{mp}$, отримаємо раціональний закон управління потужністю двигуна при розгоні автомобіля

$$(\Delta N_e)_{рац} = \frac{8m_a g \psi V_a^3}{\eta_{mp}} \frac{\frac{m_a g \psi}{3kF} + V_a^2}{\left(\frac{m_a g \psi}{3kF} - V_a^2\right)^2}, \quad (22)$$

де η_{mp} – ККД трансмісії автомобіля, можна прийняти $\eta_{mp} \approx 0,8$.

На рис. 3 наведено графіки залежності \dot{V}_a (V_a), що побудовані при різних значеннях ψ (криві 2, 3).

На цьому ж рисунку представлено графік (крива 1) залежності граничного прискорення $\left(\dot{V}_a\right)_{гран}$ від швидкості, що відповідає реалізації граничних сил за зчепленням на ведучих колесах автомобіля. Для повнопривідного автомобіля при реалізації граничних сил зі зчепленням на ведучих колесах

$$\left(\dot{V}_a \right)_{гран} = \frac{1}{\delta_{об}} \left(g\varphi_x - \frac{kF}{m_a} V_a^2 \right), \quad (23)$$

де φ_x – поздовжній коефіцієнт зчеплення ведучих коліс з дорогою, приймаємо $\varphi_x = 0,8$.

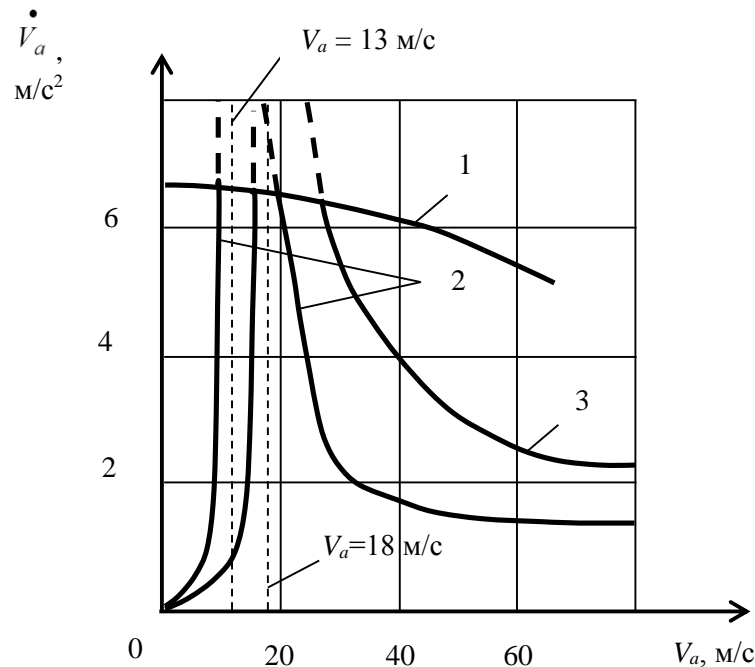


Рисунок 3 – Залежність $\dot{V}_a (V_a)$ для автомобіля з параметром при: $kF/m_a=0,0003 \text{ м}^{-1}$;

$$1 - \dot{V}_{aгран}(V_a); 2 - \psi=0,017; 3 - \psi=0,03; \delta_{об}=1,176 [1, 2]$$

Таким чином, отримані аналітичні вирази дозволяють реалізувати раціональну динамічну характеристику автомобіля. Для прикладу, що розглядається (див. рис. 3) визначено, що раціональна динамічна характеристика може бути реалізована у всьому діапазоні можливих швидкостей від нуля до $V_a = 70 \text{ м/с}$ (252 км/год). В інтервалі швидкостей від 10 м/с до 30 м/с максимальні прискорення автомобіля обмежуються граничними зчіпними можливостями ведучих коліс з дорогою. В точці, що відповідає виконанню умови (6), відбувається розрив функції $\dot{V}_a (V_a)$.

ВИСНОВКИ

1. Отримані аналітичні вирази дозволяють визначати раціональну швидкість усталеного руху автомобіля, при розгоні від якої можливе максимальне збільшення швидкості при мінімальних додаткових витратах потужності двигуна.

2. Отримана динамічна характеристика дозволяє управляти процесом розгону автомобіля за рахунок зміни прискорення в залежності від швидкості руху. Ця динамічна характеристика може бути реалізована в конструкції автомобілів з комбінованим електромеханічним приводом ведучих коліс.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Файст В. Л. Удосконалення вимог до динамічних властивостей легкових автомобілів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» / В. Л. Файст. – Харків, 2012. – 20 с.

2. Динамічні властивості і стабільність функціонування автотранспортних засобів : монографія / Д. В. Абрамов, Н. М. Подригало, М. А. Подригало [та ін.] ; під ред. М. А. Подригало і О. С. Полянського. – Х. : ХНАДУ, 2014. – 204 с.

3. Подригало М. А. Тяговый баланс или дисбаланс автомобиля / М. А. Подригало // Автомобильная промышленность. – М. : Машиностроение, 2010. – № 5. – С. 23–26.
4. Бортницкий П. И. Тягово-скоростные качества автомобилей / П. И. Бортницкий, В. И. Задорожный. – К. : Вища школа, 1978. – 176 с.
5. Волков В. П. Теория эксплуатационных vlastивостей автомобиля / В. П. Волков. – Х. : ХНАДУ, 2003. – 292 с.
6. Малая математическая энциклопедия / Э. Фрид, И. Пастор, И. Рейман [та ін.] ; пер. с венгерского Я. Кочиш и М. Соколов. – Budapest : Akademiai Kiado, 1976. – 693 с.

REFERENCES

1. Fayest V. L. Improvement of requirements for dynamic properties of passenger cars. Author's abstract. dis ... Candidate of technical sciences / Kharkiv. National Technical University of Agriculture. Petro Vasilenko - Kharkiv, 2012. - 20 p.
2. Dynamic properties and stability of the functioning of vehicles. Monograph / [D. V. Abramov, N. M. Underdog, M. A. Underdog, O. S. Polyansky, V. L. Fiesta]; under ed. M. A. Undertaken and O. S. Polyansky - X. : ХНАДУ, 2014 - 204 p.
3. Podrigalo M. A. Traction balance or unbalance of the car. Podrigalo // Automobile industry. – М. : Mechanical engineering, 2010. - №5. - P. 23 - 26.
4. Bortnitsky P. I. Traction-speed qualities of cars / P. I. Bortnitsky, V. I. Zadorozhny – К. : Vishcha school, 1978. - 176 p.
5. Volkov V. P. The theory of operational properties of a car / V. P. Volkov – Kh. KhNADU, 2003. - 292 p.
6. A small mathematical encyclopedia / E. Fried, I. Pastor, I. Reiman, P. Reves, I. Rups; trans. with the Hungarian J. Kocsis and M. Sokolov. - Budapest Akademiai Kiado, 1976. - 693 p.

Р. О. Кайдалов¹, М. А. Подригало¹

РАЦІОНАЛЬНА ДИНАМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОМОБІЛЯ

¹Національна академія Національної гвардії України, м. Харків

В статті розглядається проблема вибору раціональної швидкості руху за умовою забезпечення високих показників динамічності автомобіля.

Об'єкт дослідження – процес розгону автомобіля.

Мета роботи – покращення динаміки розгону автомобіля шляхом раціонального управління швидкістю його руху

Результати проведених досліджень такі: отримано раціональну динамічну характеристику автомобіля (залежність прискорення машини від швидкості), що дозволяє розгін при мінімальних витратах енергії двигуна; одержані аналітичні вирази дозволяють визначати раціональну швидкість усталеного руху автомобіля, при розгоні від якої можливе максимальне збільшення швидкості при мінімальних додаткових витратах потужності двигуна. Отримана динамічна характеристика дозволяє управляти процесом розгону автомобіля за рахунок зміни прискорення в залежності від швидкості руху. Ця динамічна характеристика може бути реалізована в конструкції автомобілів з комбінованим електромеханічним приводом ведучих коліс.

Ключові слова: раціональна динамічна характеристика, мінімальні затрати енергії, динаміка розгону, додаткові витрати потужності, розгін автомобіля.

Кайдалов Руслан Олегович, кандидат технічних наук, заступник начальника науково-дослідного центру, Національна академія Національної гвардії України, м. Харків, e-mail: kaidalov.76@ukr.net

Подригало Михайло Абович, доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник науково-дослідного центру, Національна академія Національної гвардії України, м. Харків, e-mail: pmikhab@gmail.com

RATIONAL DYNAMIC CHARACTERISTIC OF THE VEHICLE

¹National Academy of National Guard of Ukraine, Kharkiv

The issue of choosing a rational speed of the vehicle on the condition of ensuring its high performance is considered in this article.

The object of research is the acceleration process of the vehicle.

The purpose of this work is to improve the acceleration dynamics of the vehicle by rational controlling of its speed.

The results of the conducted research are as follows: the rational dynamic characteristic of the vehicle is obtained (dependence of acceleration of the vehicle on speed), which allows acceleration at the minimum use of the engine's power; analytical expressions are obtained, which allow to determine the certain rational speed of the vehicle, which allows it to accelerate with the maximum rate at minimum use of engine's power. The obtained dynamic characteristic allows controlling the process of vehicle's acceleration by adjusting the acceleration rate, depending on the actual speed of the vehicle. This dynamic characteristic can be realized in the vehicles with a combined electromechanical drivetrain.

Key words: rational dynamic characteristic, minimum use of engine's power, acceleration dynamics, use of extra power, vehicle's acceleration.

Kaydalov Ruslan, candidate of technical sciences, deputy head of the research center, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, e-mail: kaidalov.76@ukr.net

Podhigolo Mikhail, doctor of technical sciences, professor, leading researcher of the research center, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkov, e-mail: pmikhab@gmail.com

P. O. Кайдалов¹, М. А. Подригалo¹

РАЦИОНАЛЬНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОМОБИЛЯ

¹Национальная академия Национальной гвардии Украины, г. Харьков

В статье рассматривается проблема выбора рациональной скорости движения при условии обеспечения высоких показателей динамичности автомобиля.

Объект исследования – процесс разгона автомобиля.

Цель работы – улучшение динамики разгона автомобиля путем рационального управления скоростью его движения

Результаты проведенных исследований следующие: получена рациональная динамическая характеристика автомобиля (зависимость ускорения машины от скорости), позволяющая разгон при минимальных затратах энергии двигателя; получены аналитические выражения, позволяющие определять рациональную скорость установившегося движения автомобиля, при разгоне от которой возможно максимальное увеличение скорости при минимальных дополнительных затратах мощности двигателя. Полученная динамическая характеристика позволяет управлять процессом разгона автомобиля за счет изменения ускорения в зависимости от скорости движения. Эта динамическая характеристика может быть реализована в конструкции автомобилей с комбинированным электромеханическим приводом ведущих колес.

Ключевые слова: рациональная динамическая характеристика, минимальные затраты энергии, динамика разгона, дополнительные затраты мощности, разгон автомобиля.

Кайдалов Руслан Олегович, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского центра, Национальная академия Национальной гвардии Украины, г. Харьков, e-mail: kaidalov.76@ukr.net

Подригалo Михаил Абович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра, Национальная академия Национальной гвардии Украины, e-mail: pmikhab@gmail.com