

УДК 629.113/.115

Пожидаєв С., канд. техн. наук (НУБіП України)

Оцінка енергетичного ККД автомобіля під час розгону

Отримано гранично просте співвідношення, яке дає всебічну характеристику процесу розгону автомобіля. До нього входять лише чотири ключові змінні величини – маса автомобіля, потужність двигуна, час і кінцева швидкість розгону.

Ключові слова: кінетична енергія, маса автомобіля, потужність двигуна, розгін, цикловий ККД.

Вступ. Наука повинна пояснювати навколишній світ і розкривати його істотні взаємозв'язки. Останніх завжди не багато, і вони, як правило, є простими і доступними для розуміння пересічними фахівцями. Неістотних же взаємозв'язків безліч, і всі вони є складними і заплутаними. З огляду на це надзвичайно цінною є закономірність, виявлена італійським економістом і соціологом 19 століття Парето і звана зараз принципом Парето: панівний вплив на роботу будь-якої складної системи чинить не більше 20% вхідних змінних, а решта 80% мають мале або навіть несуттєве значення, вони лише засмічують і розмивають основну картину явища. Причому фундаментальними в цьому твердженні є не наведені числові значення, а сам факт їх істотної відмінності. Дотримуючись цього принципу, основну увагу в наукових дослідженнях необхідно приділяти найістотнішим факторам, а другорядними факторами не лише можна, але й потрібно нехтувати. Цієї точки зору дотримувався і видатний фізик, лауреат Нобелівської премії Л.Д. Ландау: «Головне у фізиці – це вміння нехтувати» [1].

Такий підхід дозволяє виявляти найзагальніші закономірності перебігу процесів і отримувати первинні результати, які можна легко підтвердити, якщо вони правильні, і так же легко спростувати у випадку їх помилковості. Правильні результати можна потім поступово уточнювати шляхом послідовного врахування другорядних факторів, що забезпечить розширення і узагальнення первинних результатів.

Однак у технічних науках панує протилежний підхід: врахування ще двох-трьох додаткових факторів (переважно зовсім непотрібних, які лише заплутують справу), вважається свідченням новизни, більш глибокого вивчення предмета і вищого наукового рівня роботи.

Аналіз досліджень і публікацій. Розгін автомобіля є одним з найскладніших режимів його руху. Існуюча сьогодні процедура теоретичного визначення часу розгону автомобілів до заданої швидкості складна і має лише демонстраційний характер. Вона непридатна для практичного використання, бо вимагає числових значень багатьох конструкційних параметрів автомобіля і спирається на зовнішню швидкісну характеристику двигуна у неусталеному режимі роботи, яка для переважної більшості двигунів відсутня. Внаслідок цього, як приклад, сучасна теорія автомобіля не здатна підтвердити чи заперечити оприлюднювані виробниками числові значення часу розгону того чи іншого автомобіля.

Наприклад, у роботі [2] повідомляється про те, що час розгону до 60 км/год автопотяга на базі автомобіля КамАЗ-5460 (двигун потужністю 265 кВт, повна маса автопотяга $40,0 \cdot 10^3$ кг) дорівнює 49,0 с, а час розгону до тієї ж швидкості автопотяга на базі автомобіля Scania R164LA480 (потужність двигуна 480 к.с., тобто 353 кВт, маса автопотяга та ж), дорівнює 20,0 с. Тобто автомобіль Scania, маючи потужність двигуна всього лише на третину більшу ніж у КамАЗа, витрачає на процес розгону на 2/3 часу менше. Можна погоди-

© Пожидаєв С. 2016

тись, що технічний рівень автомобіля Scania дещо вищий, ніж у КамАЗа. Проте така велика різниця у динаміці автопотягів викликає обгрунтовану підозру, що з рекламних міркувань виробник істотно занизив час розгону автомобіля Scania. Але сучасна теорія автомобіля не може ні підтвердити, ні відхилити це припущення.

Вивченням процесу розгону займалися багато дослідників. Однак усі вони йшли шляхом ретельного врахування максимально можливої кількості чинників, які впливають на процес розгону автомобіля, внаслідок чого це питання до теперішнього часу так і не має простого, чіткого і ясного рішення, доступного розумінню будь-якого студента чи інженера і придатного для практичного застосування.

Наприклад, ґрунтовний аналіз процесу розгону автомобіля провели автори роботи [3]. Вони врахували 17 вхідних змінних, навели 38 математичних формул, які щерть зайняли 2,5 сторінки. Однак при цьому залишився нез'ясованим цілий ряд суттєвих питань: які фактори є найбільш важливими, визначальними у процесі розгону автомобіля; яку точність мають отримані розрахункові співвідношення для оцінки циклового ККД автомобілів у процесі розгону; як їх можна перевірити експериментально; чому дорівнюють значення згаданого ККД для конкретних автомобілів; яким чином значення цього ККД пов'язано з часом розгону автомобіля до заданої швидкості тощо. Крім того, деякі з урахованих у роботі [3] вхідних змінних є випадковими величинами (ККД трансмісії, коефіцієнти опору перекошування і повітря, коефіцієнти зчеплення, буксування, врахування обертових мас). Їх значення у процесі розрахунків доводиться призначати суб'єктивно, що не може не позначитися на точності результатів. Крім того, механічна робота автомобіля, втрачена на подолання сили опору перекошуванню, у цій роботі прийнята за корисну. Але це, як показано в роботі [4], суперечить класичній механіці. Згідно з нею ця сила є дисипативною, тобто такою, що призводить до марного розсіювання енергії у світовому просторі і тому не може розглядатись як корисна.

Метою роботи є побудова циклового ККД автомобіля під час розгону, вільного від згаданих недоліків.

Виклад основного матеріалу. Спираючись на принцип Парето і встановлений у роботі [4] факт, що механічною мірою корисного ефекту під час розгону автомобіля є його кінетична енергія, розгін автомобіля розглядався як процес «накачування» його кінетичною енергією, в яку перетворюється деяка частина механічної роботи, яка виконується двигуном.

А саме, прийнявши, що час розгону автомобіля до заданої швидкості руху v , м/с, дорівнює t , с, а двигун автомобіля має номінальну ефективну потужність N_e , кВт, отримуємо, що за відрізок часу t він теоретично здатний виконати механічну роботу A , яка дорівнює, Дж:

$$A = N_e t \cdot 10^3 \quad (1)$$

Але в корисну роботу перетворюється лише частина потенційно можливої роботи (1). Вона дорівнює накопиченій у процесі розгону кінетичній енергії T автомобіля з вантажем у їх поступальному русі, Дж:

$$T = mv^2 / 2, \quad (2)$$

де m – маса автомобіля з вантажем (повна маса), кг.

Частка від ділення величини (2) на (1) являє собою шуканий енергетичний цикловий ККД автомобіля в процесі розгону $\eta_{ц.р.}$:

$$\eta_{ц.р.} = \frac{mv^2 10^{-3}}{2N_e t} \quad (3)$$

Отримане співвідношення є фундаментальним. Воно надає повну і всебічну інформацію про всі істотні сторони процесу розгону. З нього випливає тринадцять наведених нижче нових і важливих наслідків.

1. Для оцінки енергетичної ефективності автомобіля в процесі розгону необхідні і достатні значення всього лише чотирьох незалежних змінних – t , v , N_e і m . Отже, ці змінні є найбільш істотними, ключовими для опису енергетичних властивостей автомобіля під час розгону.

2. Всі інші змінні є другорядними з точки зору впливу на процес розгону. Їх роль достатньо оцінювати одним коефіцієнтом – енергетичним ККД автомобіля у процесі розгону $\eta_{ц.р.}$. Він враховує вплив на розгін автомобіля таких чинників: зменшення ефективної потужності двигуна у неномінальному режимі його роботи і погіршення якості робочих процесів, яке спостерігається під час перехідних режимів; припинення надходження енергії від двигуна в моменти перемикавання передач; розсіювання енергії під час пробуксовування коліс і елементів трансмісії (зчеплення або гідротрансформатора); втрати, пов'язані з подоланням сил тертя в трансмісії і сил опору коченню і повітря, а також моментів опору розгону обертових мас.

3. Невідомою величиною у співвідношенні (3) є тільки одна з ключових змінних – час t розгону автомобіля до заданої швидкості, але її експериментальне визначення не становить труднощів.

4. Значення циклового ККД (3) спирається на величини t , v , N_e і m , кожен з яких можна визначити з будь-якою наперед заданою точністю. Як наслідок, з будь-якою заданою точністю може бути обчислено і значення циклового ККД (3) для будь-якого конкретного автомобіля.

5. Числові значення величин t , v , N_e і m всіх сучасних автомобілів є у відповідних довідниках. Це дає можливість легко створити базу даних їх циклового ККД під час розгону. Наприклад, на рис. 1 наведені значення циклового ККД під час розгону автомобілів і автопотягів КамАЗ, обчислені за даними роботи [5], у функції від їх питомої маси $m' = m / N_e$

Їх середнє значення дорівнює 0,438 за середнього квадратичного відхилення (СКВ) індивідуальних значень 0,030 і коефіцієнта варіації 6,9 %. Згадані значення тісно корельовані зі значеннями питомої маси – коефіцієнт їх лінійної кореляції r дорівнює мінус 0,785. Але відгук індивідуальних значень циклового ККД на значення питомої маси дуже слабкий – коефіцієнт регресії дорівнює мінус 0,00063. Завдяки цьому можна вважати, що у автомобілів КамАЗ цей ККД не залежить від питомої маси і наближено дорівнює $0,45 \pm 0,05$.

Для порівняння за даними роботи [6] було обчислене середнє значення циклового ККД під час розгону автомобілів КАМАЗ. Воно дорівнює 0,390 за СКВ індивідуальних значень 0,022.

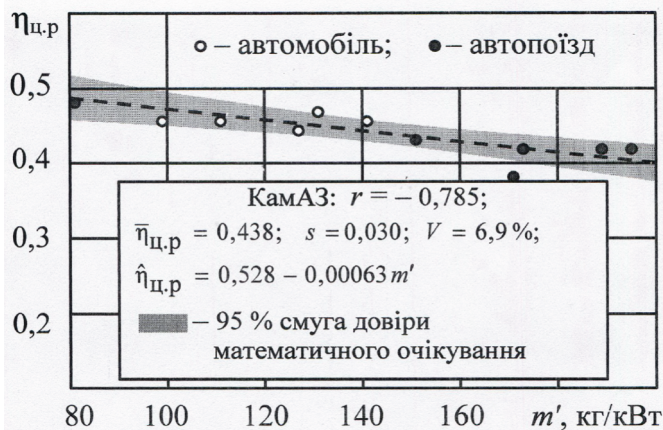


Рис. 1 – Значення циклового ККД 11-и моделей автомобілів і автопотягів КамАЗ залежно від їх питомої маси m'

На рис. 2 наведені значення циклового ККД під час розгону 18-и моделей передньопривідних легкових автомобілів Lada, обчислені за даними роботи [7]. Їх середнє значення дорівнює 0,594 за СКВ індивідуальних значень, що дорівнює 0,025 і коефіцієнта варіації 4,1 %. Згадані значення циклового ККД несуттєво корельовані зі значеннями питомої маси: $r = 0,23$. Як наслідок, регресія індивідуальних значень циклового ККД на значення питомої маси відсутня. Можна вважати, що цикловий ККД цих автомобілів дорівнює $0,60 \pm 0,05$. Для порівняння за даними роботи [7] були обчислені середні значення циклового ККД під час розгону і деяких інших марок легкових автомобілів:

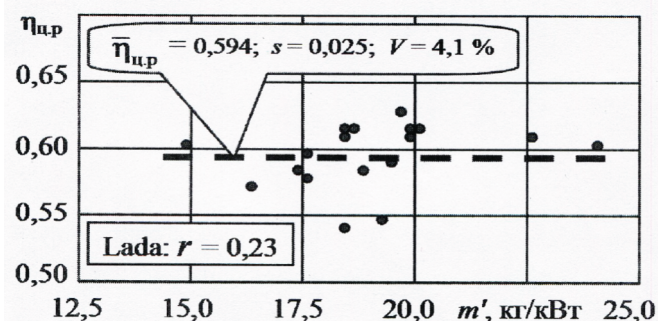


Рис. 2 – Значення ККД 18-ти моделей передньопривідних легкових автомобілів Lada залежно від їх питомої маси m'

- задньопривідні Mercedes-Benz – 0,589 за СКВ індивідуальних значень 0,080;
- передньопривідні Alfa Romeo – 0,629 за СКВ індивідуальних значень 0,059;
- повнопривідні BMW – 0,645 за СКВ індивідуальних значень 0,022.

6. Якщо для деякого автомобіля відомі значення величин $\eta_{ц.р}$, m і N_e , то за допомогою перетвореного співвідношення (3) можна елементарно визначити час його розгону до заданої швидкості v :

$$t = \frac{m v^2 10^{-3}}{2 N_e \eta_{ц.р}} = \left(\frac{v^2 10^{-3}}{2 \eta_{ц.р}} \right) m' \quad (4)$$

Це означає, що попутно вирішена ще одна актуаль-

на задача теорії автомобіля: знайдено гранично простий і універсальний метод теоретичного визначення часу розгону автомобілів до заданої швидкості.

7. Формула (4) вказує ще на один, невідомий раніше факт: час розгону автомобілів до заданої швидкості являє собою прямо пропорційну функцію від їх (автомобілів) питомої маси m' . Це підтверджується рис. 3, на якому наведена побудована за даними роботи [5] регресійна залежність часу розгону (до швидкості 60 км/год) одинадцяти моделей автомобілів і автопотягів КамАЗ від їх питомої маси m' .

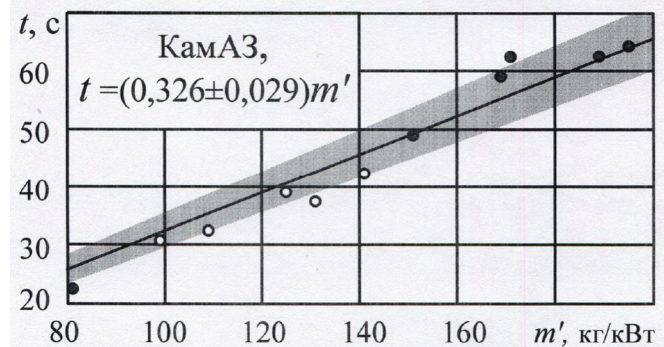


Рис. 3 – Регресійна залежність часу розгону до 60 км / год 11-и моделей автомобілів і автопотягів КамАЗ від їх питомої маси m'

Коефіцієнт лінійної кореляції між питомою масою автомобілів / автопотягів КамАЗ і часом їх розгону дорівнює 0,987, а коефіцієнт регресії згаданого часу на питому масу - 0,326 за СКВ, рівному 0,029. Максимальне відхилення індивідуальних експериментальних значень часу розгону від їх математичного очікування дорівнює 6,4 с або 10 %, а залишкова дисперсія відхилення індивідуальних експериментальних даних від їх математичного очікування дорівнює 11,5 c^2 .

На рис. 4 побудована лінія регресії часу розгону легкових автомобілів до 100 км/год, розрахована за даними 91 моделі, які містяться в роботі [7]; причому точками на малюнку позначені не всі моделі.

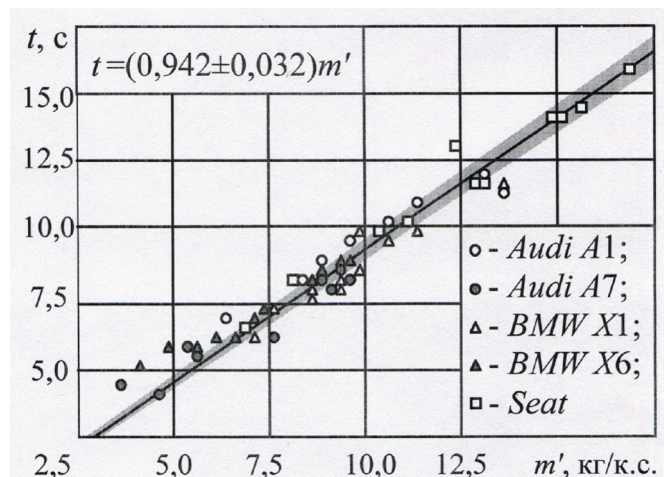


Рис. 4 – Регресійна залежність часу розгону до 100 км/год 91 моделі легкових автомобілів від їх питомої маси m'

Вона також підтверджує прямо пропорційну залежність часу розгону автомобілів від їх питомої маси – коефіцієнт лінійної кореляції дорівнює 0,947, коефіці-

ент регресії – 0,942 за СКВ, рівному 0,032, що відповідає коефіцієнту варіації коефіцієнта регресії, рівному 3,4 %.

Але за малих значень питомої маси (менше 7 кг/к.с.) спостерігається систематичне перевищення експериментальних значень часу розгону над їх математичним очікуванням. Воно пояснюється вступом у дію ще одного фактора – обмеження щодо зчеплення коліс з дорогою. Згідно з ним час досягнення автомобілем швидкості руху 100 км/год, виражений у секундах, не може бути меншим, ніж $2,83/(\lambda\mu)$, де λ – коефіцієнт використання зчепної ваги автомобіля, μ – коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою.

8. Встановлення факту прямо пропорційної залежності $t = f(m')$ дозволяє відмовитися від прийнятого в цей час істотно складнішого уявлення про час розгону як про гіперболічну функцію від питомої потужності автомобіля $N_{уд}$, яка дорівнює N_e/m і вимірюється в кВт/т – рис. 5.

9. Співвідношення (4) гранично спрощує перевірку значення циклового ККД (3) – вона зводиться до зіставлення розрахункового (4) і експериментального значення часу розгону t .

10. Співвідношення (3) дає також можливість гранично просто розв'язувати ще дві актуальні задачі теорії автомобіля: а) визначити потужність двигуна, мінімально необхідну для забезпечення розгону автомобіля масою m за заданий час t :

$$N_{e,\min} = \frac{m v^2 10^{-3}}{2 t \eta_{ц,р}} ; \quad (5)$$

б) визначити повну масу m , максимально допустиму з тієї ж точки зору за заданої потужності двигуна N_e :

$$m_{\max} = \frac{2 N_e t \eta_{ц,р} 10^3}{v^2} . \quad (6)$$

11. Співвідношення (5) дозволяє без всякого випробувального устаткування оцінювати фактичну потужність двигунів автомобілів, значення циклового ККД яких відоме. У цьому випадку роль навантажувального пристрою буде виконувати сам автомобіль, який розганяється.

12. Цикловий ККД (3) характеризує енергетичну ефективність розгону автомобіля разом з вантажем, тобто він є енергетичним ККД бруто. Але кінцевим показником енергетичної ефективності транспортного процесу повинен бути ККД нетто, який вираховується на підставі кінетичної енергії T_b одного тільки вантажу, який перевозиться:

$$T_b = \frac{m_b v^2}{2} = \frac{(m k_b) v^2}{2} \equiv \left(\frac{m v^2}{2} \right) k_b, \quad (7)$$

де m_b – маса вантажу, який перевозиться, кг;

k_b – коефіцієнт вантажопідйомності автомобіля.

Розділивши величину (7) на (1), отримуємо співвідношення для обчислення циклового ККД нетто під час розгону автомобіля:

$$\eta_{ц,р,н} = \left(\frac{m v^2 10^{-3}}{2 N_e t} \right) k_b = \eta_{ц,р} k_b . \quad (8)$$

Як бачимо, цей ККД являє собою добуток циклового ККД бруто на коефіцієнт вантажопідйомності автомобіля. Автомобіль КамАЗ-5320 має повну масу 15,3 т і вантажопідйомність 8,0 т, що відповідає коефіцієнту вантажопідйомності 0,523. Енергетичний ККД бруто під час розгону цього автомобіля, обчислений за даними роботи [5] і співвідношенням (3), дорівнює 0,453, а ККД нетто – 0,237.

Значення циклових ККД можна множити ще й на ефективний ККД двигуна η_e , що приведе до отримання значень паливно-механічного ККД автомобіля в процесі розгону – теж бруто і нетто. Наприклад, прийнявши для дизельного двигуна $\eta_e = 0,35$, отримуємо паливно-механічний ККД бруто під час розгону автомобіля КамАЗ-5320, рівний 0,159, а ККД нетто – 0,083.

13. У співвідношення (3) – (8) не входить жодна фізична величина, яка обмежувала б застосовність згаданих співвідношень тільки сферою автомобільного транспорту. Отже, ці співвідношення є справедливими для будь-якого транспортного засобу, сила інерції якого в його поступальному русі є переважною порівняно з іншими силами, які протидіють розгону: велосипеда, мотоцикла, автомобіля, моторного човна, морського судна, залізничного потяга, аеросаней або літака в процесі розбігу по злітній смузі. Наприклад, коефіцієнти регресії часу розгону автомобілів КамАЗ і легкових автомобілів істотно різні – 0,326 і 0,942 (рис. 3 і 4). Але це обумовлено тим, що час розгону автомобілів КамАЗ визначається до 60 км/год, а легкових – до 100 км/год, а також різними одиницями вимірювання питомої маси автомобілів. Якщо перейти у рівнянні для легкових автомобілів до 60 км/год і до кг/кВт, то коефіцієнт регресії дорівнюватиме 0,249, що на 24 % менше, ніж у автомобілів КамАЗ. Ця різниця надає порівняльну характеристику інтенсивності розгону, обумовлену особливостями конструкції вантажних і легкових автомобілів.

Насамкінець за допомогою отриманих результатів проаналізуємо згадану на початку даної статті ситуацію з розгоном автопотягів на базі КамАЗ-5460 і Scania R164LA480.

Розрахунок циклового ККД їх розгону, виконаний за виразом (3), приводить до значень 0,428 і 0,787 відповідно. Перше з них практично збігається з середнім значенням циклового ККД при розгоні автомобілів і автопотягів КамАЗ, наведених на рис. 1, що можна вважати підтвердженням його правильності.

А цикловий ККД автопотяга Scania R164LA480 у 1,84 разів вищий, ніж у автопотяга КамАЗ, у 1,34 рази

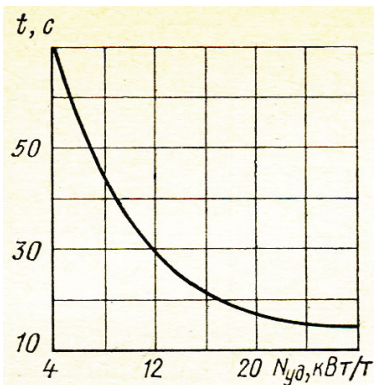


Рис. 5 – Загальноприйнята в теорії автомобіля функціональна залежність часу розгону автомобілів від їх питомої потужності $N_{уд}$ [8]

– ніж у легковиків Mercedes-Benz , у 1,25 рази – ніж у Alfa Romeo і у 1,22 рази – ніж у BMW. Проте мало ймовірно, щоб вантажівка мала ККД під час розгону вищий, ніж у розглянутих легкових автомобілів. Це підкріплює сумніви щодо достовірності часу розгону автопотяга Scania R164LA480 (рівного 20,0 с), на підставі якого було обчислено його цикловий ККД.

Припустимо, що цикловий ККД під час розгону автопотяга Scania R164LA480 приблизно такий, як у кращих зразків КамАЗ і дорівнює, наприклад, 0,5. Тоді час його розгону до швидкості 60 км/год, обчислений за виразом (4), дорівнюватиме 31,5 с. А якщо прийняти цикловий ККД рівним 0,645 (як у повнопривідних легковиків BMW), то і тоді час розгону становитиме 24,4 с, що на 22 % більше, ніж 20,0 с.

Таким чином маємо всі підстави стверджувати, що час розгону автопотяга Scania R164LA480 повною масою 40 т не може дорівнювати 20 с. Його занижено.

А за допомогою співвідношень (5) і (6) можна визначити умови, за яких згаданий час міг би дорівнювати 20 с. З виразу (5) випливає, що це можливо з потужністю двигуна 556 кВт. А з виразу (6) – що з таким же значенням $\eta_{ц,р}$ і потужністю двигуна 353 кВт це було б можливим при масі автопотяга $25,4 \cdot 10^3$ кг, а не $40 \cdot 10^3$ кг.

Висновки. Завдяки розгляду процесу розгону автомобілів по горизонтальній дорозі як процесу «накачування» їх кінетичною енергією поступального руху, в яку перетворюється деяка частина механічної роботи двигуна, отримано гранично просте співвідношення для обчислення циклового ККД автомобілів в процесі розгону і виявлені найзагальніші закономірності цього режиму руху, які дають можливість легко вирішувати практичні задачі. Зокрема, встановлено, що для оцінки енергетичної ефективності автомобілів в процесі розгону необхідні і достатні значення всього лише чотирьох ключових змінних – t , v , N_e і m ; а час розгону автомобілів до заданої швидкості руху є прямо пропорційною функцією від їх питомої маси. Індивідуальні значення циклового енергетичного ККД при розгоні автомобілів МАЗ і КамАЗ знаходяться у межах від 0,35 до 0,50, а сучасних легкових автомобілів – у межах від 0,55 до 0,70. Викладені в даній роботі

міркування є справедливими для будь-якого транспортного засобу, сила інерції якого в його поступальному русі є переважною в порівняно з іншими силами, які протидіють розгону.

Список літератури

1. Дубинянская Я. Теория и практика Ландау // Личности. – 2011. – №7(35). С. 42-61.
2. Карабцев В.С., Валеев Д.Х. Расчётная оценка динамических характеристик грузовых АТС // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 2. – С. 7-9.
3. Подригало М.А., Подригало Н.М., Файст В.Л. Мощность двигателя и КПД автомобиля при разгоне // Автомобильная промышленность. – 2008. – №8. – С. 12-16.
4. Пожидаев С.П. Про корисну механічну роботу та енергетичний ККД автомобіля // Техніка і технології АПК. – 2016. – №5. – С. 17-19., – №6. – С. 34-35., – №7. – С. 45.
5. Пожидаев С.П. Экспресс-оценка динамических свойств автомобилей // Автомобильная промышленность. – 2013. – №9. – С. 8-9.
6. Проскурин А.И. Теория автомобиля. Примеры и задачи. – Ростов на Дону: Феникс, 2006. – 200 с.
7. Автомобили мира 2014. – М.: Третий Рим, 2013. – 224 с.
8. Токарев А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.

Аннотация. Получено предельно простое соотношение, всесторонне характеризующее процесс разгона автомобиля. В него входят всего четыре ключевых переменных величины – масса автомобиля, мощность двигателя, время и конечная скорость разгона.

Summary. An extremely simple ratio, which describes the process of acceleration of the vehicle, was obtained. It consists of only four key variables values - vehicle weight, engine power, timing and ultimate speed acceleration.

Стаття надійшла до редакції 31 травня 2016 р.