

УДК 629.331.064  
UDC 629.331.064

Подригало<sup>1</sup> М.А., Кайдалов<sup>2</sup> Р.О., Абрамов<sup>1</sup> Д.В., Молодан<sup>3</sup> А.А., Гацько<sup>3</sup> В.И.,  
Мазин<sup>2</sup> А.С.

<sup>1</sup> Харьковський національний університет Воздушних Сил України

<sup>2</sup> Національна академія Національної гвардії України

<sup>3</sup> Харьковський національний автомобільно-дорожній університет

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СЛОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

Использование модели многокомпонентного сложного движения позволило определить направление повышения энергетической эффективности автомобиля, которым является снижение амплитуд гармоник сил, приложенных к ведущим колесам. Это позволяет уменьшить величину суммы компонент относительной скорости автомобиля и сократить дополнительные потери энергии двигателя.

**Ключевые слова:** автомобиль, сложное движение, установившееся движение, колебания скорости, амплитуда колебаний, дополнительные потери энергии.

**Постановка проблемы.** Энергетическая эффективность автомобиля является показателем рационального использования мощности двигателя и расходования запасов источников энергии. В связи с появлением автомобилей, использующих альтернативные виды источников энергии, появилась необходимость оценки энергетической эффективности не по расходу жидкого или газообразного топлива, а по расходу энергии.

При оценке энергетической эффективности автомобиля необходимо определить тот минимально достижимый уровень расхода энергии источника, который можно принять в качестве критерия.

В настоящей статье сделана попытка дать определение понятия энергетической эффективности автомобиля. Использование модели многокомпонентного сложного движения позволило определить основные (неизбежные) и дополнительные (которые можно избежать или можно уменьшить) потери энергии двигателя. Это позволило также уточнить понятие коэффициента полезного действия автомобиля.

Энергетическая эффективность автомобиля является показателем рационального использования мощности двигателя и запаса источника энергии. В одной из работ [1] посвященных энергетической эффективности, например, отмечается, что она определяется степенью аэродинамичности автомобиля. Поэтому требования энергетического совершенства являются теперь определяющими даже при формировании внешнего облика автомобиля [1].

Появление автомобилей с электроприводом ведущих колес и гибридных автомобилей позволяет не только уменьшить загрязнение воздуха, но и повысить энергетическую эффективность транспортных средств [2]. Это также потребовало пересмотра показателей и критериев энергетической эффективности автомобилей. В работе [3] предложено оценивать не топливную, а энергетическую экономичность автомобиля, что позволяет получить более объективный результат.

В работе [2] определена минимальная энергия, необходимая для движения автомобиля. Авторы работы [2] отмечают, что минимальное количество энергии затрачивается на преодоление следующих сопротивлений движению автомобиля:

- сопротивление качению колес;
- аэродинамическое сопротивление;
- сопротивление при преодолении подъема пути;
- сопротивление при ускорении автомобиля.

Вызывает сомнение необходимость учета сопротивления, возникающего при ускорении автомобиля, при определении минимального для движения машины уровня энергии. Следует заметить, что называть затраты энергии на разгон автомобиля сопротивлением при ускорении некорректно с позиций классической механики.

В работе [2] все затраты энергии делятся на основные и дополнительные. К дополнительным затратам энергии двигателя автор исследования [2] относит следующие:

- потери, обусловленные колебаниями поддрессоренных и недрессоренных масс при движении автомобиля по неровной дороге;

- потери мощности двигателя при передаче от двигателя к ведущим колесам (потери в трансмиссии);
- потери, вызванные действием реактивных сил при движении автомобиля;
- потери, вызванные неравномерностью движения автомобиля.

Рассматривая влияние равномерности движения на расход топлива, Ю. Мацкерле отмечает [2], что значительное влияние на расход топлива оказывает способ вождения автомобиля. Наиболее близким к оптимальному является движение с постоянной скоростью по горизонтальному участку шоссе. В этом случае преодолевается только сопротивление качению и аэродинамическое сопротивление [2]. Следует только отметить, что при движении автомобиля на повороте также появляются дополнительные потери энергии [4]. Поэтому следует уточнить формулировку [2] оптимального режима движения автомобиля по минимуму расхода энергии. Таким режимом следует считать равномерное движение автомобиля по горизонтальному прямолинейному участку дороги.

Аналізу затрат энергии двигателя посвящена также работа [5], в которой все указанные потери подразделяются на активные и пассивные. Однако, несмотря на подробный анализ потерь энергии двигателя в работе [5], определить большинство этих потерь сложно, особенно на этапе проектирования автомобиля.

Оценка дополнительных потерь энергии, обусловленных неравномерностью крутящего момента двигателя посвящена работа [6]. Дополнительные потери энергии можно определить по следующей зависимости [6]:

$$\Delta W = \frac{A_{pk}}{\pi} \cdot S, \quad (1)$$

где  $A_{pk}$  – амплитуда колебаний тяговой силы на ведущих колесах (при моделировании колебаний по гармоническому закону);

$S$  – пробег автомобиля.

Неравномерность действия сил сопротивления движению автомобиля при неравномерности крутящего момента ДВС учтена в работе [7]. Дополнительные потери энергии в этом случае

$$\Delta W = \frac{A_{pk} + A_{pc}}{\pi} \cdot S, \quad (2)$$

где  $A_{pc}$  – амплитуда колебаний суммарной силы сопротивления движению, приведенная к ведущим колесам.

Для решения различных задач движения одиночных автомобилей и автомобильных колон в работе [8] предложено использовать модель многокомпонентного сложного движения. На наш взгляд, указанная модель удобна для оценки разделения затрат энергии на основные и дополнительные, что позволяет определить КПД автомобиля и его энергетическую эффективность.

Исследованию энергетики неравномерного движения автомобиля посвящено исследование профессора А.С. Федосова [9]. Им впервые рассмотрены дополнительные потери энергии автомобиля, обусловленные неравномерностью движения. Фактически рассмотрено сложное движение, состоящее из двух компонент:

- перемещения, вызванного действием некоего потенциального поля;
- перемещения под действием быстроосциллирующей силы.

В указанной работе [9] определена дополнительная энергия, затрачиваемая на движение автомобиля. В качестве примера автором исследования [9] рассмотрены осцилляции, вызванные торможениями автомобиля при движении по маршруту. Следует отметить, что потери энергии на торможение автомобиля при движении по маршруту более простым методом были ранее определены в работе [10]. Кроме того, в указанной работе [9] не рассмотрены гармоники, обусловленные колебаниями тяговой силы и силы сопротивления движению.

Таким образом, необходимо рассмотреть дополнительные потери энергии двигателя при установившемся движении. При этом модель многокомпонентного сложного движения дает возможность определить дополнительные потери энергии, вызванные различными гармониками колебаний тяговой силы и силы сопротивления движению.

Целью исследования является повышение энергетической эффективности автомобиля путем совершенствования методов оценки и снижения непроизводительных затрат энергии за счет использования модели многокомпонентного сложного движения.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть модель многокомпонентного сложного движения в приложении к установившемуся движению автомобиля и определить основные и дополнительные потери энергии двигателя.

**Результаты исследований.** Всякое движение и, в частности, покой являются относительными. Давая ответ на вопрос, покоится ли тело или движется и как оно движется, мы должны указать, относительно каких тел рассматривается движение интересующего нас тела [9].

Тело в равновесии находится либо в состоянии покоя, либо в состоянии равномерного прямолинейного движения – это первая аксиома механики (1-й закон Ньютона). Покой относительный, поскольку рассматривается относительно каких-либо тел, а движение абсолютно [9].

Равномерное прямолинейное движение тела осуществляется при равенстве сил движущих и сил сопротивления движению. Это означает также, что в любой момент времени разность мощностей сил движущих и сопротивления равна нулю. В этом случае тело движется равномерно, т.е. с постоянной мгновенной скоростью и обладает постоянным уровнем кинетической энергии. Величина кинетической энергии является показателем энергетического уровня движущегося тела. Для обеспечения режима равномерного движения тела необходимо обеспечить стабильность равенства нулю разности сил (мощностей) движущих и сопротивления движению в любой момент времени, что не всегда возможно. Это означает, что баланс сил (мощностей) является динамическим, т.е. допускающим его периодическое нарушение. При динамическом равновесии сил (мощностей) происходит периодическое изменение кинетической энергии тела. Движение тела в режиме периодического нарушения равновесия сил (мощностей) является установившимся, т.е. движением с постоянной средней скоростью. Условием установившегося движения является равенство нулю работ сил движущихся и сил сопротивления движению за определенный наименьший промежуток времени, называемый периодом колебания скорости движения (кинетической энергии) тела. Таким образом, равномерное движение – это движение с постоянной мгновенной скоростью, а установившееся – с постоянной средней скоростью.

Равномерное движение автомобиля невозможно, поскольку постоянство сил движущих и сил сопротивления движению реализовать невозможно. Тяговые силы на ведущих колесах подвержены колебаниям. Причиной этих колебаний является неравномерность крутящего момента ДВС, неточность изготовления зубчатых передач, вызывающая нарушение плавности их работы, колебания подвески автомобиля, наличие дисбаланса колес и др.

Равномерный режим движения является наилучшим (идеальным) с позиции наиболее высокой энергетической эффективности автомобиля. При этом происходит наименьший расход энергии двигателя на перемещение автомобиля из начального в конечный пункт маршрута движения. Всякое изменение скорости движения автомобиля сопровождается изменением кинетической энергии и потерей ее части [6, 7]. В работах [6, 7] рассмотрены потери энергии двигателя, обусловленные двумя гармониками – колебаниями тяговой силы, вызванными колебаниями крутящего момента ДВС, и колебанием суммарной силы сопротивления движению.

Колебания скорости движения автомобиля, как уже отмечалось выше, могут быть вызваны большим количеством гармоник. По аналогии с уравнениями (1) и (2) для большого числа гармоник можно определить дополнительный расход энергии

$$\Delta W = \frac{S}{\pi} \sum_{i=1}^n A_{pi} , \quad (3)$$

где  $A_{pi}$  – амплитуда колебаний  $i$ -ой гармоники сил на ведущих колесах.

Установившееся движение автомобиля можно рассматривать как многокомпонентное сложное движение, включающее в себя переносное движение (равномерное движение со средней скоростью автомобиля  $\bar{V}_a$ ) и сумму относительных движений, каждое из которых вызвано одной из гармоник сил, приведенных к ведущим колесам. Таким образом, скорость автомобиля можно представить в виде (учитывая, что рассматривается движение в направлении одной оси – то это проекция вектора скорости на ось  $OX$ )

$$V_a = \bar{V} + \sum_{i=1}^n V_{omni} , \quad (4)$$

где  $V_{omni}$  –  $i$ -я компонента относительной скорости (вызванная  $i$ -ой гармоникой колебаний);  
 $n$  – число гармоник колебаний скорости.

При наличии только переносного движения реализуется идеальный с точки зрения энергоэффективности режим движения. В этом случае

$$\sum_{i=1}^n V_{omni} = 0. \quad (5)$$

В реальных условиях движения автомобиля необходимо стремиться к минимизации суммарной скорости относительного движения. Функция цели минимизации дополнительных потерь энергии может иметь вид

$$U = \left[ \sum_{i=1}^n V_{omni} \right]_{\min}. \quad (6)$$

Таким образом, использование модели многокомпонентного сложного движения позволило определить направление повышения энергетической эффективности автомобиля, которым является снижение амплитуд гармоник сил, приложенных к ведущим колесам. Это позволяет уменьшить величину суммы компонент относительной скорости автомобиля и сократить непроизводительные (дополнительные) потери энергии двигателя.

**Выводы.** Применение модели многокомпонентного сложного движения позволило определить направление повышения энергетической эффективности автомобиля, которым является снижение амплитуд колебаний гармоник различных сил, приложенных к ведущим колесам.

Снижение амплитуд гармоник сил, приложенных к ведущим колесам, позволяет уменьшить суммарную относительную скорость движения автомобиля и повысить его энергетическую эффективность.

1. Гашук П.Н. Энергетическая эффективность автомобиля / П.Н. Гашук. – Львов: СВІТ, 1992. – 208 с.
2. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль / Ю. Мацкерле. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
3. Подригало М.А. Энергетическая экономичность автомобиля и критерии ее оценки / М.А. Подригало, Д.В. Абрамов, Ю.В. Тарасов, В.М. Ефимчук // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле-та тракторобудування. – № 10 (1119), 2015. – С. 28-37.
4. Подригало М.А. Энергетический аспект обеспечения маневренности автомобилей / М.А. Подригало, Д.М. Клец // Автомобильная промышленность, 2013. – №7. – С. 10-13.
5. Немий С.В. Энергетична структура автомобільного транспортного засобу / С.В. Немий // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів, 2015. – № 820. – С. 90-96.
6. Подригало М.А. Влияние неравномерности крутящего момента двигателя внутреннего сгорания на энергетическую экономичность колесных транспортных средств / М.А. Подригало, А.С. Полянский, Н.М. Подригало, Д.В. Абрамов // Залізничний транспорт України. Науково-практичний журнал. – К. ДП «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України», 2015. – №6. – С. 40-46.
7. Подригало М.А. Оценка дополнительных энергетических потерь при установившемся режиме движения транспортно-тяговых машин / М.А. Подригало, Н.П. Артемов, Д.В. Абрамов, М.Л. Шуляк // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Автомобіле-та тракторобудування. – №9 (1118), 2015. – С. 98-107.
8. A. Lebedev. Operating of mobile machine units system using the model of multicomponent complex movement / A. Lebedev, N. Artiomov, M.Shulyak, M.Podrigalo, D. Abramov, D. Klets, R. Kaidalov // Automobile transport. Collection of scientific works. – Харьков: ХНАДУ, 2015. – Вып. 36. – С. 60-66.
9. Федосов А.С. Энергетика неравномерного движения автомобиля / А.С. Федосов // Автомобіле- та тракторобудування. Вісник НТУ «ХПІ». – 2003. – №4. – С. 112-114.
10. Кириченко И.Г. Оценка коэффициента полезного действия колесных машин на транспортных операциях / И.Г. Кириченко, Н.М. Подригало // автомобильный транспорт. Сборник научных трудов ХГАДТУ. – 1998. – №1. – С. 26-28.
11. Элементарный учебник физики / Под ред. Г.С. Ландсберга. – Том 1. – М.:Наука, 1964. – 544 с.

#### REFERENCES

1. Gashchuk P.N. Energeticheskaya effektivnost' avtomobilya / P.N. Gashchuk. – L'vov: SVIT, 1992. – 208 s.
2. Matskerle YU. Sovremennyy ekonomichnyy avtomobil' / YU. Matskerle. – M.: Mashinostroyeniye, 1987. – 320 s.

3. Podrigalo M.A. Energeticheskaya ekonomichnost' avtomobilya i kriterii yeye otsenki / M.A. Podrigalo, D.V. Abramov, YU.V. Tarasov, V.M. Yefimchuk // Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Avtomobile-ta traktorobuduvannya. – № 10 (1119), 2015. – S. 28-37.
4. Podrigalo M.A. Energeticheskyy aspekt obespecheniya manevrennosti avtomobiley / M.A. Podrigalo, D.M. Klets // Avtomobil'naya promyshlennost', 2013. – №7. – S. 10-13.
5. Nyemyy S.V. Enerhetychna struktura avtomobil'noho transportnoho zasobu / S.V. Nyemyy // Visnyk Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnika» Dynamika, mitsnist' ta proektuvannya mashyn i pryladiv. – L'viv, 2015. – № 820. – S. 90-96.
6. Podryhalo M.A. Vlyyanye neravnomernosti krutyashcheho momenta dvyhatelya vnutrenneho s'horannya na йnerhetycheskuyu йkonomychnost' kolesnykh transportnykh sredstv / M.A. Podryhalo, A.S. Polyansky, N.M. Podryhalo, D.V. Abramov // Zaliznychnyy transport Ukrainy. Naukovo-praktychnyy zhurnal. – K. DP «Derzhavnyy naukovo-doslidnyy tsentr zaliznychnoho transportu Ukrainy», 2015. – №6. – S. 40-46.
7. Podryhalo M.A. Otsenka dopolnytel'nykh йnerhetycheskykh poter' pry ustanovyvshemsya rezhyme dvyzhenyya transportno-tyahovykh mashyn / M.A. Podryhalo, N.P. Artemov, D.V. Abramov, M.L. Shulyak // Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Avtomobile-ta traktorobuduvannya. – №9 (1118), 2015. – S. 98-107.
8. A. Lebedev. Operating of mobile machine units system using the model of multicomponent complex movement / A. Lebedev, N. Artiymov, M.Shulyak, M.Podrigalo, D. Abramov, D. Klets, R. Kaidalov // Automobile transport. Collection of scientific works. – Харьков: ХНАДУ, 2015. – Вып. 36. – С. 60-66.
9. Fedosov A.S. Йnerhetyka neravnomernoho dvyzhenyya avtomobylya / A.S. Fedosov // Avtomobile-ta traktorobuduvannya. Visnyk NTU «KHPI». – 2003. – №4. – S. 112-114.
10. Kirichenko I.G. Otsenka koeffitsiyenta poleznogo deystviya kolesnykh mashin na transportnykh operatsiyakh / I.G. Kirichenko, N.M. Podrigalo // avtomobil'nyy transport. Sbornik nauchnykh trudov KHGADTU. – 1998. – №1. – S. 26-28.
11. Elementarnyy uchebnyk fiziki / Pod red. G.S. Landsberga. – Tom 1. – M.: Nauka, 1964. – 544 s.

**Подригало М.А., Кайдалов Р.О., Абрамов Д.В., Молодан А.О., Гацько В.И., Мазин А.С.** Застосування моделі багатокомпонентного складного руху для оцінки енергетичної ефективності автомобіля.

Використання моделі багатокомпонентного складного руху дозволило визначити напрямок підвищення енергетичної ефективності автомобіля, яким є зниження амплітуд гармонік сил, прикладених до ведучих коліс. Це дозволяє зменшити величину суми компонент відносної швидкості автомобіля і скоротити додаткові втрати енергії двигуна.

**Ключові слова:** автомобіль, складний рух, усталений рух, коливання швидкості, амплітуда коливань, додаткові втрати енергії.

**M. Podryhalo, R. Kaidalov, D. Abramov, A. Molodan, V. Hats'ko, O. Mazin** Application of the multicomponent complex movement model for estimation of the vehicle energy efficiency.

The use of the model of multicomponent complex motion made it possible to determine the direction of increasing the energy efficiency of the car, which is the decrease in the amplitudes of the harmonics of the forces applied to the driving wheels. This makes it possible to reduce the sum of the components of the relative speed of the car and to reduce the additional engine energy losses.

**Keywords:** car, complex motion, steady motion, speed fluctuations, amplitude of oscillations, additional energy losses.

#### АВТОРИ:

**ПОДРИГАЛО Михайло Абович**, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник, Національна академія Національної гвардії України, e-mail: [pmikhab@gmail.com](mailto:pmikhab@gmail.com)

**КАЙДАЛОВ Руслан Олегович**, кандидат технічних наук, доцент, заступник голови наукового центру, Національна академія Національної гвардії України

**АБРАМОВ Дмитрій Володимирович**, кандидат технічних наук, доцент, науковий співробітник, Харківський національний університет Повітряних Сил України ім. Івана Кожедуба, e-mail: [Varan\\_mail@ukr.net](mailto:Varan_mail@ukr.net)

**МОЛОДАН Андрій Олександрович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технології машинобудування і ремонту машин» Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: [tmirm@ukr.net](mailto:tmirm@ukr.net)

**ГАЦЬКО Василь Іванович**, кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**МАЗИН Олексій Сергійович**, інженер, Національна академія Національної гвардії України

**АВТОРЫ:**

*ПОДРИГАЛО Михаил Абович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Национальная академия Национальной гвардии Украины, e-mail: [pmikhab@gmail.com](mailto:pmikhab@gmail.com)*

*КАЙДАЛОВ Руслан Олегович, кандидат технических наук, доцент, заместитель председателя научного центра, Национальная академия Национальной гвардии Украины*

*АБРАМОВ Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Харьковский национальный университет Воздушных Сил Украины им. Ивана Кожедуба, e-mail: [Varan\\_mail@ukr.net](mailto:Varan_mail@ukr.net)*

*МОЛОДАН Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения и ремонта машин» Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, e-mail: [tmirm@ukr.net](mailto:tmirm@ukr.net)*

*ГАЦЬКО Василий Иванович, кандидат технических наук, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

*МАЗИН Алексей Сергеевич, инженер, Национальная академия Национальной гвардии Украины*

**AUTHORS:**

*Mykhaylo PODRYHALO, Doctor of Science in Engineering, Professor, Chief Researcher, National Academy of Ukraine National Guard, e-mail: [sakhno@ntu.edu.ua](mailto:sakhno@ntu.edu.ua)*

*Ruslan KAIDALOV, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Deputy Chairman of the Scientific Center, National Academy of Ukraine National Guard*

*Dmitry ABRAMOV, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Researcher, Kharkiv National University of Ukraine Air Forces, e-mail: [Varan\\_mail@ukr.net](mailto:Varan_mail@ukr.net)*

*Andrii MOLODAN, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of machine building technology and machines repair, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: [tmirm@ukr.net](mailto:tmirm@ukr.net)*

*Vasiliy HATS'KO, PhD. in Engineering, Kharkiv National Automobile and Highway University*

*Olexii MAZIN, engineer, National Academy of Ukraine National Guard*

Стаття надійшла в редакцію 30.04.2018р.