

УДК 629.1.07

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ МОЩНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ ПОСТРОЕНИЯ ЕГО РАЗГОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Н.В. Нечипорук, профессор, д.т.н., Ю.А. Воробьев, профессор, к.т.н., Д.М. Клец, профессор, д.т.н., А.В. Маковецкий, доцент, к.т.н., В.Б. Пода, доцент, к.т.н., НАУ имени Н.Е. Жуковского «ХАИ»

***Аннотация.** Предложен метод оценки мощностных показателей автомобильного двигателя с помощью уточненных разгонных характеристик. Разработанный метод позволяет определить динамические возможности автомобиля с учетом его конструктивных особенностей и условий эксплуатации.*

***Ключевые слова:** автомобиль, двигатель, мощность, разгонные характеристики, испытания*

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ПОТУЖНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА ШЛЯХОМ ПОБУДОВИ ЙОГО РОЗГІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК

М.В. Нечипорук, професор, д.т.н., Ю.А. Воробйов, професор, к.т.н., Д.М. Клец, професор, д.т.н., А.В. Маковецький, доцент, к.т.н., В.Б. Пода, доцент, к.т.н., НАУ імені М.Є. Жуковського «ХАІ»

***Анотація.** Запропоновано метод оцінювання показників потужності автомобільного двигуна за допомогою уточнених розгінних характеристик. Розроблений метод дозволяє визначити динамічні можливості автомобіля з урахуванням його конструктивних особливостей і умов експлуатації.*

***Ключові слова:** автомобіль, двигун, потужність, розгінні характеристики, випробування*

IMPROVING THE ACCURACY OF AUTOMOBILE ENGINE HORSEPOWER INDICATORS ESTIMATION BY BUILDING ITS ACCELERATION CHARACTERISTICS

N. Nechiporuk, Prof., Dr. Eng. Sc., Yu. Vorobyov, Prof., Ph.D., D. Klets, Prof., Dr. Eng. Sc., A. Makovetskiy, Associate Prof., Ph.D., V. Poda, Associate Prof., Ph.D. Zhukovsky National Aerospace University «KhAI»

***Abstract.** A method for estimating of automobile engine horsepower indicators using refined acceleration characteristics is proposed. Developed method allows determining automobile dynamic features taking into account its constructive features and operating conditions.*

***Key words:** automobile, engine, power, acceleration characteristics, testing*

Введение

Квалификация водителя, эксплуатационные факторы и конструктивные особенности оказывают значительное влияние на режимы работы автомобильного двигателя.

Для оценки показателей мощности, развиваемой двигателем в процессе эксплуатации, определяют скоростные, нагрузочные, регулировочные, многопараметрические характеристики, а

также характеристики оптимального регулирования, холостого хода и токсичности [1, 2].

Повышение точности оценки мощности двигателя позволит, в свою очередь, повысить точность определения показателей функциональной и технической эффективности автомобиля, а также его динамических свойств.

Анализ последних публикаций

Вопросам определения мощностных показателей автомобильного двигателя посвящен ряд работ отечественных и зарубежных специалистов [3-7].

В патенте [4] предложен способ определения мощности двигателя в зависимости от параметров движения автомобиля с учетом условий эксплуатации. Мощность предлагается определять после проведения предварительного выбега с использованием датчиков ускорений с помощью одновременного измерения всех видов сопротивления движения автомобиля, т.е. моментов сопротивления, возникающих в трансмиссии автомобиля, а также суммарного дорожного и аэродинамического сопротивления. Данный способ требует высокой точности при обработке параметров выбега для исключения погрешностей. В патенте [5] предлагается способ определения мощности двигателя автомобиля, аналогичный предыдущему, но не требующий предварительного проведения его выбега. К недостаткам данного способа можно отнести повышенные требования к вычислительной мощности бортового компьютера для обработки данных.

Авторы работы [6] предложили алгоритмы экспериментального определения мощности двигателя мобильной машины, которая реализуется при выполнении технологических операций, с использованием метода парциальных ускорений. Указанные алгоритмы позволяют определять реализуемую мощность двигателя при работе мобильной машины с прицепными или навесными орудиями и на валу отбора мощности. Авторы патента [7] предложили способ определения эффективного крутящего момента и эффективной мощности двигателя

автомобиля в условиях эксплуатации. Для реализации указанного способа необходимо дифференцирование угловой скорости и определение эффективного крутящего момента с использованием результатов ранее проведенного выбега.

Автором работы [3] предложена методика квалитрирования транспортных средств по величине кинетической энергии, расходуемой на движение груза, с учетом особенностей конструкции транспортного средства. Однако указанная методика не учитывает динамические свойства автомобилей, проявляющиеся при разгоне. Оценка потенциальных динамических свойств автомобилей возможна путем определения разгонных характеристик двигателя [8], т.е. зависимости мощности и крутящего момента от угловой скорости коленчатого вала. Таким образом, вопрос повышения точности оценки мощностных показателей автомобильного двигателя с помощью разгонных характеристик требует дополнительных исследований.

Цель и постановка задач исследования

Целью исследования является разработка метода оценки мощностных показателей автомобильного двигателя с помощью уточненных разгонных характеристик. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать уточненный метод построения разгонных характеристик автомобильного двигателя;
- выполнить оценку адекватности предложенной теоретической модели экспериментальным данным.

Метод построения разгонных характеристик автомобильного двигателя

Для оценки динамики разгона автомобиля в работе [8] предложена разгонная характеристика двигателя, показывающая изменение эффективной мощности N_e и эффективного крутящего момента M_e двигателя в зависимости от угловой скорости коленчатого вала при разгоне автомобиля.

Эффективный крутящий момент двигателя определяется с помощью следующего

соотношения [8]

$$M_e = \frac{m_a \cdot g \cdot r_\delta}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}} \cdot \left(\psi + K_{cy} \cdot \phi \cdot \left(\frac{S_x}{1 - S_x} + \delta \right) - \frac{k \cdot F}{m_a \cdot g} \cdot (1 - S_x)^2 \cdot (\delta - 1) \cdot \frac{n^2}{u_{mp}^2} \cdot r_\delta^2 \right), \quad (1)$$

где u_{mp} – общее передаточное отношение трансмиссии; η_{mp} – КПД трансмиссии; r_δ – динамический радиус колеса; m_a – полная масса автомобиля; g – ускорение свободного падения; f – коэффициент сопротивления качению; ϕ – коэффициент сцепления колес с дорогой; K_{cy} – коэффициент использования сцепного веса; $k \cdot F$ – фактор сопротивления воздуха; δ – коэффициент учета вращающихся масс двигателя и трансмиссии; S_x – относительное буксование; n – угловая скорость коленчатого вала двигателя; ψ – суммарный коэффициент дорожного сопротивления.

Эффективная мощность двигателя [8]

$$N_e = \frac{m_a \cdot g \cdot r_\delta}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}} \cdot \left(\psi + K_{cy} \cdot \phi \cdot \left(\frac{S_x}{1 - S_x} + \delta \right) \right) n - \frac{k \cdot F \cdot r_\delta^3 \cdot (1 - S_x)^2 \cdot (\delta - 1) \cdot n^3}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}^3}, \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) не учитывают изменение коэффициента сцепления в зависимости от линейной скорости движения автомобиля. В работе [11] предложен ряд аппроксимирующих зависимостей для определения $\phi(V)$, некоторые из которых приведены в табл. 1. Учесть зависимость $\phi(V)$ при построении разгонных характеристик можно с помощью следующего выражения

$$N_e = \frac{m_a \cdot g \cdot r_\delta}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}} \cdot \left(\psi + K_{cy} \cdot \phi(V) \cdot \left(\frac{S_x}{1 - S_x} + \delta \right) \right) n - \frac{k \cdot F \cdot r_\delta^3 \cdot (1 - S_x)^2 \cdot (\delta - 1) \cdot n^3}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}^3}, \quad (3)$$

Для построения разгонных характеристик двигателя автомобиля, необходимо знать величину коэффициента использования сцепного веса K_{cy} .

Таблица 1 Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости коэффициента сцепления колес с дорогой ϕ от скорости движения автомобиля V в км/ч и м/с

Показатель	$\phi_{сх}^{\max}(V)$	$\phi_{сх}^{\min}(V)$	$\phi_{мокр}^{\max}(V)$	$\phi_{мокр}^{\min}(V)$
степенная модель (V , км/ч)	0,1449 + $+0,9953 \cdot V^{-0,113}$	0,8494 – $-0,0312 \cdot V^{0,616}$	0,9865 – $-0,1082 \cdot V^{0,348}$	0,6614 – $-0,1063 \cdot V^{0,311}$
степенная модель (V , м/с)	0,1386 + $+0,8672 \cdot V^{-0,112}$	0,8494 – $-0,0687 \cdot V^{0,616}$	0,9865 – $-0,1689 \cdot V^{0,348}$	0,6628 – $-0,1596 \cdot V^{0,310}$

Для полноприводного автомобиля при реализации предельных касательных реакций на ведущих колесах $K_{cy} = 1$, а для заднеприводных и переднеприводных автомобилей [8] соответственно

$$K_{cy}^{zn} \cong \frac{a}{L - \delta \cdot \phi \cdot h}; \quad K_{cy}^{nn} \cong \frac{b}{L + \delta \cdot \phi \cdot h}, \quad (4)$$

где a , b – расстояния от передней и задней осей автомобиля до проекции центра масс на горизонтальную плоскость; L – продольная колесная база автомобиля; h – высота центра масс автомобиля.

Окончательно выражения для построения уточненных разгонных характеристик

автомобильного двигателя примут вид:
– для заднеприводного автомобиля

$$N_e = \frac{m_a \cdot g \cdot r_\delta}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}} \cdot \left[\psi + \frac{a}{L - \delta \cdot \phi \cdot h} \cdot \phi(V) \times \left(\frac{S_x}{1 - S_x} + \delta \right) \right] n - \frac{k F r_\delta^3 (1 - S_x)^2 (\delta - 1) n^3}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}^3}, \quad (5)$$

– для переднеприводного автомобиля

$$N_e = \frac{m_a \cdot g \cdot r_\delta}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}} \cdot \left[\psi + \frac{b}{L + \delta \cdot \phi \cdot h} \cdot \phi(V) \times \left(\frac{S_x}{1 - S_x} + \delta \right) \right] n - \frac{k F r_\delta^3 (1 - S_x)^2 (\delta - 1) n^3}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}^3}, \quad (6)$$

– для полноприводного автомобиля

$$N_e = \frac{m_a \cdot g \cdot r_d}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}} \left(\psi + \phi(V) \left(\frac{S_x}{1-S_x} + \delta \right) \right) n - \frac{k \cdot F \cdot r_0^3 \cdot (1-S_x)^2 \cdot (\delta-1)}{\eta_{mp} \cdot u_{mp}^3} \cdot n^3. \quad (7)$$

Экспериментальная оценка мощностных показателей автомобильного двигателя

В качестве измерительного оборудования

использован нагрузочный динамометрический стенд V-tech VT-2 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуков-ского «ХАИ», установленный на кафедре автомобилей и транспортной инфраструктуры (рис. 1). В качестве объектов исследований использованы автомобили Opel Vectra и Mercedes C 200 (рис. 2). Основные характеристики VT-2 сведены в табл. 2. Параметры точности стенда соответствуют требованиям ГОСТ 14841-81 [9].



Рис. 1. Внешний вид одноосного нагрузочного динамометрического стенда VT-2



а)



б)

Рис. 2. Внешний вид испытуемых автомобилей: а – Opel Vectra; б – Mercedes C 200

Таблица 2 Характеристики использованного нагрузочного динамометрического стенда VT-2

Параметр	Значение параметра
Габаритные размеры (длина × ширина), мм	1300×3500
Максимальное давление на ось, кг	3000
Количество осей, шт	1
Тормоз, мощность, кВт	Telma 1×350
Размеры вращающихся валов, мм	323, 660
Максимальная скорость на валах, км/ч	300
Максимальная сила тяги на колесах, Н	6000
Точность измерения мощности	0,25

в инерционном режиме, %	
Точность измерения мощности с тормозом, %	±1,0
Собственная масса, кг	1350

На первом этапе экспериментальных исследований выполнено четыре замера характеристик двигателя автомобиля Opel Vectra: два с наддувом и два без наддува. Фиксировались максимальные значения эффективной мощности $N_{e\max}$ и частота вращения вала двигателя при максимальной мощности n_N . По результатам замеров определялось расхождение между величинами максимальной мощности $\Delta N_{e\max}$ и величинами максимального крутящего

момента $\Delta M_{e\max}$. На втором этапе экспериментальных исследований выполнено четыре замера характеристик двигателя автомобиля Mercedes C 200.

Определение характеристик двигателя выполнялось согласно требованиям международных нормативных документов DIN 70020, EWG 80/1269, ISO 1585, JIS D1001 и SAE J1349.

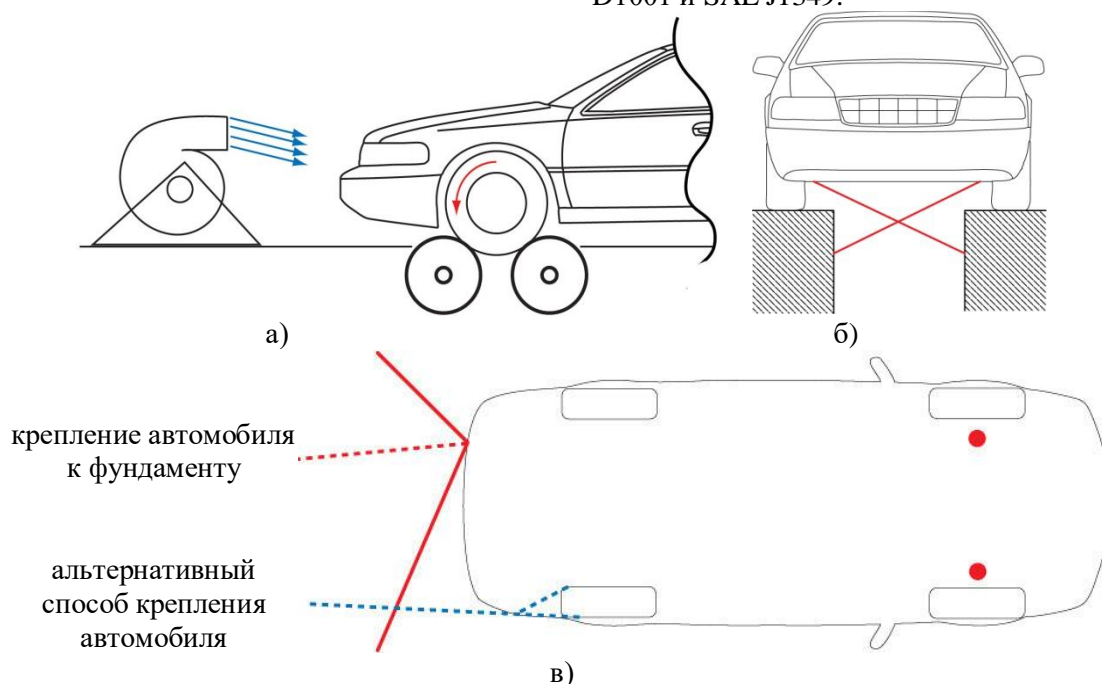


Рис. 3. Установка автомобиля на нагрузочный динамометрический стенд VT-2: а – охлаждение двигателя автомобиля во время испытаний; б – способ крепления автомобиля; в – крепление переднеприводного автомобиля к фундаменту

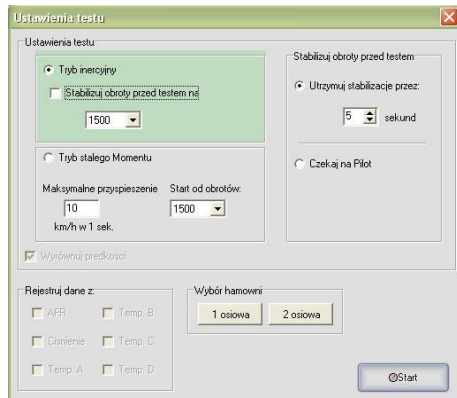
Величины давления и температуры окружающей среды во время испытаний взяты по показаниям датчиков стенда VT-2. Тормоз Telma использовался для симуляции дорожных испытаний (в частности, при симуляции сопротивления воздуха при движении, а также подъема-спуска автомобиля с уклонов до 45°). Перед проведением замеров выполнена проверка состояния покрышек и давления в колесах.

Во избежание съезда автомобиля со стенда во время испытаний использовалось его крепление к фундаменту с помощью крюков, ремней и крепежных зажимов (см. рис. 1 и рис. 3б, в). Для имитации обдува автомобиля набегающим потоком воздуха использован вентилятор мощностью 5,5 кВт, создающий поток с объемной скоростью 9360 м³/ч (см. рис. 1 и рис. 3а). Для снятия показаний при испытаниях использовано программное обеспечение (ПО), фиксирующее 2500 значений в секунду (рис. 4). После запуска ПО определялся статус приборов, которые подключены к стенду. В процессе испытаний колеса автомобиля разгонялись до включения передачи, на которой должно

пройти измерение, затем педаль газа нажималась до упора, позволяя двигателю набрать максимальные обороты.



а)



б)

Рис. 4. Внешний вид ПО для снятия данных при испытаниях: а – определение статуса приборов, подключенных к стенду; б – выбор способа торможения при испытаниях

Далее выжималась педаль сцепления, одновременно отпускалась педаль газа, и ожидалось, пока колеса автомобиля самостоятельно остановятся. Для испытания автомобилей без турбокомпрессора использовался режим инерционного торможения, а с турбокомпрессором – режим торможения с нагрузкой. Результаты стендовых испытаний на примере показателей двигателя автомобиля Opel

Vectra приведены в табл. 3 и на рис. 5.

Таблица 3 Результаты обработки стендовых испытаний автомобиля Opel Vectra

Заме р	Надд ув	$N_{e\ max}$, л.с.	$N_{e\ max}$, кВт	n_N , об/мин	$M_{e\ max}$, Н·м	n_M , об/мин
1	–	279,5	205,6	6758	291,4	6716
2	–	287,8	211,7	7000	289,6	6903
3	+	368,8	271,3	6521	425,3	4951
4	+	325,3	239,3	5994	427,9	4979

Анализ табл. 2 показывает, что по результатам стендовых испытаний расхождение $\Delta N_{e\ max}$ не превышает 2,9 %; а $\Delta M_{e\ max}$ – не превышает 0,6 %.

Для оценки адекватности предлагаемого метода сравним теоретические характеристики двигателя автомобиля Opel Vectra с экспериментальными $N_{e\ стэнд}(n)$. В качестве теоретических используем значения уточненных разгонных характеристик $N_{e\ разг}(n)$ и внешних скоростных характеристик двигателя $N_{e\ всхд}(n)$ [10]. Результаты сравнения приведены на рис. 6. Аналогично проведено сравнение теоретических и экспериментальных характеристик двигателя автомобиля Mercedes С 200.

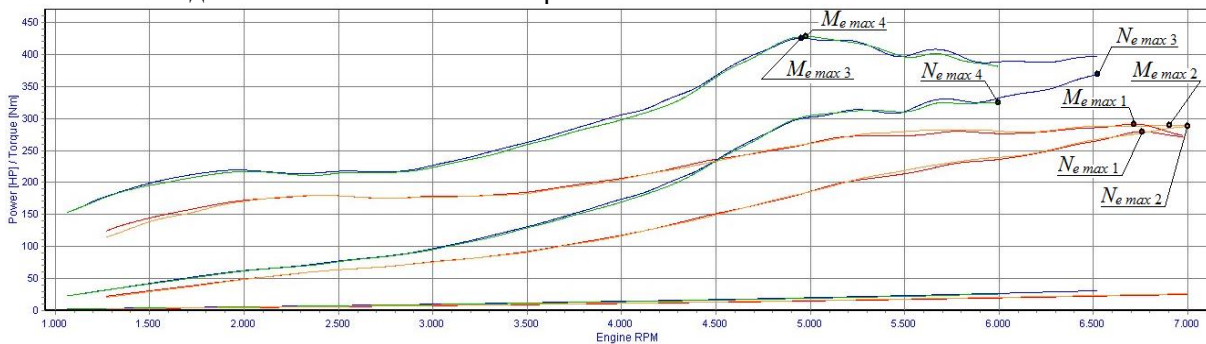


Рис. 5. Результаты стендовых испытаний автомобиля Opel Vectra с наддувом и без наддува

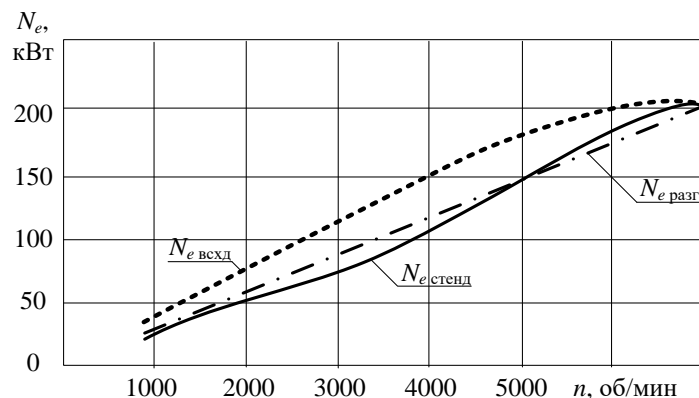


Рис. 6. Характеристики двигателя автомобиля Opel Vectra

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что максимальное расхождение $N_{e\text{всхд}}$ и $N_{e\text{разг}}$ составляет $31\pm 1\%$, а расхождение $N_{e\text{стенд}}$ и $N_{e\text{разг}}$ не превышает $11\pm 1\%$. Это свидетельствует о значительном снижении погрешности при теоретической оценке эффективной мощности двигателя автомобиля с помощью разгонных характеристик по сравнению с традиционной методикой построения внешней скоростной характеристики двигателя.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанный метод построения уточненных разгонных характеристик двигателя позволяет определить динамические возможности автомобиля с учетом его конструктивных особенностей и условий эксплуатации.
2. При выполнении стендовых испытаний расхождение между величинами максимальной мощности не превышает $2,9\%$, а между величинами максимального крутящего момента – $0,6\%$.
3. Максимальное расхождение между величинами мощности двигателя, определенными экспериментально и с помощью классического тягового расчета, составляет $31\pm 1\%$. Погрешность, получаемая при построении разгонных характеристик, не превышает $11\pm 1\%$. Это свидетельствует об адекватности предложенного метода теоретической оценки эффективной мощности двигателя автомобиля.

Литература

1. Абрамчук Ф. І. Автомобільні двигуни / Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є., Тимченко І. І. – К.: Арістей, 2004. – 438 с.
2. Mollenhauer K. Handbook of Diesel Engines / Mollenhauer K., Tschoeke H. // Springer. – Heidelberg. – 636 p.
3. Бурдаков В. Д. Квалиметрия транспортных средств / В. Д. Бурдаков // Методика оценки эффективности использования. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 160 с.
4. Пат. 80213 Україна, МПК G01L 5/13. Спосіб визначення потужності двигуна

- автомобіля в експлуатації / Подригало М. А., Клец Д. М., Коробко А. І., Абрамов Д. В., Мостова А. М., Тесля В. О.; заявник та патентовласник ХНАДУ. – № u 2012 07280; заявл. 15.06.12 ; опубл. 27.05.13, Бюл. № 10.
5. Пат. 80214 Україна, МПК G01L 5/13. Спосіб визначення потужності двигуна автомобіля в експлуатації без попереднього проведення його вибігу / Подригало М. А., Клец Д. М., Абрамов Д. В., Коробко А. І., Тесля В. О.; заявник та патентовласник ХНАДУ. – № u 2012 07283; заявл. 15.06.12 ; опубл. 27.05.13, Бюл. № 10.
 6. Алгоритми експериментального визначення потужності двигуна мобільної машини, яка реалізується при виконанні технологічних операцій / М. П. Артёмов, Н. М. Подригало / Вісник НТУ «ХП». Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2012 – № 60 (966). – С. 17–24.
 7. Пат. 69235 Україна, МПК G01L 3/24. Спосіб визначення ефективного крутного моменту та ефективної потужності двигуна автомобіля / Подригало Н. М., Плетньов В. М., Абдулгасіс У. А., Абдулгасіс А. У., Полянський О. С., Подригало М. А. - № u 2011 11448; заявл. 28.09.11; опубл. 25.04.12, Бюл. № 8.
 8. Подригало М.А. Разгонные характеристики автомобильного двигателя [Текст] / Подригало М.А., Файст В.Л. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Автомобіле- та тракторобудування №58. – 2008. – С. 93–97.
 9. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний [Текст]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 53 с.
 10. Бортницкий П. И. Тягово-скоростные качества автомобилей / Бортницкий П.И., Задорожный В.И. – К.: Вища школа, 1978. – 176 с.
 11. Клец Д. М. Экспериментальное определение коэффициента сцепления колес с дорогой / Д. М. Клец // Механіка та машинобудування. – 2012. – № 1. – С. 57–65.

Рецензент Н.П. Артемов, профессор, д.т.н.,
ХНТУСХ ім. П. Василенко

Статья поступила в редколлегию 02.11.2015