

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-334351>

Оригинальное исследование



# Пути повышения показателей двигателя внутреннего сгорания с учетом нагрузочных режимов трансмиссии автомобиля

А.А. Бердников, А.О. Шангутов, А.В. Шилоносов

Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, Пермь, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Важнейшим направлением развития экономики страны в условиях санкционной политики стало импортозамещение. В связи с этим предъявляются высокие требования к производству в рамках конкурентоспособности автомобильной техники. Автомобильная техника является неотъемлемой частью развития экономики страны, что подтверждается ростом объемов автомобильных перевозок. Однако, в тоже время, рост автомобилей, повышает потребление топлива нефтяного происхождения, основным недостатком которого является эмиссия вредных веществ, поэтому двигатели внутреннего сгорания автомобильной техники должны обеспечивать малые расходы топлива и меньше выбросов вредных веществ в отработавших газах. Вместе с тем, режимы работы двигателя во многом зависят от нагрузок, формируемых в трансмиссии автомобиля.

**Цель работы** — определить возможности расширения диапазонов регулирования мощности двигателя внутреннего сгорания автомобиля, с одной стороны, обеспечивающих малые расходы топлива и меньше выбросов вредных веществ в отработавших газах, а с другой стороны – обеспечивающих требуемую для движения автомобиля мощность, с учетом типа трансмиссии и движителя.

**Материалы и методы.** Проведен анализ возможных традиционных и нетрадиционных рабочих циклов двигателя внутреннего сгорания. Применяется метод математического моделирования формирования моментов в различных типах трансмиссий автомобиля.

**Результаты.** Рассмотрены возможные пути расширения диапазонов регулирования мощности двигателя внутреннего сгорания, обеспечивающих потребную мощность, малые расходы топлива и меньше выбросов вредных веществ в отработавших газах, а также схемы трансмиссий и процессы формирования в них потребной мощности для обеспечения движения автомобиля.

**Заключение.** Рассмотренный в статье подход расширения диапазонов регулирования мощности двигателя внутреннего сгорания автомобиля позволяет сделать вывод о необходимости использования принципов научного подхода к процессу конструктивного оформления трансмиссий автомобилей, способных управлять двигателем внутреннего сгорания в зависимости от нагрузок, обеспечивая его работу с минимальным расходом топлива и эмиссией вредных веществ.

**Ключевые слова:** режимы работы двигателя; рабочий цикл; трансмиссия; движитель; распределение потоков мощности.

## Как цитировать:

Бердников А.А., Шангутов А.О., Шилоносов А.В. Пути повышения показателей двигателя внутреннего сгорания с учетом нагрузочных режимов трансмиссии автомобиля // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 2. С. 97–106. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-334351>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-334351>

Original study article

# Ways to improve performance of an internal combustion engine regarding the loading conditions of vehicle transmission

Alexey A. Berdnikov, Anton O. Shangutov, Artem V. Shilonosov

Perm Military Institute of the National Guard Troops of the Russian Federation, Perm, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Import substitution has become the most important direction of the development of the country's economy in the conditions of the sanctions policy. In this regard, high requirements are imposed on the production to ensure the competitiveness of automotive machinery. Automotive machinery is a key component of the country's economy that is confirmed by the growth of road transport. Meanwhile, growth of the vehicle fleet leads to increase in consuming of petroleum-derived fuel, which main disadvantage is emission of harmful substances, therefore, internal combustion engines of automotive machinery should ensure low fuel consumption and less emissions of harmful substances with exhaust gases. However, the engine operating modes largely depend on the loads generated in the vehicle transmission.

**AIMS:** To determine the possibilities of expanding the ranges of power regulation of an internal combustion engine of a vehicle, on the one hand, ensuring low fuel consumption and less emission of harmful substances with exhaust gases, and on the other hand, providing with the power required for a vehicle to move, regarding the type of transmission and propulsion.

**METHODS:** The analysis of possible conventional and unconventional operating cycles of an internal combustion engine is carried out. The method of mathematical modeling of the formation of torques in various types of vehicle transmission is used.

**RESULTS:** Possible ways of expanding the ranges of power regulation of an internal combustion engine providing with the required power, low fuel consumption and less emission of harmful substances with exhaust gases, as well as transmission layouts and processes of forming the required power in them to ensure the vehicle movement are considered.

**CONCLUSIONS:** The considered in the article approach of expanding the ranges of power regulation of an internal combustion engine of a vehicle makes it possible to conclude that it is necessary to use the principles of a scientific approach to the process of development of vehicle transmissions capable of controlling an internal combustion engine depending on loads, ensuring its operation with minimal fuel consumption and emission of harmful substances.

**Keywords:** engine operating modes; operating cycle; transmission; propulsion; power flows distribution.

## To cite this article:

Berdnikov AA, Shangutov AO, Shilonosov AV. Ways to improve performance of an internal combustion engine regarding the loading conditions of vehicle transmission. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(2):97–106. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-334351>

Received: 13.04.2023

Accepted: 01.06.2023

Published: 15.07.2023

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим направлением развития экономики страны в условиях санкционной политики стало импортозамещение. Санкции серьезно повлияли на отечественное автомобилестроение из-за специфики производства. Чтобы оставаться на рынке и конкурировать с автогигантами мирового уровня, производителям необходимо предъявлять высокие требования к техническому совершенству автомобилей, закладывать перспективные технологии и конструкции еще на стадии проектирования.

Автомобильная техника является неотъемлемой частью развития экономики страны, что подтверждается ростом объемов автомобильных перевозок, однако, в тоже время, рост автомобилей, повышает потребление топлива нефтяного происхождения, основным недостатком которого является эмиссия вредных веществ в результате горения в цилиндрах двигателя. Внедрение норм ЕВРО, политика страны, направленная на улучшение экологической обстановки, тренды уменьшения потребления топлив нефтяного происхождения подталкивают автопроизводителей на разработку автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), имеющие малые расходы топлива и меньше выбросов вредных веществ в отработавших газах.

Развитие автомобильного двигателестроения в его традиционном исполнении подходит к своему пику, поэтому решение проблем экономичности и снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду, лежит в комплексном рассмотрении ДВС и движителя с силовым приводом автомобиля, что позволит производителям конкурировать на рынке сбыта.

Как известно, на современных образцах автомобильной техники, применяются различные типы движителей. В первую очередь – это колесный и гусеничный. Наиболее применимым средством подвижности в тяжелых дорожных условиях являются гусеничные машины. Они чаще используются там, где практически исключена возможность применения колесных машин. Но при движении по ровной, твердой и сухой опорной поверхности гусеничные машины уступают колесным по средним и максимальным скоростям движения, к тому же гусеничный движитель обладает низким ресурсом и коэффициентом полезного действия (КПД), так как его элементы нагружены больше, чем элементы колесного движителя. Поэтому, в качестве комплексного решения проблемы и обеспечения необходимых эксплуатационных свойств является применение комбинированного движителя, объединяющего преимущества колесных и гусеничных машин.

От применяемого на автомобиле типа движителя, как известно, зависит схема трансмиссии, которая,

в свою очередь, должна обеспечивать, наряду с основными требованиями, эксплуатационные режимы, обеспечивающие минимальный расход топлива ДВС и эмиссию вредных веществ в отработавших газах. Хотя, следует заметить, что на реализацию данного требования влияет не только конструктивное исполнение трансмиссии, но и условия ее нагружения, связанные с применением того или иного типа движителя, условия движения автомобиля, учитывающими такие факторы как: несущая способность опорной поверхности, траектория движения автомобиля, макро- и микропрофиль поверхности и т.д.

Таким образом, формируемые в трансмиссии режимы нагружения, в зависимости от типа движителя и условий движения автомобиля, будут оказывать непосредственное влияние на основные показатели двигателя рассматриваемого автомобиля.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо получить широкий диапазон регулирования мощности ДВС, с одной стороны, обеспечивающий малые расходы топлива и меньше выбросов вредных веществ в отработавших газах, а с другой стороны – обеспечивающий требуемую для движения автомобиля мощность [1]:

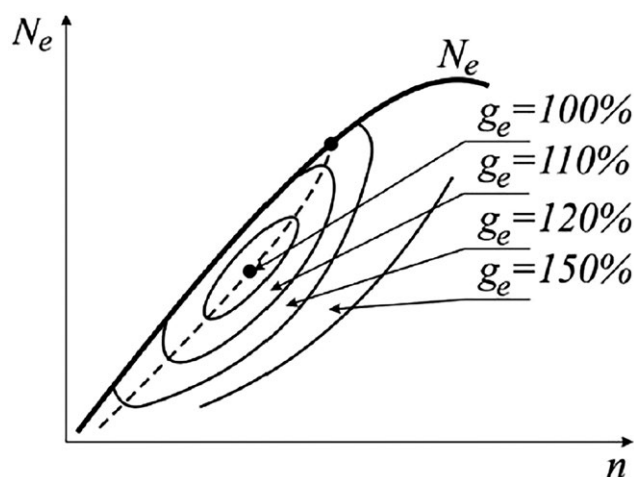
$$N_e = \frac{N_k}{\eta_{тр}} = (N_f + N_h + N_w + N_j + N_{пр}) \cdot \frac{1}{\eta_{тр}}, \quad (1)$$

где  $N_e$  – номинальная эффективная мощность;  $N_k$  – мощность, необходимая для перемещения автомобиля;  $\eta_{тр}$  – КПД трансмиссии автомобиля;  $N_f$  – мощность, необходимая для преодоления сопротивлений движению;  $N_h$  – мощность, необходимая для преодоления сопротивлений подъему;  $N_w$  – мощность, необходимая для преодоления аэродинамических сопротивлений;  $N_j$  – затраты мощности на увеличение кинетической энергии автомобиля при движении;  $N_{пр}$  – затраты мощности на перемещение прицепа.

Исходя из постановки задачи, рассмотрим возможные пути расширения диапазона режимов работы ДВС, обеспечивающих потребную мощность, малые расходы топлива и меньше выбросов вредных веществ в отработавших газах, а также схемы трансмиссий и процессы формирования в них потребной мощности для обеспечения движения автомобиля.

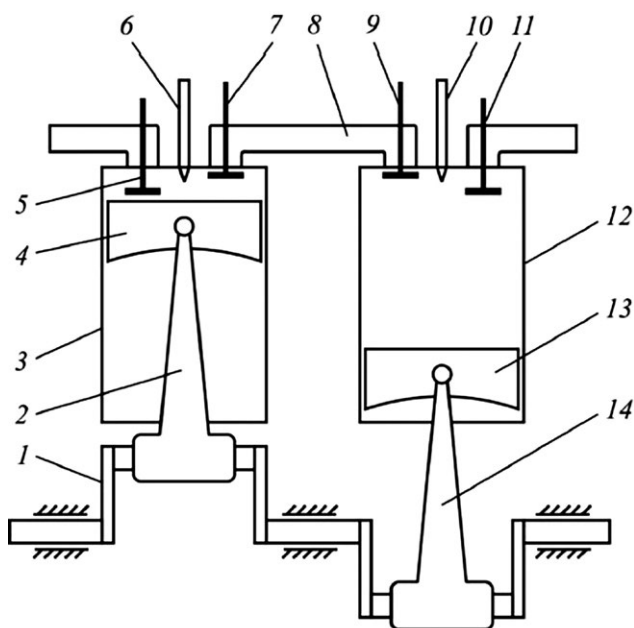
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Регулирование мощности ДВС, в зависимости от формируемых режимов работы трансмиссии автомобиля, традиционно осуществляется путем изменения цикловой подачи топлива, однако, такой способ не в полной мере отвечает требованиям в рамках



**Рис. 1.** Внешняя скоростная характеристика ДВС с областями удельных расходов топлива: — — — — наибольшая мощность двигателя при минимальных удельных расходах топлива;  $g_e$  — удельный эффективный расход топлива;  $N_e$  — эффективная мощность;  $n$  — частота вращения коленчатого вала.

**Fig. 1.** Full-load curve of an internal combustion engine with specific fuel consumption areas: — — — — maximum engine power at minimum specific fuel consumption;  $g_e$  — specific effective fuel consumption;  $N_e$  — effective power;  $n$  — crankshaft rotation velocity.



**Рис. 2.** Схема двигателя с впрыском воды: 1 — коленчатый вал; 2, 14 — шатуны; 3 — основной цилиндр; 4, 13 — поршни; 5, 9 — впускные клапаны; 6 — форсунка подачи топлива; 7, 11 — выпускные клапаны; 8 — перепускной газоход; 10 — форсунка впрыска воды; 12 — дополнительный цилиндр.

**Fig. 2.** Diagram of the engine with water injection: 1 — a crankshaft; 2, 14 — connecting rods; 3 — a main cylinder; 4, 13 — pistons; 5, 9 — intake valves; 6 — a fuel injection nozzle; 7, 11 — exhaust valves; 8 — a bypass flue; 10 — a water injection nozzle; 12 — an additional cylinder.

поставленной задачи. Подавляющее большинство ДВС работают по четырехтактной, так называемой, традиционной схеме рабочего цикла. Модернизация такого традиционного цикла в виду развития современных технологий не оказывает существенного качественного изменения мощностных показателей ДВС. Поэтому есть необходимость рассмотреть альтернативные циклы работы двигателя, например, таких как: отключение части цилиндров двигателя, при его работе на режимах малых и частичных нагрузок; впрыск воды в цилиндры двигателя; применение нетрадиционных рабочих циклов [2–6].

Отключение части цилиндров двигателя не является сегодня новым. Часть цилиндров двигателя отключают на режимах, когда от двигателя не требуется максимальной мощности, например, на таких режимах, как малые или частичные нагрузки и холостой ход. Поэтому, по сути, отключение цилиндров не является модернизацией рабочего цикла ДВС, но позволяет, оставшиеся включенными в работу, цилиндры вывести на оптимальную мощность с минимальным удельным расходом топлива (рис. 1). Экономия топлива при отключении части цилиндров двигателя может составить до 25–30%, особенно если автомобиль эксплуатируется в городских условиях [2].

Впрыск воды в цилиндры ДВС исследуется со времени создания первых автомобилей, однако, такой способ не получил широкого распространения ввиду ряда существенных недостатков, таких как: высокая температура замерзания и плохие смазывающие свойства воды, коррозия металла при контакте с водой, сложности в подготовке и подаче воды в цилиндры двигателя. Тем не менее, есть и преимущества, например, при подаче воды в цилиндры двигателя в мелко-распыленном состоянии вместе с воздухом охлаждает его, что способствует повышению коэффициента наполнения цилиндров, также вода снижает температуру горения топлива в цилиндрах двигателя, а это благоприятно влияет на форсирование двигателя по степени сжатия. Ввиду развития современных технологий есть возможность реализовать нетрадиционный семитактный рабочий цикл (рис. 2) путем впрыска воды в дополнительный цилиндр [3]. Вода, попадая в раскаленный отработавшими газами дополнительный цилиндр, испаряется, и пар создает дополнительное давление на поршень двигателя. Таким образом получается дополнительный рабочий ход поршня, что увеличивает крутящий момент ДВС, но при меньших затратах топлива.

Применение нетрадиционных рабочих циклов, например, таких как показаны на рис. 2 и 3, способствует повышению топливной экономичности и КПД двигателя. Принцип работы указанных двигателей основан

на изменении рабочего цикла путем дополнительного использования давления отработавших газов и увеличением протекания тактов по углу поворота коленчатого вала, что позволяет гарантировать полное и качественное сгорание топлива, тем самым обеспечивая экономичность двигателя и уменьшить выбросы вредных веществ в отработавших газах.

Альтернативные циклы работы ДВС позволяют расширить потребный диапазон мощности двигателя с учетом нагрузочных режимов в трансмиссии автомобиля с различным исполнением движителя: колесным, гусеничным или комбинированным.

Формирование нагрузок в трансмиссии автомобиля зависит от величины реализуемого трансмиссией момента. В свою очередь, реализуемый трансмиссией момент зависит от внешних факторов движения автомобиля, таких как сопротивление и сцепление движителя с опорной поверхностью, траектория движения, преодоление автомобилем подъема и т.д. Однако, схема трансмиссии и ее тип: блокированная, дифференциальная или с индивидуальным приводом колес оказывают существенное влияние на формировании нагрузок в трансмиссии [7–11]. На примере четырехосного полноприводного автомобиля рассмотрим формирование моментов в различных трансмиссиях.

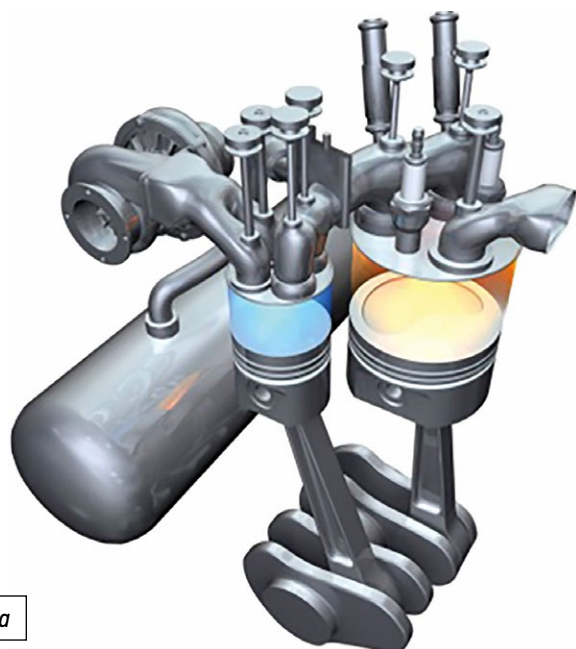
Трансмиссия автомобиля, имеющая симметричный дифференциал (рис. 4), описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_д = \frac{\dot{\omega}_1 + \dots + \dot{\omega}_8}{8}; \\ J_д \cdot \dot{\omega}_д = M_д - M_{сд}; \\ J_{ki} \cdot \dot{\omega}_i = \frac{M_{сд}}{8} - M_{ски}, \end{cases} \quad (2)$$

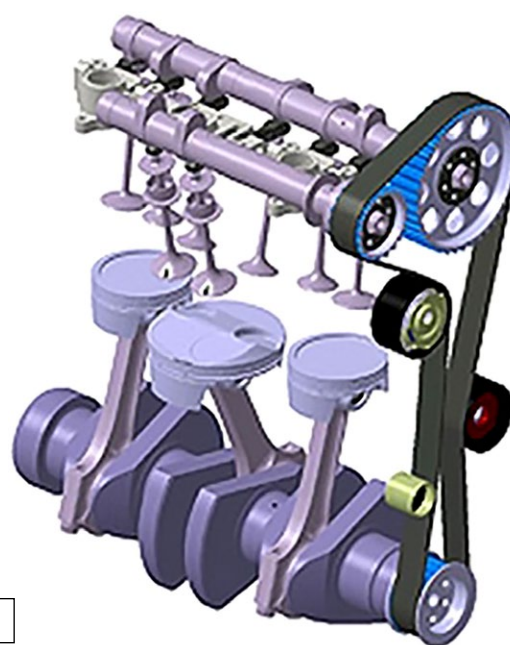
где  $J_д$  – момент инерции двигателя;  $\dot{\omega}_д$  – угловое ускорение вращения вала двигателя;  $M_д$  – момент, развиваемый двигателем;  $M_{сд}$  – момент сопротивления, приведенный к валу двигателя;  $\omega_{ki}$  – угловая скорость  $i$ -го колеса;  $J_{ki}$  – момент инерции  $i$ -го колеса;  $M_{ски}$  – момент сопротивления на  $i$ -ом колесе.

Трансмиссия автомобиля, в которой установлен межбортовой дифференциал (рис. 5), описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} J_{тл} \cdot \dot{\omega}_{лб} = \frac{M_{сд}}{2} - M_л; \\ J_{тп} \cdot \dot{\omega}_{пб} = \frac{M_{сд}}{2} - M_п; \\ \dot{\omega}_д = \frac{\dot{\omega}_{лб} + \dot{\omega}_{пб}}{2}; \\ J_д \cdot \dot{\omega}_д = M_д - M_{сд}; \\ M_{слб} = M_{ск1} + M_{ск3} + M_{ск5} + M_{ск7}; \\ M_{спб} = M_{ск2} + M_{ск4} + M_{ск6} + M_{ск8}; \\ \dot{\omega}_{лб} = \dot{\omega}_{к1} = \dot{\omega}_{к3} = \dot{\omega}_{к5} = \dot{\omega}_{к7}; \\ \dot{\omega}_{пб} = \dot{\omega}_{к2} = \dot{\omega}_{к4} = \dot{\omega}_{к6} = \dot{\omega}_{к8}, \end{cases} \quad (3)$$

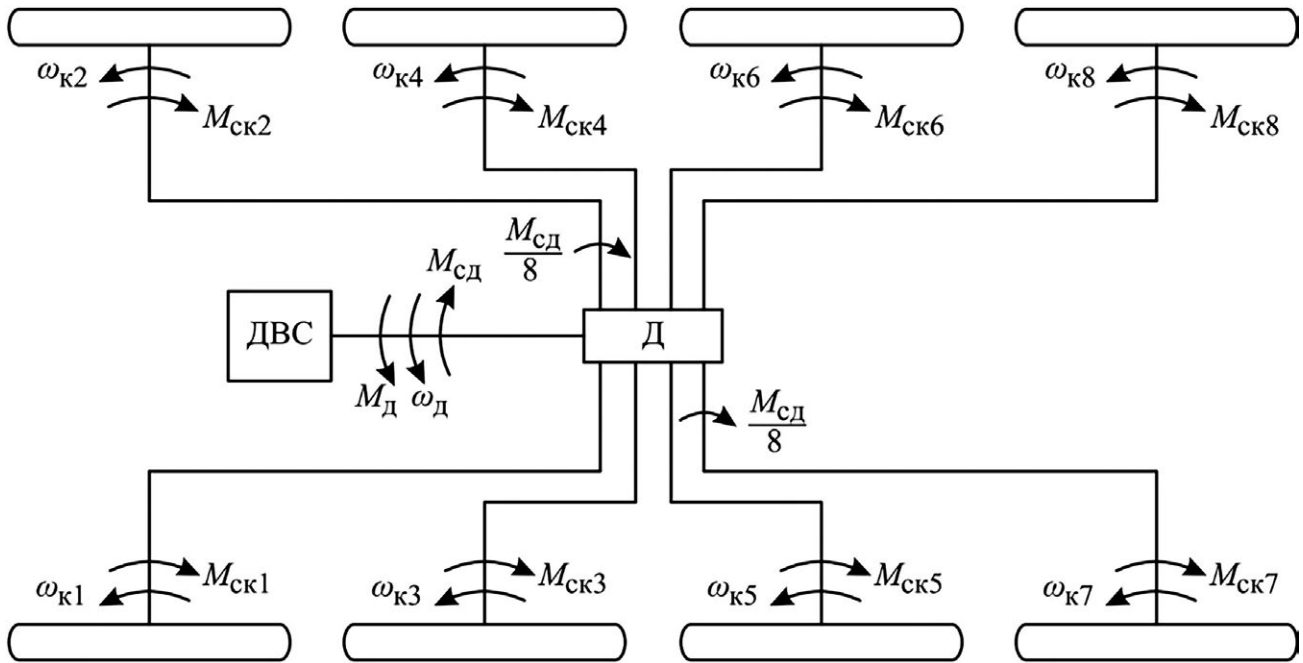


a

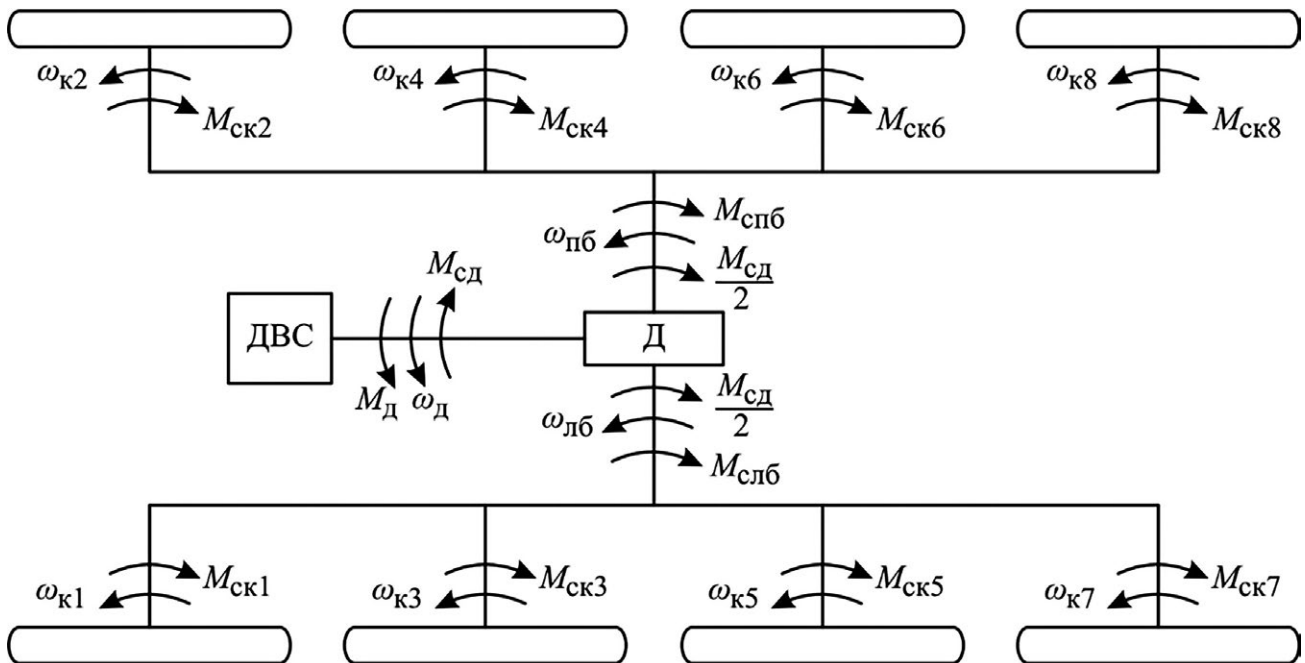


b

**Рис. 3.** Двигатели с нетрадиционным рабочим циклом: *a* — двухтактный двигатель Scuderi [6]; *b* — пятитактный двигатель [5].  
**Fig. 3.** Engines with an unconventional operating cycle: *a* — the Scuderi two-stroke engine [6]; *b* — a five-stroke engine [5].



**Рис. 4.** Схема трансмиссии автомобиля с симметричным дифференциалом.  
**Fig. 4.** Diagram of vehicle transmission with a symmetrical differential.



**Рис. 5.** Схема трансмиссии автомобиля с межбортовым дифференциалом.  
**Fig. 5.** Diagram of vehicle transmission with an interside differential.

где  $J_{\text{лб}}$  – момент инерции элементов трансмиссии и двигателя левого борта;  $J_{\text{пб}}$  – момент инерции элементов трансмиссии и двигателя правого борта;  $\dot{\omega}_{\text{лб}}$  – угловое ускорение вращения вала трансмиссии левого борта;  $\dot{\omega}_{\text{пб}}$  – угловое ускорение вращения вала трансмиссии правого борта;  $M_{\text{слб}}$  – момент сопротивления, приведенный к валу трансмиссии левого борта;  $M_{\text{спб}}$  – момент сопротивления, приведенный к валу трансмиссии правого борта.

Полностью блокированная трансмиссия автомобиля описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} J_{\text{д}} \cdot \dot{\omega}_{\text{д}} = M_{\text{д}} - M_{\text{сд}}; \\ M_{\text{сд}} = M_{\text{ск1}} + \dots + M_{\text{ск8}}; \\ \dot{\omega}_{\text{д}} = \dot{\omega}_{\text{к1}} = \dots = \dot{\omega}_{\text{к8}}. \end{cases} \quad (4)$$

Индивидуальный привод каждого движителя возможен как в механической трансмиссии, так

и в гидрообъемной, электрической или комбинированной.

В механической трансмиссии индивидуальный привод каждого движителя сопровождается сложностью конструкции трансмиссии. Это вызвано необходимостью введения в распределяющих устройствах постоянно изменяющегося передаточного числа рассогласования крутящего момента между движителями, имеющими разные характеристики и условия движения. То есть, для оптимального распределения сил тяги по движителям с разными жесткостными характеристиками или разными условиями движения, необходимо регулировать передаточное число в трансмиссионном приводе путем введения величины кинематического рассогласования (ВКР), тем самым обеспечив работу трансмиссии без циркуляции мощности.

Исследования показывают, что трансмиссия без регулирования ВКР является более нагруженной по сравнению с трансмиссией с механизмом регулирования. Как видно из рис. 6 максимумы процессов изменения крутящих моментов трансмиссии без регулирования ВКР по абсолютным величинам на 0,32–0,41 кНм смещены в сторону больших значений, к тому же жесткий движитель имеет отрицательные моменты, явно констатируя факт наличия в трансмиссии циркуляции мощности. В случае же регулирования ВКР на ведущих элементах жесткого движителя максимумы процессов изменения крутящих моментов принимают положительные значения, что свидетельствует об уменьшении, либо полном исключении циркуляции мощности.

Регулированием ВКР можно добиться работы каждого движителя в требуемом режиме. Однако, реализация индивидуального привода в механической трансмиссии

затрудняется сложностью конструкции трансмиссии, обеспечивающей регулирование ВКР для каждого отдельного движителя. Конструктивно проще обеспечить регулирование ВКР в индивидуальном приводе движителей с применением гидрообъемной, электрической или комбинированной трансмиссии.

Индивидуальный привод колеса от ДВС может быть реализован по схеме, представленной на рис. 7. Количество представленных приводов будет зависеть от количества колес, устанавливаемых на автомобиле.

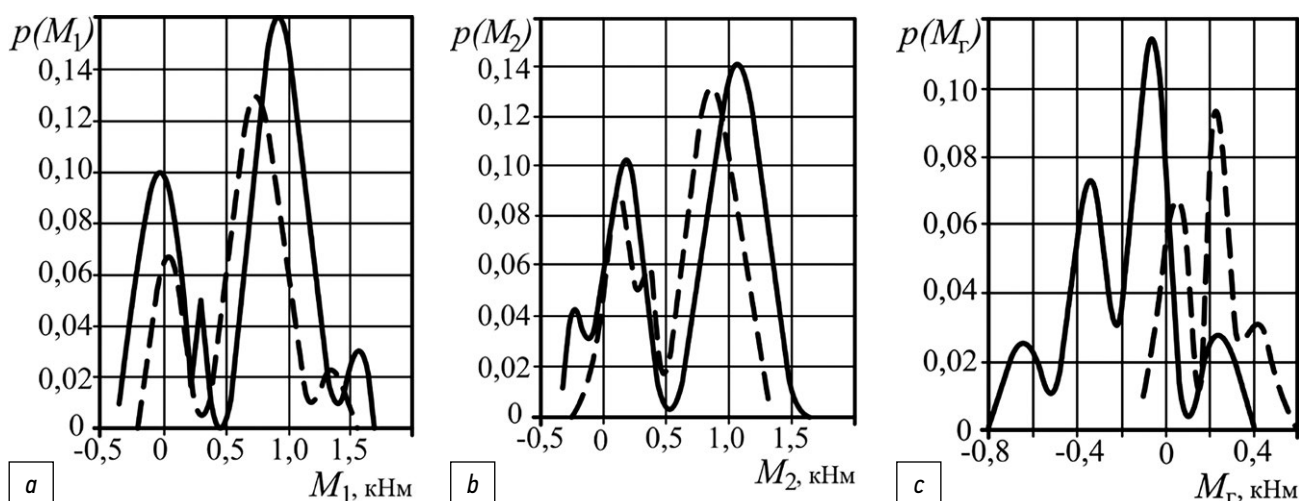
Формирование моментов в трансмиссии с индивидуальным приводом колес зависит от принципов распределения мощности по колесам движителя [7–9]:

1. принцип равенства моментов полностью дифференцированной трансмиссии:

$$\begin{cases} \omega_{к.ср} = \frac{\sum_{i=1}^{2n} \omega_{ki}}{2n}; \\ M_{д} = \frac{N_{д} \eta_{тр}}{\omega_{к.ср}}; \\ M_{ТЭДi} = \frac{M_{д}}{2n}; \end{cases} \quad (5)$$

2. принцип равенства мощностей:

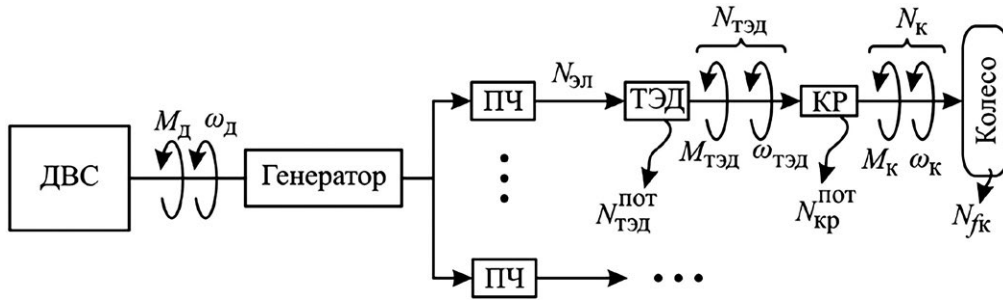
$$\begin{cases} N_{ki} = \frac{N_{д} \eta_{тр}}{2n}; \\ M_{ТЭДi} = \frac{N_{ki}}{\omega_{ki}}; \end{cases} \quad (6)$$



**Рис. 6.** Плотности распределения максимумов крутящих моментов в механической трансмиссии с индивидуальным приводом: *a* — на валах привода переднего моста; *b* — на валах привода заднего моста; *c* — на жестком движителе; — — — — силовой привод без регулирования ВКР; — — — — силовой привод с регулированием ВКР.

**Fig. 6.** Distribution densities of maximal torques in a manual transmission with individual drive: *a* — at the drive shafts of the front axle; *b* — at the rear axle drive shafts; *c* — at the rigid propulsor; — — — — drivetrain without regulation of value of kinematic mismatch; — — — — drivetrain with regulation of value of kinematic mismatch.





**Рис. 7.** Схема привода колеса в индивидуальной трансмиссии: ПЧ – преобразователь частоты; ТЭД – тяговый электродвигатель; КР – колесный редуктор;  $N_{эл}$  – электрическая мощность;  $N_{ТЭД}^{пот}$  – мощность потерь;  $N_{ТЭД}$  – механическая мощность;  $M_d$  – крутящий момент на входе в трансмиссию;  $\omega_d$  – угловая скорость вала двигателя;  $M_{ТЭД}$  – крутящий момент на валу ТЭД;  $\omega_{ТЭД}$  – угловая скорость вала ТЭД;  $N_{кр}^{пот}$  – мощность, теряемая в колесном редукторе;  $N_k$  – механическая мощность;  $M_k$  – крутящий момент на выходном валу колесного редуктора;  $\omega_k$  – угловая скорость выходного вала колесного редуктора;  $N_{fk}$  – мощность сопротивления качению шины.

**Fig. 7.** The scheme of the wheel drive in the individual transmission: ПЧ – a frequency converter; ТЭД – a traction electric motor; КР – a wheel-hub gear;  $N_{эл}$  – electrical power;  $N_{ТЭД}^{пот}$  – loss power;  $N_{ТЭД}$  – mechanical power;  $M_d$  – input transmission torque;  $\omega_d$  – angular velocity of the motor shaft;  $M_{ТЭД}$  – torque at the shaft of the traction electric motor;  $\omega_{ТЭД}$  – angular velocity of the shaft of the traction electric motor;  $N_{кр}^{пот}$  – power lost in the wheel-hub gear;  $N_k$  – mechanical power;  $M_k$  – torque at the output shaft of the wheel-hub gear;  $\omega_k$  – angular velocity of the output shaft of the wheel-hub gear;  $N_{fk}$  – power of tire rolling resistance.

3. принцип равенства частот вращения:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_{к.ср} &= \frac{\sum_{i=1}^{2n} \omega_{ki}}{2n}; \\ M_{\omega i} &= \frac{\omega_{к.ср} - \omega_{ki}}{\omega_{ki}} M'_{ТЭД i}; \\ M_d &= \frac{N_d \eta_{тр}}{\omega_{к.ср}}; \\ M_{ТЭД i} &= \frac{M_d}{2n} + M_{\omega i}; \end{aligned} \right. \quad (7)$$

4. принцип равенства скольжений:

$$\left\{ \begin{aligned} S_{ср} &= \frac{\sum_{i=1}^{2n} S_i}{2n}; \\ M_{S_i} &= \frac{S_{ср} - S_i}{S_i} M'_{ТЭД i}, \quad \text{при } S_{ср} < S_{пред}; \\ M_{S_i} &= \frac{S_{пред} - S_i}{S_i} M'_{ТЭД i}, \quad \text{при } S_{ср} > S_{пред}; \\ \omega_{к.ср} &= \frac{\sum_{i=1}^{2n} \omega_{ki}}{2n}; \\ M_d &= \frac{N_d \eta_{тр}}{\omega_{к.ср}}; \\ M_{ТЭД i} &= \frac{M_d}{2n} + M_{S_i}, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где  $\omega_{к.ср}$  – средняя угловая скорость всех ведущих колес;  $N_k$  – мощность, подводимая к  $i$ -ому колесу;  $M_{\omega i}$  – приращение крутящего момента, который необходимо подвести к  $i$ -ому колесу, чтобы его угловая скорость была равна  $\omega_{к.ср}$ ;  $M'_{ТЭД i}$  – текущее (мгновенное) значение крутящего момента, подведенного к  $i$ -ому колесу;  $M_{S_i}$  – приращение крутящего момента, который необходимо подвести к  $i$ -ому колесу, чтобы его скольжение было равно  $S_{ср}$  или  $S_{пред}$ ;  $n$  – количество ведущих осей.

В работе [7] на основании имитационного моделирования сделан вывод, что наиболее предпочтительным с точки зрения формирования тягово-динамических свойств автомобиля является принцип равенства мощностей в приводах колес. Затем по предпочтительности распределились принципы распределения: с равенством скольжения колес, с равенством моментов на колесах и равенством частот вращения колес.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотренные пути расширения диапазона режимов работы ДВС и принципов распределения мощности в различных трансмиссиях позволяют сделать вывод о необходимости комплексного подхода к формированию технического облика и конструктивному исполнению трансмиссий автомобилей, способных управлять ДВС в зависимости от нагрузок, обеспечивая работу ДВС с малыми расходами топлива и меньшими выбросами вредных веществ в отработавших газах.



## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** А.А. Бердников — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии; А.О. Шангутов — редактирование текста рукописи; А.В. Шилоносков — редактирование текста рукописи, создание изображений. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». М.: Машиностроение, 1983.
2. Бердников А.А., Мингазов С.Р., Жуков А.А. Повышение экономических показателей двигателей внутреннего сгорания путем отключения части цилиндров // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. № 1. С. 12–16.
3. Бердников А.А., Нагайцев Д.С., Титков Н.В. Двигатель внутреннего сгорания с нетрадиционным рабочим циклом // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 1. С. 21–25.
4. Тер-Мкртчян Г.Г. Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2015.
5. Пятитактный двигатель работает и может пойти в производство. Дата обращения: 10.04.23. Режим доступа: <http://autoutro.ru/review/2014/11/19/pyatitaktnyj-dvigatel-rabotayet-i-mozhet-pojti-v-proizvodstvo>

## REFERENCES

1. Vyubov DN, Ivashchenko NA, Ivin VI, et al. *Internal combustion engines. Theory of reciprocating and combined engines: A textbook for higher educational institutions in the specialty "Internal combustion engines"*. Moscow: Mashinostroenie; 1983. (in Russ.)
2. Berdnikov AA, Mingazov SR, Zhukov AA. Increasing the economic performance of internal combustion engines by turning off part of the cylinders. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2017;1:12–16. (in Russ.)
3. Berdnikov AA, Nagaitsev DS, Titkov NV. Internal combustion engine with non-traditional duty cycle. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2017;1:21–25. (in Russ.)
4. Ter-Mkrtychyan GG. *Internal combustion engines with non-traditional work cycles: textbook*. allowance. Moscow: MADI; 2015. (in Russ.)

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** A.A. Berdnikov — search for publications, writing the text of the manuscript, expert opinion, approval of the final version; A.O. Shangutov — editing the text of the manuscript; A.V. Shilonosov — editing the text of the manuscript, creating images. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

6. SCUDERI™ Split-Cycle Engine – принципиально новая схема четырехтактного мотора с «раздельным циклом». Дата обращения: 10.04.23. Режим доступа: <http://enginepro.ru/?p=698>
7. Бердников А.А. Оценка подвижности активных автопоездов. Пермь: Изд-во ПВИ войск национальной гвардии, 2022.
8. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
9. Белоусов Б.Н., Шухман С.Б. Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами: монография. М.: Агроконсалт, 2013.
10. Ушнурцев С.В., Келлер А.В. Общие положения оптимизации распределения мощности в трансмиссии военной автомобильной техники // *Стратегическая стабильность*. 2022. № 2(99). С. 57–64.
11. Лянденбургский В.В., Шаихов Р.Ф., Пономарев В.М., и др. Основы конструкции автомобилей: шасси, трансмиссия: учебное пособие. Пенза: Изд-во ПГАУС, 2014.

5. Five-stroke engine works and can go into production [internet] Accessed: 10.04.23. Available from: <http://autoutro.ru/review/2014/11/19/pyatitaktnyj-dvigatel-rabotayet-i-mozhet-pojti-v-proizvodstvo>
6. SCUDERI™ Split-Cycle Engine – a fundamentally new scheme of a four-stroke motor with a “separate cycle” [internet] Accessed: 10.04.23. Available from: <http://enginepro.ru/?p=698>
7. Berdnikov AA. *Evaluation of the mobility of active road trains*. Perm: Izd-vo PVI voysk natsionalnoy gvardii; 2022. (in Russ.)
8. Belousov BN, Popov SD. *Wheeled vehicles of extra large payload capacity*. Design. Theory. Calculation. Moscow: MG TU im NE Bauman; 2006. (in Russ.)
9. Belousov BN, Shukhman SB. *Applied mechanics of ground traction vehicles with mechatronic systems: monograph*. Moscow: Agrokonsalt; 2013. (in Russ.)

10. Ushnurtsev SV, Keller AV. General provisions for optimizing power distribution in the transmission of military vehicles. *Strategicheskaya stabilnost.* 2022;2(99):57–64. (in Russ.)

11. Lyandenburgsky VV, Shaikhov RF, Ponomarev VM, et al. *Fundamentals of car design: chassis, transmission: textbook.* Penza: Izd-vo PGAUS; 2014. (in Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

**\* Бердников Алексей Анатольевич,**

доцент, д-р техн. наук,  
профессор кафедры инженерного обеспечения служебно-боевой деятельности войск национальной гвардии;  
адрес: Российская Федерация, 614030, Пермь,  
ул. Гремячий Лог, д. 1;  
ORCID: 0000-0003-1716-6659;  
eLibrary SPIN: 1472-8701;  
e-mail: aa-berdnikov@mail.ru

**Шангутов Антон Олегович,**

доцент, д-р воен. наук,  
доцент кафедры продовольственного и вещевого обеспечения;  
ORCID: 0000-0001-7054-8109;  
eLibrary SPIN: 2737-5382;  
e-mail: army\_5559@mail.ru

**Шилоносков Артем Владимирович,**

доцент, канд. пед. наук,  
доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем;  
ORCID: 0009-0000-2513-5444;  
eLibrary SPIN: 3760-6350;  
e-mail: artemjch@rambler.ru

\* Автор, ответственный за переписку

## AUTHORS' INFO

**\* Alexey A. Berdnikov,**

Associate Professor, Dr. Sci. (Tech.),  
Professor of the of Engineering Support of Service and Combat Activities of the National Guard Troops Department;  
address: 1 Gremyachy Log street, 614030 Perm,  
Russian Federation;  
ORCID: 0000-0003-1716-6659;  
eLibrary SPIN: 1472-8701;  
e-mail: aa-berdnikov@mail.ru

**Anton O. Shangutov,**

Associate Professor, Dr. Sci. (Mil.),  
Associate Professor of the Department of Food and Clothing Supply;  
ORCID: 0000-0001-7054-8109;  
eLibrary SPIN: 2737-5382;  
e-mail: army\_5559@mail.ru

**Artem V. Shilonosov,**

Cand. Sci. (Ped.),  
Associate Professor of the Department of Computer Engineering Software and Automated Systems;  
ORCID: 0009-0000-2513-5444;  
eLibrary SPIN: 3760-6350;  
e-mail: artemjch@rambler.ru

\* Corresponding author