

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209>

Оригинальное исследование



Методика синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных автомобилей сельскохозяйственного назначения

А.В. Келлер^{1, 2}, А.В. Попов³¹ Центр социологических исследований, Москва, Российская Федерация;² Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация;³ Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для развития сельского хозяйства, играющего важную роль в экономике страны, необходимы полноприводные грузовые автомобили, способные взаимодействовать с различными машинами и агрегатами, выполняя операции на бездорожье и дорогах общего пользования. Опыт их эксплуатации на агропредприятиях показывает, что серийные системы распределения мощности в трансмиссиях не учитывают весь спектр факторов, влияющих на движение автомобилей, что снижает эффективность их использования.

Цель работы — разработка методики синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения.

Методы. На основе методов системного анализа, многокритериальной оптимизации, регрессионного и корреляционного анализа предложена поэтапная методика синтеза базовых закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводного автомобиля и их адаптации к реальным условиям движения. В основу исследования положены базовые закономерности распределения мощности, адаптированные к условиям функционирования полноприводного грузового автомобиля.

Результаты. Методика синтеза закономерностей распределения мощности рассмотрена постадийно, на основе многокритериальной оптимизации. Установлены конструктивные и эксплуатационные факторы, задающие параметры движения по дорогам всех типов и местности. Выявлены базовые закономерности распределения мощности, обеспечивающие эффективность, надёжность и безопасность автомобиля. В зависимости от функций полноприводные грузовики условно разделены на 4 группы со своими показателями и критериями эффективности. На основании проведённого исследования сформулированы 4 задачи оптимизации.

Заключение. Авторами разработана методика определения закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения и их адаптации к условиям движения. Основные стадии методики: постановка задачи оптимизации; вычислительная процедура и определение базовых закономерностей распределения мощности; адаптация базовых закономерностей и оценка эффективности решений. Установлено, что при моделировании движения полноприводных грузовиков по маршруту достаточно воспользоваться дифференциальными уравнениями прямолинейного движения.

Ключевые слова: автомобильный транспорт; грузовые автомобили; полноприводные автомобили; автомобили сельскохозяйственного назначения; ведущие колеса полноприводных грузовых автомобилей; трансмиссии полноприводных грузовых автомобилей; системы распределения мощности полноприводных грузовых автомобилей; управляемое распределение мощности в трансмиссиях.

Как цитировать:

Келлер А.В., Попов А.В. Методика синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных автомобилей сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 6. С. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209>

Рукопись получена: 10.08.2023

Рукопись одобрена: 15.10.2023

Опубликована онлайн: 15.12.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209>

Original Study Article

Method of synthesis of patterns of power distribution between the driving wheels of all-wheel drive agricultural vehicles

Andrey V. Keller^{1, 2}, Andrey V. Popov³

¹ Sociological Research Center, Moscow, Russian Federation;

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;

³ Central Scientific Automotive and Automotive Engines Institute "NAMI", Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: All-wheel drive trucks, capable of interacting with various machines and units, performing operations in off-road conditions and on public roads, are needed for the development of agriculture, which plays an important role in the country's economy. The experience of their operation at agricultural enterprises shows that current power distribution systems in drivetrains does not consider the full range of factors affecting the motion of vehicles, which decreases the efficiency of their use.

AIM: Development of the method of synthesis of patterns of power distribution between the driving wheels of all-wheel drive agricultural trucks.

METHODS: Based on methods of system analysis, multiobjective optimization, regression and correlation analyses, the step-by-step method of synthesis of basic patterns of power distribution between the driving wheels of an all-wheel drive car and their adaptation to real driving conditions is proposed. Fundamentals of the study are basic patterns of power distribution, adopted to operation conditions of a all-wheel drive truck.

RESULTS: The method of synthesis of power distribution patterns is considered step-by-step, based on multiobjective optimization. The design and operational factors that set the parameters of traffic on roads of all types and terrain have been established. The basic patterns of power distribution that ensure the efficiency, reliability and safety of a vehicle are revealed. Depending on the functions, all-wheel drive trucks are conditionally divided into 4 groups with their own indicators and performance criteria. Based on the conducted study, 4 optimization problems are formulated.

CONCLUSIONS: The authors have developed the method for determining the patterns of power distribution between the driving wheels of all-wheel drive trucks and their adaptation to traffic conditions. The main stages of the method are: formulation of the optimization problem; computational procedure and determination of basic patterns of power distribution; adaptation of the basic patterns and evaluation of effectiveness of solutions. It is found that it is sufficient to use the differential equations of straight-line motion when simulating the motion of all-wheel drive trucks along the route.

Keywords: motor transport; trucks; all-wheel drive vehicles; agricultural vehicles; driving wheels of all-wheel drive vehicles; drivetrain of all-wheel drive vehicles; power distribution systems of all-wheel drive vehicles; controlled power distribution in drivetrain.

To cite this article:

Keller AV, Popov AV. Method of synthesis of patterns of power distribution between the driving wheels of four-wheel drive agricultural vehicles. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(6):505–514. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-568209>

Received: 10.08.2023

Accepted: 15.10.2023

Published online: 15.12.2023

ВВЕДЕНИЕ

Сельское хозяйство играет важную роль в экономике и социальной жизни России. В целом в агропромышленном комплексе нашей страны, по оценке экспертов, производится около 8,0% валового внутреннего продукта, из них в сельском хозяйстве — 3,7%. В отрасли в настоящее время занято порядка 4.01 млн человек (что эквивалентно 5,8% численности всех занятых в экономике), а также сосредоточено 2,1% основных производственных фондов [1, 2].

Для дальнейшего развития отечественного сельского хозяйства необходимы специализированные полноприводные грузовые автомобили, способные работать в поле в одной технологической цепочке с различными машинами и агрегатами, а также выполнять транспортные операции по бездорожью и дорогам общего пользования [3, 4].

Вместе с тем, имеющийся опыт создания и эксплуатации автомобилей сельскохозяйственного назначения на предприятиях аграрного комплекса показывает недостаточную степень реализации их тягово-скоростных свойств, топливной экономичности, опорной проходимости и других важнейших технических характеристик [5–9]. Серийно применяемые в настоящее время системы распределения мощности в трансмиссиях полноприводных грузовых автомобилей успешно решают лишь локальные задачи недопущения буксования ведущих колёс, предотвращая, тем самым, потерю проходимости. Они не учитывают весь спектр дорожных, природно-климатических и эксплуатационных факторов, оказывающих непосредственное и существенное влияние на движение автомобиля. Это ограничивает степень реализации потенциальных свойств полноприводных грузовых автомобилей и снижает эффективность их использования.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Задача распределения мощности между ведущими мостами и колёсами, как составная часть теории автомобилей, всегда находилась в центре внимания специалистов. Наиболее известными в этой области стали работы П.В. Аксенова, Я.С. Агейкина, Б.Н. Белоусова, В.В. Ванцевича, В.А. Горелова, Ю.Г. Горшкова, Т.Д. Дзоцендзэ, Д.А. Загарина, А.В. Келлера, М.А. Козловской, Г.О. Котиева, А.Х. Лефарова, Ю.В. Пирковского, В.Ф. Платонова, И.А. Плиева, А.Т. Скойбеды, М.П. Чистова, В.М. Шарипова, Г.Б. Шпилевского, С.Б. Шухмана, Б. Беккера, J.Y. Wong, P. Kučera, F. H. Stelzeneder и многих других авторов.

Анализ проведённых исследований показал, что наиболее рациональной является полностью дифференциальная схема трансмиссии с дифференциалами, имеющими переменную в зависимости от дорожных условий степень блокировки [10–13]. Научное обоснование закономерностей изменения блокирующих свойств дифференциалов в зависимости от дорожных, природно-климатических

и эксплуатационных факторов, а также разработка методов их реализации в трансмиссиях полноприводных грузовых автомобилей является важной задачей, имеющей существенное народнохозяйственное значение [14, 15].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу синтеза закономерностей изменения блокирующих свойств дифференциалов следует, по мнению авторов, положить базовые закономерности распределения мощности, которые в последующем будут адаптированы к непрерывно изменяющимся условиям функционирования полноприводного грузового автомобиля. В этом случае на первом этапе путём решения задачи синтеза закономерностей необходимо получить базовые закономерности распределения мощности, составляющие ядро алгоритма распределения мощности. Затем это ядро будет дополнительно интеллектуальными качествами и реализовано в виде управляющей программы контроллера системы управления.

Методика синтеза базовых закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводного грузового автомобиля и их адаптации к реальным условиям движения состоит из следующих этапов:

- постановка задачи оптимизации;
- обоснование и выбор критериев оптимальности базовых закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами автомобиля;
- разработка математической модели внутренних рабочих процессов полноприводного автомобиля и его взаимодействия со средой функционирования;
- моделирование движения полноприводного грузового автомобиля по типовым дорогам и местности;
- генерация (на основе выбранных критериев) оптимальных закономерностей распределения мощности;
- оценка чувствительности полученных закономерностей распределения мощности к комплексу внешних, внутренних и управляющих факторов;
- минимизация количества информационных переменных для адаптации, используемых при корректировке базовой программы распределения мощности на основе корреляционного анализа;
- формирование регрессионных зависимостей параметров распределения мощности между ведущими колёсами и мостами от информационных переменных;
- оценка эффективности предлагаемых закономерностей распределения мощности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Этапы методики синтеза закономерностей распределения мощности можно сгруппировать по видам решаемых задач и представить в виде трех стадий (рис. 1):

1. постановка задачи оптимизации;
2. вычислительная процедура и определения базовых закономерностей распределения мощности;

3. адаптация базовых закономерностей и оценка эффективности решений.

Конкретное содержание каждого из этапов оптимизации распределения мощности зависит от конструкции и назначения полноприводного грузового автомобиля. При этом следует учитывать, что оптимальное распределение мощности можно обеспечить только

при индивидуальном распределении мощности между ведущими колёсами.

Базовые закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами полноприводного автомобиля можно получить на основе многокритериальной оптимизации (рис. 2).

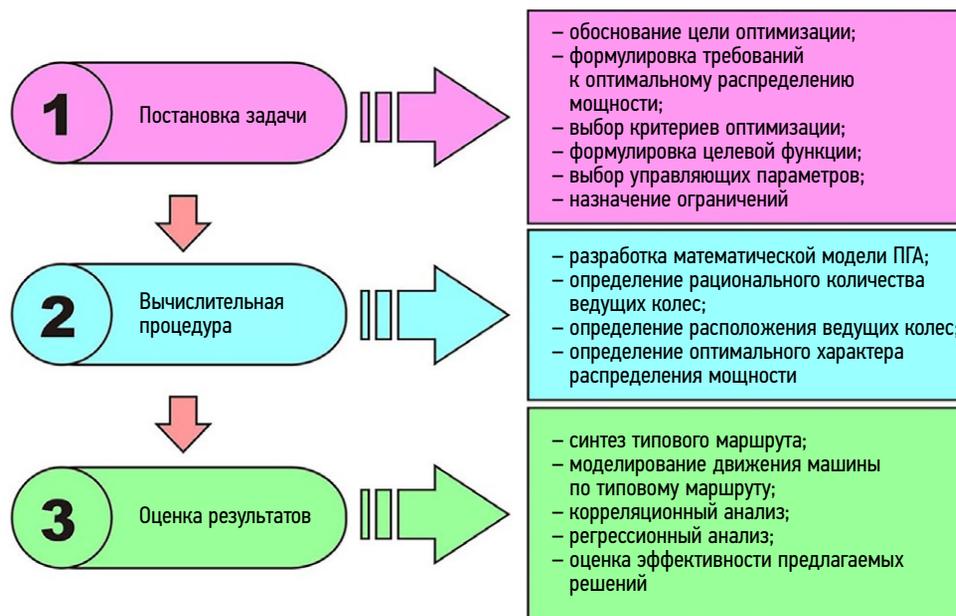


Рис. 1. Методика определения закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами полноприводного грузового автомобиля.

Fig. 1. Methodology for determining the patterns of power distribution between the drive axles and wheels of wheels of an all-wheel drive truck.

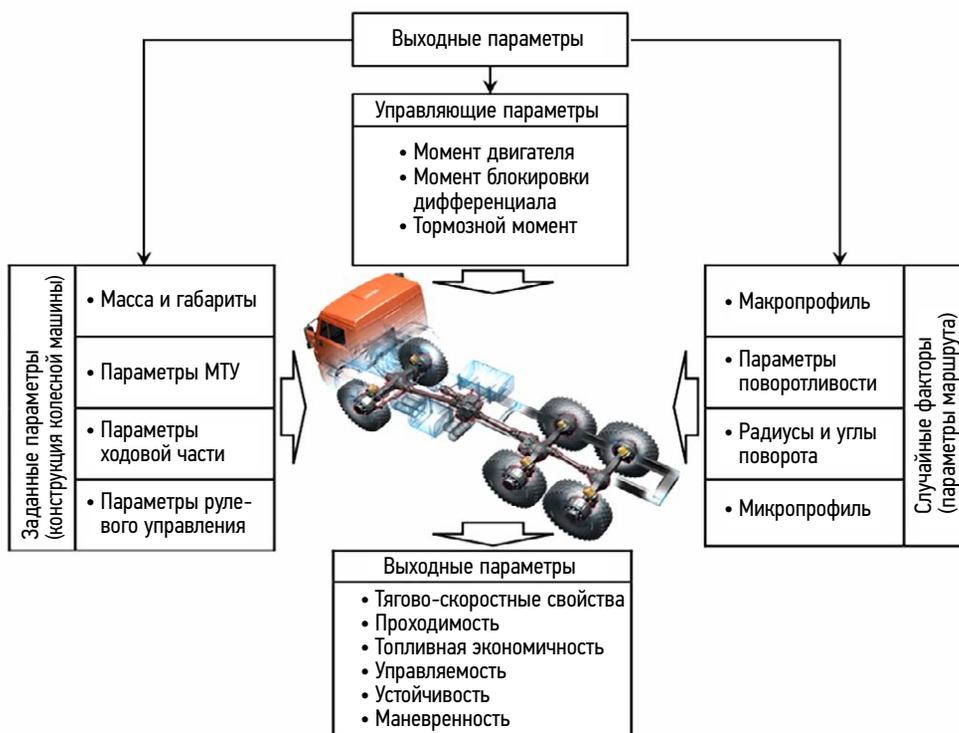


Рис. 2. Структурная схема функционирования полноприводного грузового автомобиля.

Fig. 2. Block diagram of the functioning of an all-wheel drive truck.

Параметры движения полноприводного автомобиля по дорогам всех типов и местности определяются рядом конструктивных и эксплуатационных факторов, которые можно считать заданными:

- массово-габаритные параметры автомобиля, перевозимого груза и/или технологического оборудования;
- силовые и скоростные характеристики энергетической установки и силовой передачи;
- тип и характеристики подвески и колёсного движителя;
- параметры рулевого и тормозного управления.

Полноприводный автомобиль функционирует в условиях случайной внешней среды, характеризующейся:

- коэффициентами сопротивления качению и сцепления;
- глубиной/высотой и частотой впадин и выступов;
- уклоном дороги;
- кривизной траектории.

В этих условиях повлиять на эффективность движения полноприводного грузового автомобиля можно, управляя:

- крутящим моментом двигателя, подводимым к силовой передаче;
- тормозным моментом, прикладываемым к буксующему колесу;
- параметрами блокирующих свойств дифференциальных механизмов распределения мощности.

Базовые закономерности распределения мощности должны обеспечить высокие показатели эффективности полноприводных автомобилей при выполнении конкретных задач по обеспечению перевозки грузов и подвижности технологического оборудования, при буксировании различных прицепных систем. Кроме того, они призваны обеспечить надёжность функционирования всех механизмов и безопасность движения. При этом должны выполняться следующие требования [16, 17]:

- пропорциональность подводимых к ведущим мостам и колёсам крутящих моментов силам сопротивления качению колёс и их сцепным свойствам;
- ограничение крутящего момента, подводимого к каждому колесу, сцепными свойствами опорной поверхности;
- обеспечение возможности свободного вращения колеса с угловой скоростью, соответствующей его траектории движения, без возникновения циркуляции мощности;
- поддержание в процессе криволинейного движения нейтральной поворачиваемости;
- распределение крутящих моментов между ведущими мостами и колёсами без нарушения устойчивости движения;
- поддержание заданной водителем траектории движения;
- распределение тормозных сил между ведущими мостами и колёсами при торможении двигателем пропорционально сцепным свойствам;
- отсутствие перераспределения тормозных сил в сторону передних колёс при отсутствии антиблокировочной системы (АБС);

- исключение влияния на распределение тормозных сил при работе АБС;
- плавное протекание переходных процессов распределения крутящих моментов, минимизирующее их влияние на устойчивость движения и комфортабельность автомобиля при одновременном обеспечении высокой чувствительности к управляющему воздействию.

Следует отметить, что задача полного удовлетворения перечисленных и во многом противоречащих друг другу требований не имеет осуществлённого в металле технического решения.

Эффективность полноприводного грузового автомобиля определяется комплексом его эксплуатационных свойств (выходных параметров): тягово-скоростных, тормозных, проходимости, топливной экономичности, плавности хода, управляемости, устойчивости и манёвренности [18]. В связи с этой важной задачей поиска базовых закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами является отыскание таких управляющих параметров, которые обеспечили бы максимальную эффективность движения полноприводного грузового автомобиля.

Отметим, что целевая функция поиска закономерностей распределения мощности определяется ролью и местом полноприводного грузового автомобиля в транспортной системе России, а также задачами отраслей, предприятий и ведомств, в которых они используются. В зависимости от выполняемых функций полноприводные грузовые автомобили можно условно разделить на 4 группы (рис. 3), каждая из которых имеет свои показатели эффективности [19]:

- I. Автомобили транспортной группы, предназначенные для перевозки груза переменной массы (бортовые автомобили, автомобили-самосвалы, автоблестерны и т.д.);
- II. Автомобили тяговой группы, предназначенные для буксирования прицепов с переменной массой груза (седельные тягачи);
- III. Автомобили транспортно-тяговой группы, предназначенные для перевозки грузов и одновременно буксирования оборудования, прицепов (полуприцепов) многоцелевого назначения (например, автоблестерны, сельскохозяйственные самосвальные автопоезда т.д.);
- IV. Автомобили для монтажа и транспортировки технологического оборудования (автомобильные краны, пожарные автомобили и т.д.)

С учетом описанного разделения полноприводных грузовых автомобилей на группы можно выделить следующие критерии эффективности первого (более низкого) уровня:

- для автомобилей I группы — масса перевозимого груза;
- для автомобилей II группы — масса буксируемого прицепа (сила тяги на крюке);

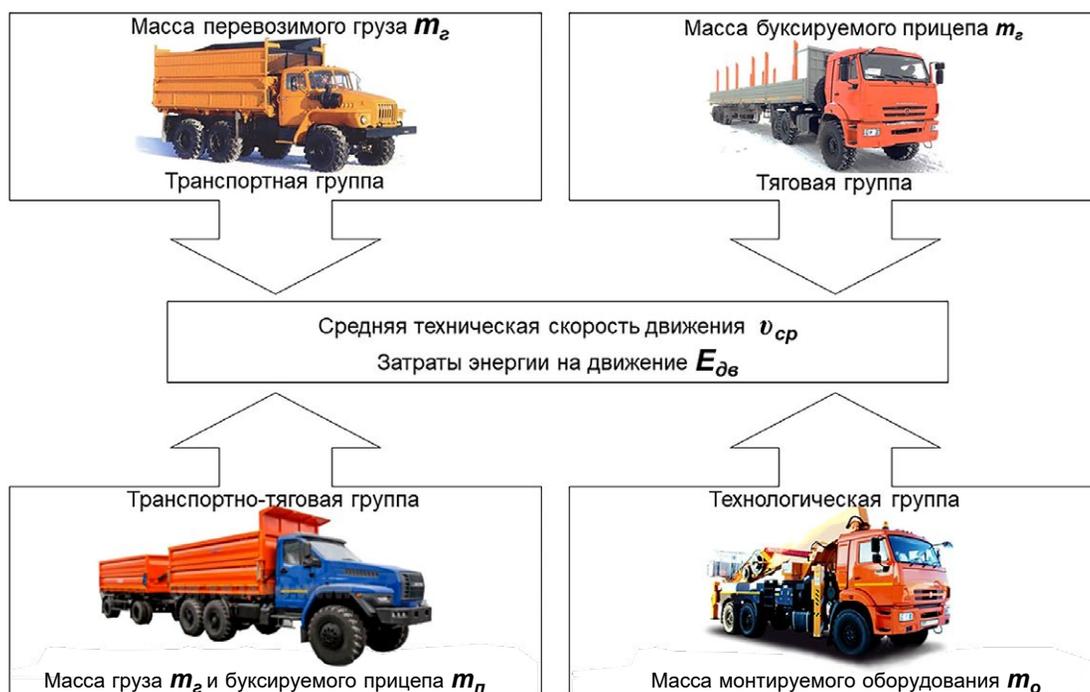


Рис. 3. Группы полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения по функциональному назначению и критерию оценки их эффективности.

Fig. 3. Groups of all-wheel drive agricultural trucks by functional purpose and criteria for evaluating their effectiveness.

- для автомобилей III группы — масса перевозимого груза и буксируемого прицепа;
- для автомобилей IV группы — масса монтируемого оборудования.

Критерии эффективности второго уровня являются обобщёнными; в качестве основных обобщённых показателей эффективности полноприводных грузовых автомобилей целесообразно использовать среднюю скорость движения v_{cp} на маршруте и затраты энергии $E_{дв}$ на движение. В связи с тем, что масса перевозимого груза и буксируемого прицепа определяется силой, реализованной в контакте ведущих колёс с опорной поверхностью, для полноприводных грузовых автомобилей I–III групп можно использовать единый обобщённый показатель эффективности первого уровня — силу тяги на крюке.

Таким образом, на основании вышеизложенного, целесообразно сформулировать 4 задачи оптимизации.

1 задача: найти допустимое управление распределением мощности, переводящее полноприводный грузовой автомобиль из начальной точки в конечную точку за заданное время с максимальной нагрузкой (перевозимым грузом, оборудованием, буксируемым прицепом и т.д.).

Критерий оптимизации:

$$F_1 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_б \end{pmatrix} = P_{кр}, \quad (1)$$

где $M_{дв}$ — крутящий момент двигателя, подводимый к силовой передаче; M_T — тормозным моментом,

прикладываемым к буксующему колесу; $K_б$ — коэффициент блокировки дифференциала.

Целевая функция:

$$F_1 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_б \end{pmatrix} = P_{кр} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Ограничения:

- гарантированное преодоление внешних сил сопротивления движения:

$$\sum P_k \geq \sum P_{сопр}, \quad (3)$$

где $\sum P_k$ — суммарная сила тяги; $\sum P_{сопр}$ — сумма внешних и внутренних сил сопротивления движению;

- сцепление колёс с опорной поверхностью [20]:

$$\varphi_i R_{z_i} = \sqrt{P_{кi}^2 + P_{yi}^2}; \quad (4)$$

- ограничение по критическому буксованию ведущих колёс:

$$\delta_i \leq \delta_{доп}, \quad (5)$$

где δ_i , $\delta_{доп}$ — текущее и допустимое буксование колеса.

2 задача: найти допустимое управление распределением мощности, переводящее полноприводный грузовой автомобиль с максимальной нагрузкой (грузом, монтируемым

оборудованием, буксируемым прицепом и т.д.) из начальной в конечную точку за минимальное время.

Критерий оптимизации:

$$F_2 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} = v_{cp}. \quad (6)$$

Целевая функция:

$$F_2 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} = v_{cp} \rightarrow \max. \quad (7)$$

Ограничения:

- гарантированное преодоление внешних сил сопротивления движения, согласно формуле (3);
- сцепление колёс с опорной поверхностью, согласно формуле (4);
- ограничение по критическому буксованию ведущих колёс, согласно формуле (5)
- ограничения на допустимые скорости движения:

$$v_{cp} = v_{доп}, \quad (8)$$

где $v_{доп}$ — допустимая по условиям устойчивости и плавности хода скорость движения.

3 задача: найти допустимое управление распределением мощности, переводящее полноприводный грузовой автомобиль с максимальной нагрузкой (грузом, монтируемым оборудованием, буксируемым прицепом и т.д.) из начальной точки в конечную точку за заданное время с минимальными затратами энергии.

Критерий оптимизации:

$$F_3 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} = E_{дв}. \quad (9)$$

Целевая функция:

$$F_3 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} = E_{дв} \rightarrow \min. \quad (10)$$

Ограничения:

- гарантированное преодоление внешних сил сопротивления движения, согласно формуле (3);
- сцепление колёс с опорной поверхностью, согласно формуле (4);
- ограничение по критическому буксованию ведущих колёс, согласно формуле (5).

Отметим, что задачи 1–3 представляют собой, по сути, задачу однокритериальной оптимизации. Более общей и требующей применения методов многокритериальной

оптимизации является 4-я задача. Для её решения целесообразно применение минимаксной стратегии поиска.

4 задача: найти допустимое управление распределением мощности, переводящее полноприводный грузовой автомобиль с максимальной нагрузкой (грузом, монтируемым оборудованием, буксируемым прицепом и т.д.) из начальной точки в конечную точку за минимальное время и с минимально возможным расходом энергии.

Критерии оптимизации:

$$f_1 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} = P_{кр}, \quad f_2 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} = v_{cp}, \quad f_3 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} = E_{дв}. \quad (11)$$

Целевая функция:

$$F_4 \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} = \min_{кр} \max_i \left\{ f_i \begin{pmatrix} M_{дв} \\ M_T \\ K_6 \end{pmatrix} \right\}. \quad (12)$$

Ограничения:

- обеспечение принципиальной возможности движения машины, согласно формуле (3);
- накладываемые на сцепные свойства колёс с опорной поверхностью, согласно формуле (4);
- ограничения на допустимые величины буксования колёс, от которых зависят глубина образующейся колеи, согласно формуле (5);
- ограничения на допустимые скорости движения, согласно формуле (8).

В связи с тем, что средняя скорость движения автомобиля определяется величиной реализуемых в данных условиях движения ускорений [21], которые, в свою очередь, определяются реализуемыми силами тяги и потерями мощности двигателя, задачи 1–4 поиска средней скорости движения и минимума расхода энергии являются эквивалентными.

На стадии определения базовых закономерностей распределения мощности между ведущими мостами и колёсами полноприводного грузового автомобиля необходимо найти совокупность зависимостей между параметрами самого автомобиля (мощность силовой установки, масса, габариты, координаты центров тяжести, парусности и тягово-сцепного устройства), его груза и оборудования (масса, габариты, координаты центра тяжести) и опорной поверхности (коэффициенты сцепления и сопротивления качению), с одной стороны, и коэффициентом блокировки межосевых и межколесных дифференциалов, с другой стороны. При этом решается обратная задача динамики [22]: по заданным требованиям к эффективности полноприводных грузовых автомобилей, выраженным в виде сформулированных критериев эффективности, определяются параметры характеристик управляющих воздействий. В результате обеспечивается максимальная эффективность машины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования авторами была разработана методика определения закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения и их адаптации к реальным условиям движения. Основными стадиями методики являются: постановка задачи оптимизации; вычислительная процедура и определение базовых закономерностей распределения мощности; адаптация базовых закономерностей и оценка эффективности предлагаемых решений.

В зависимости от выполняемых функций полноприводные грузовые автомобили сельскохозяйственного назначения условно разделены на 4 группы, каждая из которых имеет свои показатели эффективности, в том числе:

- масса перевозимого груза (монтируемого оборудования, буксируемого прицепа и т.п.);
- средняя скорость движения *иср* на маршруте;
- затраты энергии *Е_{дв}* на движение.

Установлено, что при моделировании движения полноприводных грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения по маршруту, осуществляемому с целью определения базовых закономерностей распределения мощности, достаточно воспользоваться дифференциальными уравнениями прямолинейного движения автомобиля.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. А.В. Келлер — научное руководство, участие в проведении экспериментальных исследований, редактирование текста рукописи; А.В. Попов — разработка программы и методик экспериментального исследования, проведение и обработка результатов эксперимента, подготовка рабочих материалов для рукописи, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи. 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 проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка математической модели эксплуатации шасси (трансмиссии, ходовой части и механизмов управления) в статическом и динамическом состоянии и создание на её основе цифрового двойника платформы легкового автомобиля» (шифр: FZRR-2023-0007).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.V. Keller — scientific leadership, participation in experimental research, editing of the text of the manuscript; A.V. Popov — development of the program and methods of experimental research, conducting and processing the results of the experiment, preparation of working materials of the text of the manuscript, literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the article. The authors confirm the compliance of their authorship with the international *ICMJE* criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

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

Funding source. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project “Development of a mathematical model of chassis operation (transmission, chassis and control mechanisms) in static and dynamic states and creation of a digital twin of a passenger car platform on its basis” (code: FZRR-2023-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сельское хозяйство в России. 2021: Статистический сборник. М.: Росстат, 2021.
2. Агропромышленный комплекс России в 2021 году. Основные показатели АПК Российской Федерации. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. М.: Росинформагротех, 2022.
3. Шкель А.С., Загарин Д.А., Козловская М.А. и др. Новое семейство технологических надстроек для АПК на базе специализированного автомобиля сельскохозяйственного назначения // Технология колёсных и гусеничных машин. 2015. № 6(22). С. 12–19. EDN VBCYND
4. Измайлов А.Ю., Дзоценидзе Т.Д., Евтюшенков Н.Е. и др. Исследование рыночной ниши и обоснование функциональных особенностей грузовых автомобилей сельскохозяйственного

- назначения с полной массой до 6 т // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России : Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, посвящённой 145-летию со дня рождения основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина, Москва, 17–18 сентября 2013 года. Том Часть 2. — Москва: ВНИИМСХ, 2013. С. 127–133. EDN TTCANB
5. Загарин Д.А., Козловская М.А., Дзоценидзе Т.Д. Анализ потребности и спроса на машины сельскохозяйственного назначения в условиях структурного кризиса в экономике // Автомобильная промышленность. 2020. № 9. С. 1–7. EDN ULVGPB
 6. Годжаев Т.З., Зубина В.А., Малахов И.С. Обоснование функциональных характеристик сельскохозяйственных

мобильных энергосредств в многокритериальной постановке // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, №6. С. 411–420. doi: 10.17816/0321-4443-121325

7. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // Сельский механизатор. 2021. № 2. С. 3–5. EDN AKRSBW

8. Дзотсенидзе Т.Д., Козловская М.А., Загарин Д.А. Новый технический облик автомобилей и тракторов как способ преодоления кризисных явлений в отечественном машиностроении // Автомобильная промышленность. 2020. № 10. С. 13–18. EDN NZCFB

9. Красников Г.Я., Дидманидзе О.Н., Сиротин П.В. и др. Обоснование технического облика агротехники и стратегических подходов её проектирования // Чтения академика В.Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 25–26 января 2023 года. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2023. С. 10–32. EDN OQHKER

10. Vantsevich V.V., Paldan J.R., Farley B.K. Mobility optimization and control of a 4x4 he-vehicle in curvilinear motion on stochastic terrain // Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Charlotte, NC, 21–24 августа 2016 года. Charlotte: ASME, 2016. doi: 10.1115/DETC2016-59207

11. Vantsevich V.V., Bortolin G. Axle Drive and Brake-Based Traction Control Interaction // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2011. Vol. 4, N. 1. P. 49–55. doi: 10.4271/2011-01-2160

12. Keller A., Aliukov S., Anchukov V., et al. Investigations of Power Distribution in Transmissions of Heavy Trucks // SAE Technical Papers. 2016. doi: 10.4271/2016-01-1100

13. Высоцкий М.С., Дубовик Д.А., Харитончик С.В. Управление межосевым и межколесным приводом

большегрузных автомобилей // Вестні НАН Беларусі. 2005. № 3. С. 30–35.

14. Шухман С.Б., Соловьев В.И., Прочко Е.И. и др. Теория силового привода колёс автомобилей высокой проходимости. Москва: Агробизнесцентр, 2007. EDN QNUPLT

15. Тарасик В.П., Пузанова О.В., Курстак В.И. Моделирование дифференциальных приводов ведущих колёс мобильных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 3. С. 42–53.

16. Барыкин, А.Ю. Основы теории современных дифференциалов. Набережные Челны: КамПИ, 2001.

17. Круташов А. В. Методы формирования рационального распределения мощности в трансмиссии легкового полноприводного автомобиля. автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М., 2009.

18. Keller A., Aliukov S. Efficient power distribution in an all-wheel drive truck // Lecture Notes in Engineering and Computer Science, London, 01–03 июля 2015 года. London: WCE, 2015. P. 1201–1206. EDN XFRNQZ

19. Высоцкий М.С., Ванцевич В.В., Кабанов В.И. и др. Энергонагруженность и надёжность дифференциальных механизмов транспортно-тяговых машин. Минск: Наука і техника, 1991.

20. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. EDN FOWIYZ

21. Платонов В.Ф. Полноприводные автомобили. М.: Машиностроение, 1989.

22. Тарасик В.П., Рынкевич С.А. Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами. Минск: Технопринт, 2004. EDN TIYBIX

REFERENCES

1. *Agriculture in Russia. 2021: Statistical collection*. Moscow: Rosstat; 2021. (In Russ.)

2. *Agro-industrial complex of Russia in 2021. Main indicators of the agro-industrial complex of the Russian Federation*. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Moscow: Rosinformagrotekh; 2022. (In Russ.)

3. Shkel AS, Zagarin DA, Kozlovskaya MA, et al. A new family of technological add-ons for the agro-industrial complex based on a specialized agricultural vehicle. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin*. 2015;6(22):12–19. EDN VBCYND (In Russ.)

4. Izmailov AYu, Dzotsenidze TD, Evtushenkov NE, et al. Research of the market niche and justification of the functional features of agricultural trucks with a gross weight of up to 6 tons. In: *System of technologies and machines for the innovative development of the Russian agro-industrial complex: Collection of scientific reports of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 145th anniversary birthday of the founder of agricultural mechanics V.P. Goryachkina, Moscow, September 17–18, 2013. Volume Part 2*. Moscow: VNIIMSKh; 2013:127–133. EDN TTCANB (In Russ.)

5. Zagarin DA, Kozlovskaya MA, Dzotsenidze TD. Analysis of the need and demand for agricultural machinery in conditions of a structural crisis in the economy. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2020;9:1–7. EDN ULVGPB (In Russ.)

6. Godzhaev TZ, Zubina VA, Malakhov IS. The justification of functional properties of agricultural moving power units in the multi-objective scenario. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(6):411–420. (In Russ.) doi: 10.17816/0321-4443-121325

7. Lachuga YuF, Izmailov AYu, Lobachevsky YaP, et al. Priority directions of scientific and technical development of domestic tractor manufacturing. *Selskiy mekhanizator*. 2021;2:3–5. EDN AKRSBW (In Russ.)

8. Dzotsenidze TD, Kozlovskaya MA, Zagarin DA. The new technical appearance of cars and tractors as a way to overcome crisis phenomena in the domestic mechanical engineering. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2020;10:13–18. EDN NZCFB (In Russ.)

9. Krasnikov GYa, Didmanidze ON, Sirotnin PV, et al. Justification of the technical appearance of agricultural machinery and strategic approaches to its design. In: *Readings of Academician V. N. Boltinsky: Collection of articles, Moscow, January 25–26, 2023*. Moscow: ООО «Сам Полиграфист»; 2023:10–32. EDN OQHKER (In Russ.)

10. Vantsevich VV, Paldan JR, Farley BK. Mobility optimization and control of a 4x4 he-vehicle in curvilinear motion on stochastic terrain. In: *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Charlotte, NC, August 21–24, 2016*. Charlotte: ASME; 2016. doi: 10.1115/DETC2016-59207

11. Vantsevich VV, Bortolin G. Axle Drive and Brake-Based Traction Control Interaction. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. 2011;4(1):49–55. doi: 10.4271/2011-01-2160

12. Keller A, Aliukov S, Anchukov V, et al. Investigations of Power Distribution in Transmissions of Heavy Trucks. *SAE Technical Papers*. 2016. doi: 10.4271/2016-01-1100
13. Vysotsky MS, Dubovik DA, Kharitonchik SV. Control of inter-axle and inter-wheel drive of heavy-duty vehicles. *Vestsi NAN Belarusi*. 2005;3:30–35. (In Russ.)
14. Shukhman SB, Solovyov VI, Prochko EI, et al. *Theory of power drive of wheels of off-road vehicles*. Moscow: Agrobiznesstsentr; 2007. EDN QNUPLT (In Russ.)
15. Tarasik VP, Puzanova OV, Kurstak VI. Modeling of differential drivetrain of driving wheels of mobile machines. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2009;3:42–53. (In Russ.)
16. Barykin AYU. *Fundamentals of the theory of modern differentials*. Naberezhnye Chelny: KamPI; 2001. (In Russ.)
17. Krutashov AV. *Metody formirovaniya ratsionalnogo raspredeleniya moshchnosti v transmissii legkovogo polnoprivodnogo avtomobilya* [dissertation] Moscow; 2009. (In Russ.)
18. Keller A, Aliukov S. Efficient power distribution in an all-wheel drive truck. In: *Lecture Notes in Engineering and Computer Science, London, July 01–03, 2015*. London: WCE; 2015:1201–1206. EDN XFRNQZ
19. Vysotsky MS, Vantsevich VV, Kabanov VI, et al. *Power loading and reliability of differential mechanisms of transport and traction machines*. Minsk: Navuka i tekhnika; 1991. (In Russ.)
20. Tarasik VP. *Theory of vehicle motion*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg; 2022. EDN FOWIQZ (In Russ.)
21. Platonov VF. *Four-wheel drive vehicles*. Moscow: Mashinostroenie; 1989. (In Russ.)
22. Tarasik VP, Rynkevich SA. *Intelligent vehicle control systems*. Minsk: Tekhnoprint; 2004. EDN TIYBIX (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* Келлер Андрей Владимирович,

профессор, д-р техн. наук,
заведующий кафедрой «Наземные транспортные средства»,
и.о. директора;
адрес: Российская Федерация, 123104, Москва,
Тверской б-р, д. 13, стр. 1;
ORCID: 0000-0003-4183-9489;
eLibrary SPIN: 4622-5727;
e-mail: andreikeller@rambler.ru

Попов Андрей Вячеславович,

аспирант научно-образовательного центра;
ORCID: 0009-0006-3266-9464;
eLibrary SPIN: 2518-0935;
e-mail: popov.andrey@gmail.com

AUTHORS' INFO

* Andrey V. Keller,

Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Head of the Land Vehicles Department,
Acting Director;
address: 13 B1 Tverskoy boulevard, 1123104 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0003-4183-9489;
eLibrary SPIN: 4622-5727;
e-mail: andreikeller@rambler.ru

Andrey V. Popov,

Postgraduate of the Scientific and Educational Center;
ORCID: 0009-0006-3266-9464;
eLibrary SPIN: 2518-0935;
e-mail: popov.andrey@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author