

УДК 629.3.023.1:007.52

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-120

Р.Ю. Добрецов<sup>1</sup>, А.А. Красильников<sup>2</sup>, А.В. Артемьев<sup>3</sup>

## КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОРТАЛЬНОГО ВЕДУЩЕГО МОСТА ДЛЯ ТРАКТОРОВ СЕМЕЙСТВА «КИРОВЕЦ»



<sup>1</sup> Роман Юрьевич Добрецов, д.т.н., профессор  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: [dr-idpo@yandex.ru](mailto:dr-idpo@yandex.ru)



<sup>2</sup> Андрей Александрович Красильников, к.т.н., доцент,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: [a\\_kr36@mail.ru](mailto:a_kr36@mail.ru)



<sup>3</sup> Александр Валерьевич Артемьев, аспирант,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: [alexandr43105@mail.ru](mailto:alexandr43105@mail.ru)

### Аннотация

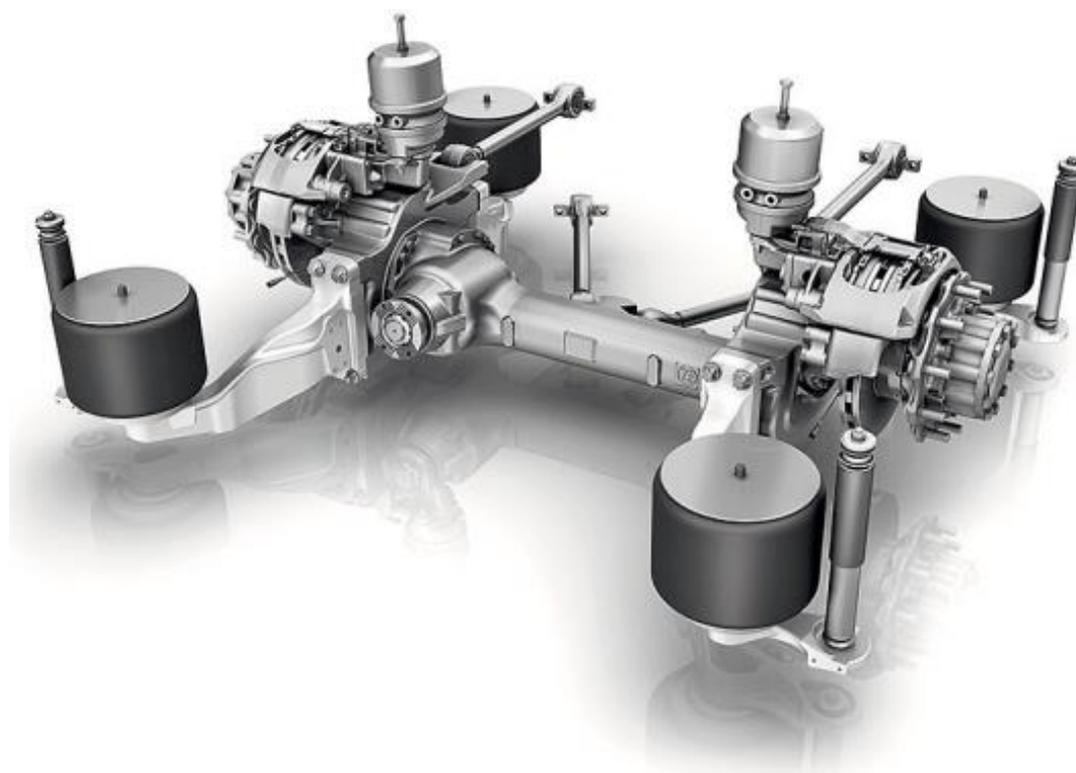
В работе рассмотрены вопросы использования двухпоточных электромеханических порталных ведущих мостов в составе шасси серийно выпускаемых тракторов. Семейство тракторов «Кировец» выбрано, поскольку для него рассматривается вопрос замены ведущих колес гусеничными модулями, что ведет к увеличению высоты расположения центра тяжести шасси. Предложен принцип интеграции тягового электродвигателя в состав ведущего моста. Рассмотрены основные расчетные зависимости, иллюстрирующие кинематические и силовые соотношения для подобных конструкций. Обсуждаются перспективы использования технологий, апробированных в области танкостроения для обеспечения выпуска ведущего моста предлагаемой структуры.

*Ключевые слова:* силовая передача, трансмиссия трактора, управление поворотом, механизм распределения мощности

## **Введение**

Использование порталных мостов обычно подразумевает увеличение сложности и себестоимости конструкции, но оправдано при необходимости обеспечения заданного дорожного просвета [1], обеспечения необходимого расположения центра масс по высоте или снижения уровня пола для городских автобусов, троллейбусов, трамваев.

На рис. 1 показан серийно выпускаемый ведущий порталный мост от производителя *Zahnrad Fabrik* [2]).



**Рис. 1.** Портальный мост AV133 от *ZF Friedrichshafen AG* [2]

Проектирование и серийный выпуск оригинальных порталных мостов не были актуальны для отечественных производителей транспортных и транспортно-тяговых машин до введения экономических санкций против Российской Федерации.

Закупка комплектующих у китайских производителей является паллиативным решением, следует сосредоточиться на обеспечении технологической независимости и решить вопрос полноценного импортозамещения максимально оперативно.

В проектировании тракторов порталные мосты востребованы для обеспечения геометрической проходимости при выпуске специальных шасси: хлопководческого, рисоводческого, чайно-плантационного и др.

Применение порталных мостов на тракторах сельскохозяйственного назначения менее востребовано. Однако, при замене ведущего колеса колесного трактора на гусеничный модуль возникает проблема увеличения высоты расположения центра масс шасси.

Например, АО «Петербургский тракторный завод» разрабатывает и осуществляет серийный выпуск шарнирно-сочлененных тракторов различных тяговых классов, использующих вместо колес гусеничные модули. При этом становится актуальной задача проектирования и производства порталных ведущих мостов, позволяющих снизить положение центра тяжести трактора и уменьшить нагрузки на рулевой механизм шарнирно-сочлененного шасси.

## **Методы**

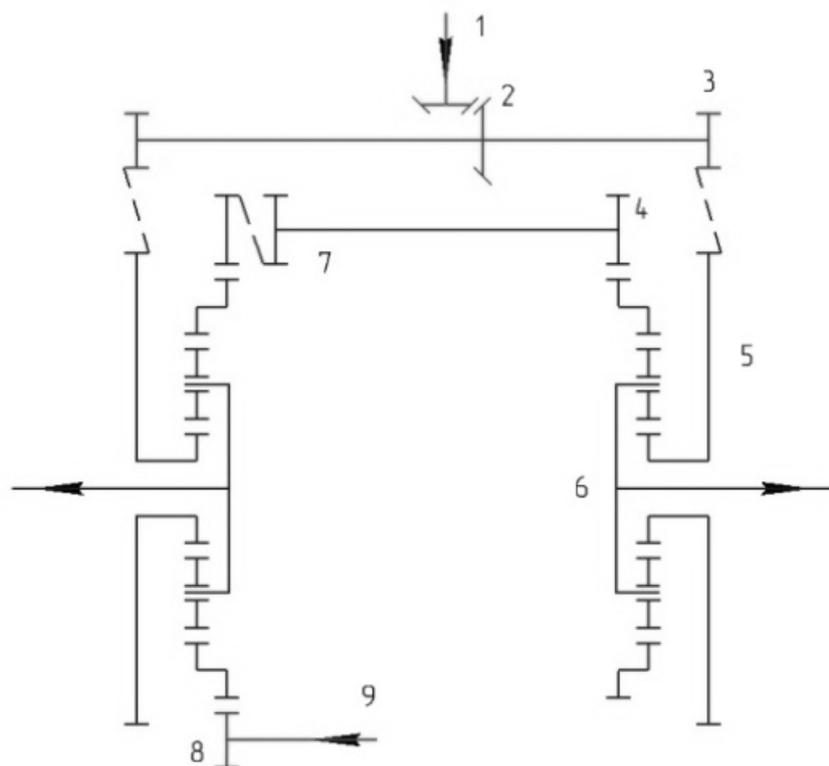
Для решения поставленных задач привлекаются методики и технологии, описанные, например, в работах [3,4,5]. при работе над задачами использовались методы, характерные для проектирования зубчатых передач трансмиссий транспортных машин [6,7,8], ходовой системы колесной машины [8], теории движения трактора [9,10,11].

## **Результаты**

Концепция электромеханического порталного моста ориентирована на семейство тракторов «Кировец» в перспективной модификации, в которой ведущие колеса замещены гусеничными модулями. На рис. 2 представлен пример кинематической схемы, позволяющей в комплексе разрешить основные затруднения, связанные с такой модификацией ходовой системы: оказывается возможным понизить положение центра тяжести и разгрузить механизм поворота трактора за счет достижения контроля за распределением мощности по бортам. Предшествующими разработками этом направлении являются поисковые НИР в области создания управляемых механизмов распределения мощности для транспортных и тяговых машин [12].

Понижение центра масс трактора возможно путем уменьшения габаритов центральной передачи за счет перехода к двухступенчатой схеме, когда первая ступень имеет передаточное отношение, близкое к единице, а вторая (габаритная) отнесена к ведущему колесу и классифицируется, как колесный (или бортовой) редуктор. при использовании в составе второй ступени простого планетарного механизма

возможно достижение передаточного отношения не менее 5,5. Сдвоенные простые планетарные ряды при необходимости позволят получить значение передаточного отношения не менее 25. Возможно также использование в составе механизма валковых передач, при этом может быть дополнительно увеличен дорожный просвет, но суммарное передаточное отношение (при рациональной компоновке) существенно снизится.



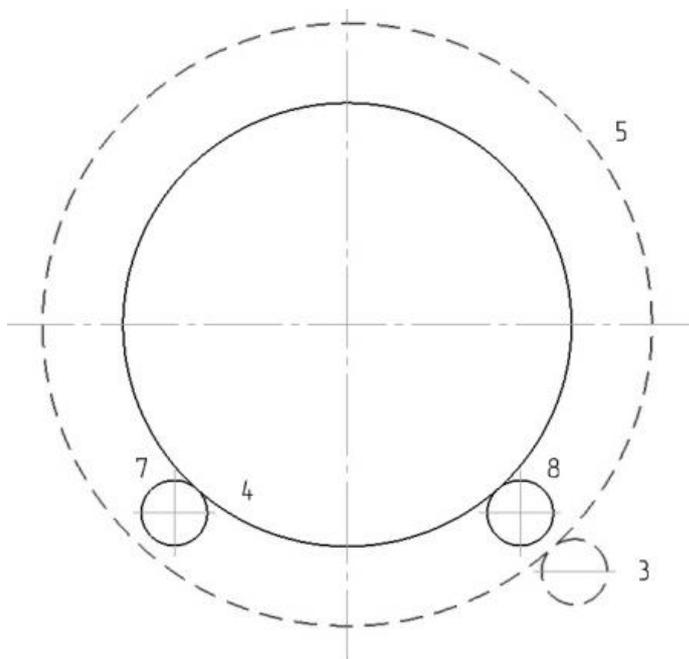
**Рис. 2.** Примерная кинематическая схема портального моста (вал и шестерни межбортовой связи условно смещены): 1 и 2 – первая ступень главной передачи; 3 – вторая ступень главной передачи; 4, 5 и 6 – эпицикл, солнце и водило суммирующего планетарного ряда; 7 – межбортовая связь; 8 – редуктор тягового электродвигателя (ТЭД); 9 – подвод мощности от ТЭД

Представленный на рис. 2 механизм выполняет функцию симметричного межколесного дифференциала за счет наличия суммирующих планетарных рядов и межбортовой связи 7. Такие ряды предлагается изготовить, как простые (трехзвенные) планетарные механизмы. Подходы к определению их основных параметров предложены, например, в работе [13] и др.

Межбортовая связь может быть реализована за счет применения вальной передачи с передаточным отношением, равным  $(-1)$ . Возможности межбортовой связи возможно развить, модифицируя механизм,

Рис. 3 иллюстрирует потенциал снижения высоты положения центра

тяжести трактора: за счет расположения валов 3 и 7 возможно опустить раму трактора с установленными на ней основными агрегатами машины и, тем самым, снизить положение центра тяжести.



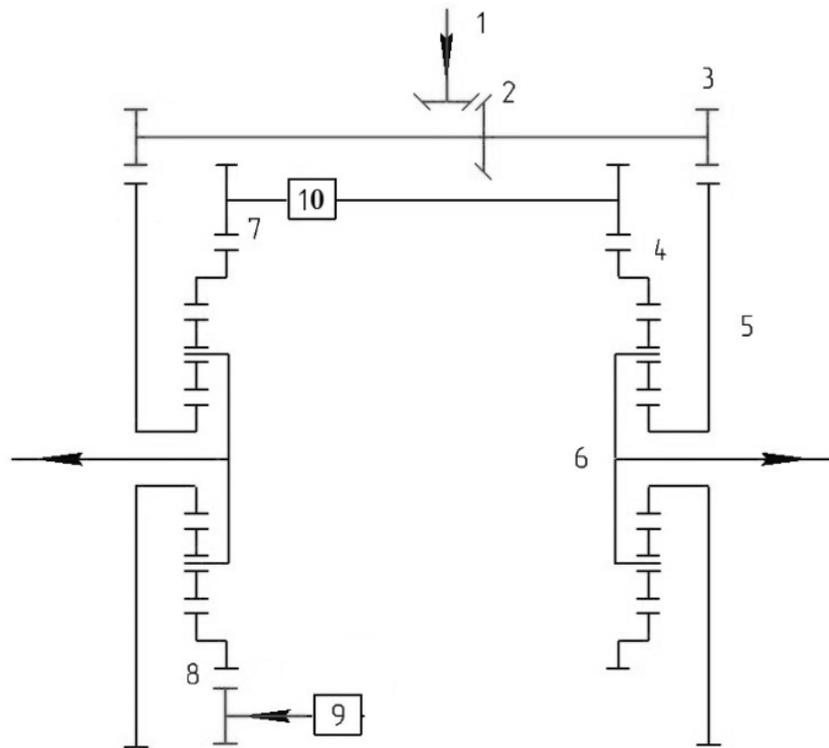
**Рис. 3.** Примерная схема расположения шестерен портального моста, вид сбоку (сохранены обозначения по рис. 2)

Снижение высоты центра масс повышает поперечную устойчивость трактора против опрокидывания, в том числе и при повороте на косогоре.

Предварительный анализ показал: при смещении рамы (и соответственно центра тяжести вниз) трактора на 0,2...0,3 м, что реализуемо при использовании предлагаемой схемы портального моста, допустимый угол крена на косогоре увеличивается на 4...5°.

Рассматриваемая компоновка портального моста трактора позволяет реализовать схему двухпоточной трансмиссии с сохранением преимуществ применения рассматриваемого моста в составе машины. На рис. 4 показана схема портального моста с электромеханическим приводом. Электродвигатель с редуктором передает энергию к движителю вторым потоком мощности, параллельно механической части трансмиссии трактора.

При этом появляется возможность более гибкого управления работой силовой установки трактора, обеспечения оптимальных режимов ее работы в широком диапазоне скоростей и нагрузок. Реверсивный тяговый электрический двигатель (ТЭД) [14,15,16,17] позволяет создать дополнительный поворачивающий момент и снизить нагрузку на рулевой привод, изначально ориентированный на работу с колесным движителем. Это направление требует дополнительного развития.



**Рис. 4.** Примерная кинематическая схема портального моста (вал и шестерни межбортовой связи условно смещены): 1 и 2 – первая ступень главной передачи; 3 – вторая ступень главной передачи; 4, 5 и 6 – эпицикл, солнце и водило суммирующего планетарного ряда; 7 – межбортовая связь; 8 – редуктор; 9 – тяговый электродвигатель; 10 – управляемый тормоз

Кинематика рассматриваемого моста определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} \omega_{51(2)} = k\omega_{41(2)} + (1-k)\omega_{61(2)} \\ \omega_{51} = -\omega_{52} \end{cases}$$

Для описания силовых соотношений следует использовать систему уравнений:

$$\begin{cases} M_{51(2)} = -kM_{41(2)} \\ M_{51(2)} = -(1-k)M_{61(2)} \\ M_{51} = M_{52} \end{cases}$$

Индексы в этих уравнения используются для учета особенностей конструкции планетарных механизмов, имеющих одинаковую структуру.

При этом значение передаваемого крутящего момента ограничена по условию обеспечения сцепления с опорной поверхностью:

$$M_{61(2)} \leq 0,65\varphi_x R_z r_k$$

В данной зависимости использованы обозначения:  $\varphi_x$  – коэффициент сцепления шин с грунтом в продольном направлении,  $R_z$  – нормальная

реакция (определяется долей сцепного веса, приходящейся на мост),  $r_k$  – радиус ведущего колеса Числовой коэффициент учитывает неравномерность распределения нагрузок по бортам машины.

Максимальное значение передаточного отношения между бортами возможно оценить по зависимости:

$$u_{\Sigma \max} = -\frac{\omega_{51(2)}}{\omega_1} \cdot (1-k)$$

Значение потребного силового межбортового передаточного отношения оценивается по зависимости (см., также, работу [18]):

$$u_M = M_{62}/M_{61} = \varphi_x/f > 1$$

При работе на горизонтальной поверхности и соблюдении принципа согласования силового и кинематического радиусов поворота секций, можно использовать зависимость:

$$u_M = (2\rho_{\min} + 1)/(2\rho_{\min} - 1)$$

Здесь:  $\rho_{\min} = R_{\min}/B$  – минимальный относительный радиус поворота; в свою очередь  $R_{\min}$  и  $B$  – минимальный радиус поворота и колея (м). Для большинства шасси получаем потребное значение  $u_M = 1,44$ .

## Обсуждение

Вопрос использования в тракторостроении гибридных электромеханических трансмиссий в настоящий момент является дискуссионным. Однако, интерес к нему имеется, у отечественной промышленности есть и опыт проектирования и изготовления тракторов семейства ДЭТ (ДЭТ-250, ДЭТ-400). Особенностью этих машин является использование полностью механической трансмиссии с приводом от ТЭД.

Представляется, что рассмотренный в данной статье подход может быть востребован при проектировании тракторов 3-4 тяговых классов, а дальнейшего исследования требует вопрос расчетной оценки ТЭД исходя из концепции использования порталного моста, как варианта двухпоточного механизма поворота для трактора с гусеничными модулями на местах ведущих колес.

В настоящее время результаты работы используются в учебном процессе при реализации в Высшей школе транспортна ООП магистратуры «Наземные транспортно-технологические комплексы» [19,20] и планируется дальнейшее развитие темы.

## Заключение

Таким образом, есть основания предполагать, что результаты могут быть применены в практике отечественного тракторостроения. При этом в

качестве потенциального промышленного партнера рассматривается в первую очередь АО «Петербургский тракторный завод».

По результатам работы можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Предложенные принципы могут быть использованы при проектировании электромеханического порталного ведущего моста шарнирно-сочлененного трактора с гусеничными модулями.

2. Целесообразно при работе над конструкцией подобного моста применять методы проектирования, сложившиеся в отечественном танкостроении.

3. В отечественном танкостроении накоплен опыт производства, который может быть востребован при организации серийного выпуска оригинального порталного моста.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Селифонов В.В., Бирюков М.К. Устройство и техническое обслуживание грузовых автомобилей. М. : Издательский центр «Академия», 2013. 400 с.
- [2] URL: <https://5koleso.ru/avtopark/vygod-na-publiku-noveyshie-razrabotki-zf-dlya-avtobusov/?ysclid=lod877rzzv932556925> (дата обр. 15.04.2024).
- [3] Добрецов Р.Ю., Войнаш С.А. Портальный мост с разнесенным дифференциалом. Перспективы развития технической эксплуатации мобильной техники. Материалы Международной научно-практической конференции. Рязань, 2023. С. 231-237.
- [4] Лозин А.В., Семенов А.Г. и др. Гибридный механизм распределения мощности в трансмиссии транспортной машины. Патент на изобретение RU 2658486 С1, 21.06.2018. Заявка №2017113638 от 19.04.2017.
- [5] Поршнев Г.П., Добрецов Р.Ю., Красильников А.А. Трансмиссия с электромеханической передачей для тракторов и дорожно-строительных машин. Известия МГТУ МАМИ. 2020. №2 (44). С. 33-41.
- [6] Fischer R The Automotive Transmission Book, Fischer, R., Küçükay, F., Jürgens, G., Najork, R., Pollak, B. // ISBN 978-3-319-05262-5, ISBN 978-3-319-05263-2 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-05263-2, © Springer International Publishing Switzerland 2015, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, © 2015.
- [7] Шеломов В.Б. Проектирование наземных транспортно-технологических машин. Планетарные коробки передач. Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 31 с.
- [8] Wong J.Y. Theory of ground vehicles. 2001. 528 p.

- [9] Павлов В.В., Кувшинов В.В. Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин. Чебоксары : ООО «Чебоксарская типография №1», 2011. 424 с.
- [10] Основы теории и расчета трактора и автомобиля. М.: Агропромиздат, 1986. 383 с.
- [11] Schramm D., ect. Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2013. 412 p.
- [12] Ushiroda Y., Sawase K., ect. Development of Super AYC: «Technical review», 2003, №15. С.73-76.
- [13] Demidov N. N. ect. The drivetrain and the steering mechanism for the twin engines tracked vehicle. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177 (2019) 012010. С. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012010>
- [14] Mehrdad E., ect. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 2005. 395 с.
- [15] Belko V., Glivenko, ect., "Current Pulse Polarity Effect on Metallized Film Capacitors Failure," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 6, pp. 1020-1025, June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2703947>
- [16] Belko V.O., Emelyanov O.A., Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design (2016) Journal of Applied Physics, 119 (2), статья № 024509
- [17] Belko V.O., Petrenya Y.K., ect., "Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation," 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 800-802. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657272>
- [18] Шеломов В.Б. Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин. Тяговый расчет криволинейного движения. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 90 с.
- [19] Добрецов Р.Ю.. Гибридные технологии обучения в магистратуре: проектирование мобильных энергетических платформ. Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 29-40.
- [20] Dobretsov R., Krasilnikov A., ect., The use of a hybrid form of education in the master's program on the example of the discipline "fundamentals of digital design of mobile energy platforms. AIP Conf. Proc. 3102, 020026 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0199902>

R.Yu. Dobretsov, A.A. Krasilnikov, A.V. Artemiev

## **THE CONCEPT OF AN ELECTROMECHANICAL PORTAL DRIVE AXLE FOR TRACTORS OF THE KIROVETS LINEUP**

## Abstract

The paper considers the issues of using two-thread electromechanical gantry drive axles as part of the chassis of mass-produced tractors. The Kirovets tractor family was chosen because the issue of replacing the driving wheels with tracked modules is being considered for it, which leads to an increase in the height of the center of gravity of the chassis. The principle of integration of a traction electric motor into the driving axle is proposed. The main computational dependencies illustrating the kinematic and force relations for such structures are considered. The prospects of using technologies tested in the field of tank construction to ensure the release of the drive bridge of the proposed structure are discussed.

*Key words:* power plant, transmission, chassis, movement system, power distribution

## REFERENCES

- [1] Selifonov V.V., Biryukov M.K. Device and maintenance of trucks. Moscow : Publishing center "Academy", 2013. 400 p.. (rus.)
- [2] URL: <https://5koleso.ru/avtopark/vygod-na-publiku-noveyshie-razrabotki-zf-dlya-avtobusov/?ysclid=lod877rzzv932556925> (дата обр. 15.04.2024).
- [3] Dobretsov R.Yu., Voynash S.A. Portal axle with a spaced differential. Prospects for the development of technical operation of mobile equipment. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Ryazan, 2023. pp. 231-237. (rus.)
- [4] Lozin A.V., Semenov A.G., ect.. Hybrid power distribution mechanism in the transmission of a transport vehicle. Patent for the invention RU 2658486 C1, 06/21/2018. Application No.2017113638 dated 04/19/2017. (rus.)
- [5] Porshnev G.P., Dobretsov R.Yu., Krasilnikov A.A. Transmission with electromechanical transmission for tractors and road construction machines. Izvestiya MGTU MAMI. 2020. No.2 (44). pp. 33-41. (rus.)
- [6] Fischer R The Automotive Transmission Book, Fischer, R., Küçükay, F., Jürgens, G., Najork, R., Pollak, B. // ISBN 978-3-319-05262-5, ISBN 978-3-319-05263-2 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-05263-2, © Springer International Publishing Switzerland 2015, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, © 2015.

- [7] Shelomov V.B. Design of ground transportation and technological machines. Planetary gearboxes. St. Petersburg : POLYTECH PRESS, 2019. 31 p. (rus.)
- [8] Wong J.Y. Theory of ground vehicles. 2001. 528 p.
- [9] Pavlov V.V., Kuvshinov V.V. Theory of motion of multi-purpose tracked and wheeled vehicles. Cheboksary : Cheboksary Printing House No. 1 LLC, 2011. 424 p. (rus.)
- [10] Fundamentals of the theory and calculation of a tractor and a car. M.: Agropromizdat, 1986. 383 p.
- [11] Schramm D., ect. Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2013. 412 p.
- [12] Ushiroda Y., Sawase K., ect. Development of Super AYC: «Technical review», 2003, №15. C.73-76.
- [13] Demidov N. N. ect. The drivetrain and the steering mechanism for the twin engines tracked vehicle. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177 (2019) 012010. C. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012010>
- [14] Mehrdad E., ect. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 2005. 395 c.
- [15] Belko V., Glivenko, ect., "Current Pulse Polarity Effect on Metallized Film Capacitors Failure," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 6, pp. 1020-1025, June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2703947>
- [16] Belko V.O., Emelyanov O.A., Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design (2016) Journal of Applied Physics, 119 (2), статья № 024509
- [17] Belko V.O., Petrenya Y.K., ect., "Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation," 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 800-802. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657272>
- [18] Shelomov V.B. Theory of motion of multipurpose tracked and wheeled machines. Traction calculation of curvilinear motion. St. Petersburg: Izd-vo Politechn. un-ta, 2013. 90 c. (rus.)
- [19] Dobretsov R.Yu. Hybrid technologies of learning in master's programs: designing mobile energy platforms. Sovremennoe mashinostroenie. Science and Education. 2022. № 11. C. 29-40. (rus.)
- [20] Dobretsov R., Krasilnikov A., ect., The use of a hybrid form of education in the master's program on the example of the discipline "fundamentals of digital design of mobile energy platforms. AIP Conf. Proc. 3102, 020026 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0199902>